

Wolframhartmetall

Umfassende Untersuchung physikalischer und chemischer Eigenschaften, Prozesse und Anwendungen (IX)

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

Teil 3: Leistungsoptimierung von Hartmetall

Kapitel 9: Multifunktionalisierung von Hartmetall

Die Multifunktionalität von Hartmetall kann **die komplexen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt** (Lebensdauer $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden), der Elektronikfertigung (spezifischer Widerstand $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und intelligenter Geräte (Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) erfüllen, indem Leitfähigkeit, Magnetismus, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Selbstschmierung und intelligente Reaktionsfähigkeiten reguliert werden. Herkömmliches Hartmetall ist für seine hohe Härte (HV 1800 ± 30) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) bekannt, aber seine Leitfähigkeit ($\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), sein Magnetismus (Sättigungsmagnetisierungsintensität $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und seine Anpassungsfähigkeit sind unzureichend, was seine Anwendung in multifunktionalen Szenarien begrenzt. Die Optimierung muss bei **der Mikrostruktur** (Korngröße $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), **der Zusammensetzungskontrolle** (TiC $5 \% \pm 0,1 \%$, Ni $8 \% \pm 0,1 \%$) und **der Oberflächentechnik** (Texturtiefe $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) ansetzen, um eine synergetische Leistungsverbesserung zu erzielen.

diskutiert **den multifunktionalen Pfad von Hartmetall** unter den Aspekten **(1) elektrische Leitfähigkeit und (2) magnetische Regulierung, (3) verschleißfeste und korrosionsbeständige leitfähige Verbundleistung, (4) Selbstschmierung und Antihafwirkung und (5) bionisches und intelligentes Hartmetall**. Elektrische Leitfähigkeit und magnetische Regulierung werden durch Co-Gehalt ($10 \% \pm 1 \%$) und Ni-Substitution optimiert; die verschleißfeste und korrosionsbeständige leitfähige Verbundleistung konzentriert sich auf das WCTiCNi-System (Härte $> \text{HV } 1600 \pm 30$, Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$); **Selbstschmierung und Antihafwirkung werden durch MoS₂ ($5 \% \pm 0,1 \%$) und Oberflächentextur** (Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,01$) eingeführt; **Bionisches und intelligentes Hartmetall** basiert auf **einer Gradientenstruktur** (Porosität $5 \% \pm 1 \%$) und **reaktionsfähigen Materialien** (Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und bietet intelligente Anwendungen. Dieses Kapitel schließt an Kapitel 8 (Cr₃ C₂-Beschichtungshärte $> \text{HV } 1500 \pm 30$) an und bildet die Grundlage für Kapitel 10 (Grüne Fertigung).

9.1 Kontrolle der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

Die elektrische Leitfähigkeit (Leitfähigkeit $\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$) und die magnetischen Eigenschaften (Sättigungsmagnetisierung $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) von Hartmetall wirken sich direkt auf seine Anwendung in **elektronischen Kontakten** (spezifischer Widerstand $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), **magnetischen Prüfungen** (Empfindlichkeit $> 95\% \pm 2\%$) und der Qualitätskontrolle aus. Der hohe spezifische Widerstand von WC ($100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) muss durch eine Co- oder Ni-Bindungsphase (Leitfähigkeit $> 15 \text{ MS/m} \pm 0,2 \text{ MS/m}$) optimiert werden, während der Ferromagnetismus von Co (Koerzitivfeldstärke $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) eine Grundlage für die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zerstörungsfreie Prüfung bietet. Die Vorschriften erfordern ein Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit, Magnetismus und mechanischen Eigenschaften ($K_{IC} \geq 1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

In diesem Abschnitt werden der Kontrollmechanismus und die Anwendung aus der Perspektive der Leitfähigkeits- und Magnetdetektion sowie der Qualitätskontrolle von Hartmetall erörtert. Dabei werden die elektrische Theorie (Drude-Modell), die magnetische Analyse (VSM, Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ emu/g}$) und technische Fälle kombiniert. Beispielsweise hat WC10Co (Co 10 % ± 1 %) eine Leitfähigkeit von $10,5 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$ und eine Magnetisierung von $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, was den Anforderungen elektronischer Kontakte und der Qualitätsdetektion entspricht.

9.1.1 Elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall (~10 MS/m)

9.1.1.1 Übersicht über Leitfähigkeitsprinzip und -technologie von Hartmetall

Die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall (Zielwert $\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$) wird von der Leitfähigkeit der Bindungsphase Co ($15 \text{ MS/m} \pm 0,2 \text{ MS/m}$) dominiert, während die Halbleitereigenschaften von WC (spezifischer Widerstand $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) die Gesamtleistung begrenzen. Die elektrische Leitfähigkeit σ folgt dem Drude-Modell:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Dabei ist n die freie Elektronendichte ($\sim 10^{28} \text{ m}^{-3} \pm 10^{27} \text{ m}^{-3}$), e die Elektronenladung ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), τ die Relaxationszeit ($10^{-14} \text{ s} \pm 10^{-15} \text{ s}$) und m die Elektronenmasse ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$). Der hohe n -Wert von Co erhöht σ , während die WC-Körner ($0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) die Streuung an der Grenzfläche erhöhen (Streurate $10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) und so die Leitfähigkeit reduzieren. Das Optimierungsziel ist ein spezifischer Widerstand von $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, um die Anforderungen elektronischer Kontakte zu erfüllen. (Das Drude-Modell der elektrischen Leitfähigkeit (σ) ist eine klassische Theorie zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Ladungsträgern (z. B. freien Elektronen) in Metallen unter Einwirkung eines elektrischen Felds. Das Modell wurde 1900 von Paul Drude vorgeschlagen und geht davon aus, dass sich Elektronen in Metallen als freie Teilchen zufällig im Kristallgitter bewegen und unter einem angelegten elektrischen Feld gerichtet driften.)

Der Test erfolgt mit der Vier-Sonden-Methode (Stromstärke $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$, Genauigkeit $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), und die Probengröße beträgt $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Beispielsweise beträgt der spezifische Widerstand von WC10Co (Co 10 % ± 1 %) $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, was besser ist als der von WC6Co ($15 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Die verbesserte Leitfähigkeit reduziert nicht nur die Joule-Wärme ($< 0,1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,01 \text{ W/cm}^2$), sondern verbessert auch die Signalübertragungseffizienz ($> 99 \% \pm 1 \%$). Dieser Abschnitt analysiert Mechanismus, Tests und Optimierung. (Die Vier-Sonden-Methode ist eine genaue Technik zum Messen der elektrischen Leitfähigkeit oder des spezifischen Widerstands von Materialien, die sich besonders zur Charakterisierung von Halbleitern, dünnen Filmen und leitfähigen Materialien eignet. Diese Methode reduziert den Einfluss des Kontaktwiderstands und geometrischer Faktoren durch die Verwendung von vier Sonden (normalerweise Metallnadeln oder -elektroden), um die Messgenauigkeit zu verbessern.)

9.1.1.2 Mechanismusanalyse der elektrischen Leitfähigkeit in Hartmetallen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Cobalt, Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase sind Verbundwerkstoffe mit hoher Härte, hoher Verschleißfestigkeit und guter elektrischer Leitfähigkeit. Der Mechanismus der elektrischen Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Materialzusammensetzung, die Mikrostruktur und die Elektronentransporteigenschaften beeinflusst. Basierend auf klassischer Theorie und moderner Forschung analysiert diese Arbeit kurz den Leitfähigkeitsmechanismus von Hartmetall:

(1) Beitrag der Bindungsphase

Die dominierende Rolle von Kobalt bei der Leitfähigkeit: Als hochleitfähige Phase hat Kobalt einen spezifischen Widerstand von etwa $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und dominiert die Stromübertragung durch die Bildung eines kontinuierlichen Netzwerks (Volumenanteil $10 \% \pm 1 \%$). Die freien Elektronen im Kobalt driften unter Einwirkung eines elektrischen Felds gerichtet, was die Hauptursache für die Leitfähigkeit von Hartmetall ist.

Nickelsubstitution

Durch Zugabe von Nickel ($8-12 \% \pm 0,1 \%$, spezifischer Widerstand ca. $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) kann Kobalt ersetzt und der spezifische Widerstand weiter auf $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ gesenkt werden. Das Fermi-Niveau von Nickel (ca. $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) ähnelt dem von Kobalt, und auch die Leitfähigkeit ist vergleichbar, die Korrosionsbeständigkeit ist jedoch besser (Korrosionsstromdichte $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), sodass es sich für Anwendungen in rauen Umgebungen eignet.

Einfluss des Bindephasengehalts

Mit zunehmendem Anteil der Bindephase (z. B. von 6% auf 15%) steigt die Leitfähigkeit aufgrund der zunehmenden Anzahl von Elektronenwanderungswegen deutlich an, umgekehrt sinkt mit abnehmender Bindephase die Leitfähigkeit.

(2) Begrenzung der harten Phase

Geringe elektrische Leitfähigkeit von Wolframkarbid

WC weist kovalente Bindungseigenschaften auf (WC-Bindungsenergie beträgt etwa $700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), eine geringe Elektronenbeweglichkeit ($< 10 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$) und einen hohen spezifischen Widerstand (etwa $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und sein Beitrag zur Gesamtleitfähigkeit ist begrenzt.

Partikeleffekt

WC-Partikel sind in der Bindephase dispergiert und behindern die freie Bewegung der Elektronen, was dazu führt, dass die Leitfähigkeit mit zunehmendem WC-Gehalt abnimmt.

(3) Einfluss der Mikrostruktur

Korngröße und Korngrenzendichte

Die Korngröße beträgt etwa $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, wodurch die Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) zunimmt, was zu einer verstärkten Grenzflächenstreuung und einer Erhöhung des spezifischen Widerstands um etwa $10 \% \pm 2 \%$ führt. Feine Körner erhöhen zwar die Härte, tragen aber nicht zur Leitfähigkeit bei.

Gleichmäßigkeit der Bindungsphasenverteilung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Gleichmäßigkeit der Co- oder Ni-Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) ist für die Leitfähigkeit entscheidend. Eine Entmischung ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) kann zu einer lokalen Erhöhung des spezifischen Widerstands um etwa $20 \% \pm 3 \%$ führen und so die Gesamtleistung beeinträchtigen.

Netzwerkcontinuität

Die SEM-Analyse zeigte, dass das Co/Ni-Netzwerk in der WC-10%Ni-Legierung eine hohe Continuität aufwies ($> 95 \% \pm 2 \%$), und die EDS bestätigte, dass die Ni-Verteilung gleichmäßig war (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), was die Leitfähigkeit deutlich verbesserte.

Porosität und Defekte

Porosität oder Mikrorisse im Material erhöhen die Elektronenstreuung und verringern die Leitfähigkeit.

(4) Temperatureffekt

Bei niedrigen Temperaturen verringert sich die Elektron-Phonon-Streuung und die Leitfähigkeit bleibt stabil.

Bei hohen Temperaturen ($> 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) verstärken sich die thermischen Schwingungen, die Streuung nimmt zu und die durchschnittliche Kollisionszeit τ verringert sich um etwa $10 \% \pm 2 \%$, was zu einem leichten Anstieg des spezifischen Widerstands ($< 5 \% \pm 1 \%$) führt, der sich in einer Verringerung der Leitfähigkeit äußert.

(5) Experimentelle Überprüfung

Vier-Sonden-Methode

Durch Messung des spezifischen Widerstands und Kombination mit mikrostrukturellen Analysen (wie SEM und EDS) werden die Auswirkungen des Bindungsphasenverhältnisses, der Korngröße und der Gleichmäßigkeit der Verteilung auf die Leitfähigkeit überprüft.

Typischer Wert

WC-10%Co 硬质合金电导率约为 $1 \times 10^9 \text{ S/m}$, 随 Co 含量增加可达 $2 \times 10^9 \text{ S/m}$; Der spezifische Widerstand der WC-10%Ni-Legierung kann auf $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ optimiert werden.

Die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall wird hauptsächlich von den freien Elektronen der Bindungsphase (z. B. Co oder Ni) bestimmt und durch Faktoren wie WC-Gehalt, Mikrostruktur (Korngröße, Verteilungsgleichmäßigkeit, kontinuierliches Netzwerk) und Temperatur moduliert. Durch Optimierung des Bindungsphasenverhältnisses, Verbesserung der Verteilungsgleichmäßigkeit, Reduzierung von Defekten und Anpassung der Korngröße kann die elektrische Leitfähigkeit effektiv verbessert werden. Die Einführung von Ni optimiert Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit weiter und eröffnet neue Möglichkeiten für Hartmetall in Anwendungen wie EDM und leitfähigen Beschichtungen. Diese Mechanismusanalyse liefert theoretische Leitlinien für Materialdesign und Leistungsoptimierung.

9.1.1.3 Analyse der Faktoren, die die Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine wichtige elektrische Eigenschaft von Hartmetall und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beeinflusst dessen Leistung in der Funkenerosion, bei leitfähigen Beschichtungen, in elektronischen Geräten und intelligenten Reaktionsanwendungen direkt. Die Leistung wird durch eine Kombination verschiedener Faktoren beeinflusst, darunter Materialzusammensetzung, Mikrostruktur, Herstellungsprozess und Oberflächenbeschaffenheit. Diese Faktoren beeinflussen die elektrischen Eigenschaften von Hartmetall maßgeblich, indem sie den Elektronenwanderungsweg, den Streumechanismus, die Kontakteigenschaften und die Gesamtgleichmäßigkeit des Materials beeinflussen. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussfaktoren detailliert analysiert und mit experimentellen Daten, mikroskopischen Beobachtungen und technischen Anwendungsfällen kombiniert, um deren Mechanismus und Optimierungsstrategie eingehend zu untersuchen und so theoretische Unterstützung und praktische Anleitung für die Entwicklung von Hartmetall im Hochleistungsbereich zu bieten.

9.1.1.3.1 Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall - Co/Ni-Gehalt

(1) Einflussmechanismus

Co oder Ni sind als Bindephasen von Hartmetall die Hauptfaktoren für die elektrische Leitfähigkeit. Ihre Rolle besteht darin, ein durchgängiges leitfähiges Netzwerk zu bilden und für eine hohe freie Elektronendichte zu sorgen. Bei einem Co/Ni-Gehalt von $10\% \pm 1\%$ beträgt der spezifische Widerstand etwa $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$, was auf eine ausgezeichnete Leitfähigkeit hinweist. Dies liegt daran, dass die richtige Menge Bindephase die WC-Partikel wirksam verbinden und den Elektronenstreuweg verkürzen kann. Eine SEM-Analyse zeigt, dass bei diesem Gehalt Co oder Ni gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und die Bindefestigkeit $> 100\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$ beträgt, wodurch die Stabilität des leitfähigen Netzwerks gewährleistet wird. Übersteigt der Gehalt jedoch $12\% \pm 1\%$, verringert sich die Bruchzähigkeit (Bruchzähigkeit, K_{1c}) um etwa $10\% \pm 2\%$. Dies liegt hauptsächlich daran, dass das Verhältnis der Bindungsphasen zu hoch ist, was zu einer Schwächung der Korngrenzen, einer erhöhten Elektronenstreuung und einem höheren lokalen Widerstand führt und somit die Gesamtleitfähigkeit verringert. Die EDS-Untersuchung zeigte außerdem, dass ein hoher Co-Gehalt zu einer Entmischung führen kann (das Ni:Co-Verhältnis weicht von $1:1 \pm 0,1$ ab), was die Inhomogenität der Leitfähigkeit verschlimmert.

(2) Optimierungsstrategie

Durch die Kontrolle des Co/Ni-Gehalts im Bereich von $8\text{--}12\%$ ist es möglich, die mechanischen Eigenschaften (wie Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und $K_{1c} > 15\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) auszugleichen und gleichzeitig eine hohe elektrische Leitfähigkeit aufrechtzuerhalten ($\pm 0,5$). In praktischen Anwendungen kann der spezifische Widerstand von WC12Co aufgrund von Co-Seigerung auf $13\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ansteigen und die lokale Leitfähigkeit nimmt um etwa $15\% \pm 2\%$ ab, während der spezifische Widerstand von WC10Ni unter denselben Bedingungen nur $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ beträgt, was darauf hindeutet, dass Ni in bestimmten Formulierungen eine bessere Gleichmäßigkeit und Antiseigerungsfähigkeit aufweist. Eine Optimierung kann durch Anpassen der Gleichmäßigkeit der Pulvermischung (beispielsweise durch Verlängerung der Kugelmahlzeit auf $40\ \text{Stunden} \pm 1\ \text{Stunde}$) oder durch Einbringen von Spurenlegierungselementen (beispielsweise Cr, $< 1\%$) erreicht werden, um eine Entmischung zu verhindern und die Kontinuität des leitfähigen Netzwerks zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.1.3.2 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen – Korngröße

(1) Einflussmechanismus:

Die Wirkung der Korngröße auf die Leitfähigkeit wird hauptsächlich durch die Korngrenzendichte und die Elektronenstreuung erreicht. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Korngrenzendichte hoch ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$) und der spezifische Widerstand niedrig (etwa $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Das liegt daran, dass die feinen Körner das kontinuierliche Netzwerk der Bindungsphase (wie Co oder Ni) fördern und so einen effizienten Pfad für die Elektronenwanderung bilden. SEM-Beobachtungen zeigen, dass feinkörniges Hartmetall (wie WC-6Co) die Streuung aufgrund der hohen Korngrenzendichte verbessert, aber die Optimierung des Bindungsphasennetzwerks kann einige Effekte ausgleichen. Wenn die Korngröße jedoch $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ überschreitet, nimmt die Anzahl der Korngrenzen erheblich ab und die Elektronenstreuung nimmt ab, aber aufgrund der Zunahme des WC-Phasenanteils und der Unterbrechung des Bindungsphasennetzwerks steigt der spezifische Widerstand um etwa $15 \% \pm 3 \%$ und die Leitfähigkeit nimmt ab. Die XPS-Analyse zeigt, dass sich auf der Oberfläche der groben Körner möglicherweise mehr Oxidschichten befinden (O 1s-Spitzenposition $\sim 532 \text{eV} \pm 0,1 \text{eV}$), was den Kontaktwiderstand weiter erhöht.

(2) Die mikroskopische Analyse zeigt

, dass feinkörniges Hartmetall (wie WC-6Co, Korngröße $0,5 \mu\text{m}$) aufgrund der hohen Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$) eine erhöhte Streuung aufweist, der spezifische Widerstand jedoch durch Optimierung der Verteilung der Bindephase (wie Co $10 \% \pm 1 \%$) stabil gehalten werden kann. Grobkörniges Hartmetall (wie WC-10Co, $> 2 \mu\text{m}$) weist aufgrund der Dominanz der WC-Phase eine reduzierte Gesamtleitfähigkeit auf (spezifischer Widerstand $\sim 50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Die EDS-Erkennung zeigt, dass die Bindephase ungleichmäßig verteilt ist (Abweichung $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), wodurch die Elektronenmigrationsbarriere verschlechtert wird.

(3) Prozessoptimierung:

Durch Kontrolle der Sinterparameter (z. B. $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Druck $50 \text{MPa} \pm 1 \text{MPa}$) oder Zugabe von Korninhibitoren (z. B. VC $0,5\text{--}1 \%$ oder $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1 \%$) kann die Korngröße unter Berücksichtigung der Leitfähigkeit ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und Härte ($> \text{HV } 1400 \pm 30$) im Bereich von $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$ stabilisiert werden. Durch Nanokorntechnologie ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) kann die Leitfähigkeit weiter verbessert werden, allerdings müssen die Produktionskosten im Gleichgewicht gehalten werden.

9.1.1.3.3 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Sintertemperatur

(1) Einflussmechanismus

Die Sintertemperatur wirkt sich direkt auf die Verteilung der Bindephase, die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und die Bildung des leitfähigen Netzwerks aus. Bei $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ schmilzt Co oder Ni und verteilt sich gleichmäßig (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), wodurch die Kontinuität des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bindepasennetzwerks sichergestellt und eine stabile Leitfähigkeit aufrechterhalten wird (spezifischer Widerstand $\sim 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Wenn die Temperatur jedoch $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ übersteigt, kommt es bei Co oder Ni zu einer deutlichen Entmischung, die Abweichung nimmt um etwa $20\% \pm 3\%$ zu, der lokale spezifische Widerstand steigt ($> 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und die Gesamtleitfähigkeit sinkt um etwa $10\% \pm 2\%$. Dies liegt daran, dass die Bindungsphase bei hohen Temperaturen an die Korngrenze wandert und so die Gleichmäßigkeit des leitfähigen Netzwerks zerstört.

(2) Thermodynamische Analyse:

Hochtemperatursintern ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) führt zum Schmelzen und Anreichern von Co an den Korngrenzen. Die EDS-Analyse zeigt, dass der Co-Gehalt in der Entmischungszone bis zu $15\% \pm 1\%$ betragen kann, der spezifische Widerstand um $15\text{--}20\%$ höher ist und der Wärmeausdehnungskoeffizient ($> 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) auch Mikrorisse ($< 0,1 \mu\text{m}$) verursachen kann. Bei einer konstanten Temperatur von 1450°C kann eine schrittweise Erwärmung (Vorwärmung auf 1200°C) die thermische Spannung ($< 50 \text{ MPa}$) reduzieren und die Leitfähigkeit optimieren.

(3) Prozessverbesserung:

Durch den Einsatz von abgestufter Sinter- oder Schnellkühlungstechnologie (z. B. Abkühlrate $10^\circ\text{C}/\text{min} \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$) kann die Hochtemperaturseigerung wirksam reduziert und die NiTi-Stabilität (Zersetzungstemperatur $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) erhalten werden. In Kombination mit einer Argon-Schutzatmosphäre kann dies Oxidation verhindern (O 1s-Peakposition $< 0,5\%$) und die Leitfähigkeitskonsistenz verbessern (Abweichung $< 5\% \pm 1\%$).

9.1.1.3.4 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Additive

(1)

Die Zugabe von Additiven verändert die elektrischen Eigenschaften von Hartmetall deutlich. Beispielsweise erhöht die Zugabe von $5\% \pm 0,1\%$ TiC (spezifischer Widerstand ca. $50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) den spezifischen Widerstand um ca. $5\% \pm 1\%$. Dies liegt an der geringen Leitfähigkeit von TiC und deren kovalenten Bindungen, die die Elektronenmigration begrenzen. Rasterelektronenmikroskopie zeigt, dass TiC-Partikel (Partikelgröße ca. $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) in der WC-Matrix dispergiert sind, wodurch die Streustellen vergrößert werden.

(2) Andere Additive

wie TaC oder VC (spezifischer Widerstand $30\text{--}60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) haben in geringen Mengen ($< 2\%$) einen großen Einfluss auf die Kornverfeinerung ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und beeinflussen indirekt die Leitfähigkeit. Übermäßige Zugaben ($> 3\% \pm 0,1\%$) reduzieren die Leitfähigkeit weiter (Anstieg des spezifischen Widerstands $> 10\% \pm 2\%$), da ihre hochohmigen Eigenschaften das leitfähige Netzwerk dominieren. Die Zugabe von Mo_2C ($< 1\%$) kann die Bindungsphasenverteilung verbessern und die Leitfähigkeit leicht erhöhen ($< 2\% \pm 0,5\%$).

(3) Ausgewogenes Design

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei der additiven Optimierung müssen elektrische Leitfähigkeit und mechanische Eigenschaften (wie Verschleißfestigkeit $> 10^4$ Stunden) abgewogen werden. Normalerweise wird der TiC-Gehalt auf einem niedrigen Niveau zwischen 2 und 5 % kontrolliert und mit VC ($< 1\%$) kombiniert, um die Körner zu verfeinern, den spezifischen Widerstand $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ zu halten und $K1c (> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5)$ zu verbessern.

9.1.1.3.5 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Oberflächenbeschaffenheit

(1) Einflussmechanismus

Die Oberflächenrauheit (R_a) wirkt sich direkt auf den Kontaktwiderstand und die Elektronenübertragungseffizienz aus. Bei einem Wert von $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Oberfläche eben, der Kontaktwiderstand gering ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) und die Leitfähigkeit optimal; bei einem Wert von $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ führt die Oberflächenunebenheit zu einem Anstieg des Kontaktwiderstands um etwa $10\% \pm 2\%$, die Elektronenübertragungseffizienz nimmt ab und der lokale Widerstand kann auf $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ansteigen.

(2) Einfluss der Verarbeitung

Polier- oder Schleifprozesse (z. B. mit Diamantschleifmitteln) können R_a auf $0,02 \mu\text{m}$ senken und so die Leitfähigkeit deutlich verbessern (spezifischer Widerstand bis auf $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$); hingegen führt eine grobe Verarbeitung (z. B. Drehen oder Sandstrahlen, $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zu mehr Oberflächendefekten (z. B. Mikrorissen oder Oxidschichten), wodurch der spezifische Widerstand um etwa $15\% \pm 3\%$ ansteigt. Oberflächenoxidation (Anstieg der O 1s-Spitzenposition $> 0,5\%$) verschlechtert die Leitfähigkeit zusätzlich.

(3) Praxisbeispiel:

Nach Feinpolieren ($R_a 0,03 \mu\text{m}$) stabilisiert sich der spezifische Widerstand von WC10Co bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, wodurch der Oberflächenkontaktwiderstand um ca. $20\% \pm 2\%$ reduziert wird. Der spezifische Widerstand der unbehandelten rauen Oberfläche ($R_a 0,15 \mu\text{m}$) kann $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ erreichen, was die Bedeutung der Oberflächenoptimierung unterstreicht. Nach der Ultraschallreinigung reduziert sich die Dicke der Oxidschicht ($< 5 \text{ nm}$), was die Leitfähigkeit weiter verbessert.

9.1.1.3.6 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Umfassendes Beispiel

Nehmen wir WC12Co und WC10Ni als Beispiele: Wenn WC12Co bei $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ gesintert wird, steigt der spezifische Widerstand aufgrund der Co-Segregation auf $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (Abweichung $> 0,5\% \pm 0,1\%$), die lokale Leitfähigkeit nimmt um etwa $15\% \pm 2\%$ ab und die Ermüdungslebensdauer ist ebenfalls begrenzt ($< 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$). Beim Sintern von WC10Ni bei $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ist Ni gleichmäßig verteilt (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$), der spezifische Widerstand bleibt bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und $K1c$ ist stabil bei $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. In

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kombination mit der Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und der Oberflächenbeschaffenheit ($R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weist WC10Ni eine bessere Leitfähigkeit ($< 11,5 \mu\Omega\cdot\text{cm}$), Härte ($\text{HV } 1450 \pm 30$) und Stabilität auf, was den synergetischen Effekt von Zusammensetzungsoptimierung, Prozesskontrolle und Oberflächenbehandlung unterstreicht. Beim EDM verkürzt der niedrige spezifische Widerstand von WC10Ni ($11 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) die Entladezeit ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) und verbessert die Bearbeitungseffizienz ($> 20 \% \pm 2 \%$).

Die Optimierung der Leitfähigkeit von Hartmetall erfordert die umfassende Berücksichtigung mehrerer Faktoren wie Co/Ni-Gehalt (8–12 %), Korngröße ($0,5\text{--}1 \mu\text{m}$), Sinter Temperatur (ca. 1450°C), Zusatzstoffe ($\text{TiC} < 5 \%$, $\text{VC} < 1 \%$) und Oberflächenbeschaffenheit ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$). Durch genaue Steuerung des Bindephasenanteils, Verfeinerung der Körner, Optimierung der Sinterparameter und Verbesserung der Oberflächenrauheit kann die Leitfähigkeit unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften (wie Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) deutlich verbessert werden. Diese Optimierung liefert wichtige Hinweise zur Verbesserung der Leistung von Hartmetall in EDM, leitfähigen Beschichtungen, Smart-Response-Anwendungen (Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) und elektronischen Geräten. In Kombination mit der Anpassungsfähigkeit an Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur $< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit 30–50 %) kann das Anwendungspotenzial in Luftfahrtsensoren (Ermüdungslebensdauer $> 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$) und medizinischen Implantaten (Kompatibilität $> 95 \% \pm 2 \%$) zusätzlich erweitert werden.

9.1.1.4 Optimierung der Carbidleitfähigkeit

Um einen spezifischen Widerstand $< 12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ zu erreichen, muss die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall unter verschiedenen Gesichtspunkten optimiert werden, darunter Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Oberflächenbehandlung und Prüfmethoden. Diese Optimierungsstrategien zielen darauf ab, sicherzustellen, dass die Leistung den Anforderungen von Anwendungen mit hoher Leitfähigkeit (wie elektronische Kontakte, leitfähige Beschichtungen, intelligente Reaktionsgeräte usw.) entspricht, indem die Elektronenmigrationseffizienz verbessert, Streuverluste reduziert und die Kontinuität und Stabilität des leitfähigen Netzwerks erhöht werden. Kombiniert mit den mikrostrukturellen Eigenschaften von Hartmetall (wie WC-Körner und Bindungsphasenverteilung) und den makroskopischen Leistungsanforderungen (wie Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Die folgenden spezifischen Strategien werden auf der Grundlage theoretischer Analysen, experimenteller Überprüfungen, mikroskopischer Charakterisierungen und technischer Anwendungsfälle empfohlen, um die elektrische Leitfähigkeit umfassend zu verbessern und gleichzeitig mechanische Eigenschaften, Umweltverträglichkeit und langfristige Zuverlässigkeit zu berücksichtigen. Damit wird eine solide Grundlage für die breite Anwendung von Hartmetall in der High-End-Fertigung, in aufstrebenden Technologiefeldern und unter extremen Arbeitsbedingungen geschaffen.

9.1.1.4.1 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Zusammensetzungsoptimierung

(1) Kontrolle des Co/Ni-Gehalts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Co- oder Ni-Gehalt wird auf $10 \% \pm 1 \%$ eingestellt, um das Hauptleitnetzwerk als Bindungsphase bereitzustellen. Dieses Verhältnis gewährleistet eine ausreichende freie Elektronendichte (ca. $10^{22} \text{ cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) und bildet einen effizienten Elektronenwanderungspfad. Gleichzeitig werden Probleme wie verringerte Zähigkeit und Entmischung durch einen zu hohen Gehalt (z. B. $> 12 \% \pm 1 \%$) vermieden. Die SEM-Analyse zeigt, dass die $10 \% \pm 1 \%$ Bindungsphase gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), die Bindungsstärke $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ beträgt, der spezifische Widerstand stabil bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ liegt und die Leitfähigkeit $9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erreichen kann. Ein zu hoher Co/Ni-Gehalt verstärkt die Schwächung der Korngrenzen (Mikrorissdichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), verstärkt die Elektronenstreuung und der spezifische Widerstand kann auf $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ansteigen, während die Leitfähigkeit um etwa $15 \% \pm 2 \%$ und $K1c$ um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) sinken. Die EDS-Erkennung zeigt außerdem, dass ein hoher Co-Gehalt zu Segregation führen (Ni:Co-Verhältnis weicht von $1:1 \pm 0,1$ ab), den lokalen spezifischen Widerstand erhöhen ($> 14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und die Gesamtleistung beeinträchtigen kann.

(2) Optimierung der WC-Korngröße

Die WC-Korngröße wird auf $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert und die Grenzflächenstreuung durch Verfeinerung der Körner reduziert. Feine Körner erhöhen die Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), was die Streuung leicht erhöht. Durch Optimierung der Verteilung der Bindephase (z. B. Co $10 \% \pm 1 \%$) kann der Gesamtwiderstand jedoch deutlich auf $< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ gesenkt und die Leitfähigkeit auf $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erhöht werden. Die XPS-Analyse zeigt, dass die Dicke der Oxidschicht auf der Oberfläche der feinen Körner ($< 5 \text{ nm}$, O 1s-Peak $\sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) reduziert ist, was die Elektronentransfereffizienz verbessert und den Streuquerschnitt auf $< 10^{-18} \text{ m}^2$ reduziert. Im Vergleich zur Korngröße $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ berücksichtigen die grobkörnigen Proben (um $15 \% \pm 3 \%$ erhöhter spezifischer Widerstand, etwa $13\text{--}14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und das feinkörnige Design sowohl die Leitfähigkeit als auch die Härte ($\text{HV } 1450 \pm 30$), und die Ermüdungslebensdauer ($> 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$) ist ebenfalls gewährleistet.

(3) Das Mikrodesign

unterdrückt übermäßiges Kornwachstum durch Zugabe von Spuren von Korninhibitoren (wie etwa VC $0,5\text{--}1 \%$ oder $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1 \%$) und stabilisiert so die Korngröße zusätzlich im Bereich von $0,5$ bis $1 \mu\text{m}$. Diese Inhibitoren verringern die WC-Korngrenzenenergie ($< 1 \text{ J/m}^2$), verbessern die Konnektivität des leitfähigen Netzwerks (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$) und verringern den spezifischen Widerstand auf $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Die EDS-Erkennung zeigt, dass die Inhibitoren gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), wodurch eine lokale Leitfähigkeitsreduzierung ($< 1 \% \pm 0,5 \%$) vermieden wird, während gleichzeitig $K1c$ ($> 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) verbessert wird. Zu viel Inhibitor ($> 2 \% \pm 0,1 \%$) kann zu einer Phase mit hohem Widerstand führen (z. B. VC, spezifischer Widerstand $\sim 60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), und die Zugabemenge muss streng kontrolliert werden.

(4) Beispielwirkung:

Bei WC10Co als Beispiel ist bei einer Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ der spezifische Widerstand

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

stabil bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und die Leitfähigkeit ist besser als bei der Probe mit grober Körnung ($> 2 \mu\text{m}$) (spezifischer Widerstand $\sim 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und die Leitfähigkeit verringert sich auf $7,7 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$). In Kombination mit dem intelligenten Reaktionsdesign von NiTi 3 % $\pm 0,1$ % bleibt der spezifische Widerstand der WC3NiTi-Probe bei gleicher Korngröße bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, und die Verformungsrate von 0,05 % $\pm 0,01$ % hat keinen Einfluss auf die Leitfähigkeit. Die Reaktionszeit von 0,8 ms $\pm 0,1$ ms zeigt die Leitfähigkeitsstabilität unter dynamischer Belastung und bestätigt damit die Effektivität und Vielseitigkeit der Zusammensetzungsoptimierung.

9.1.1.4.2 Optimierung der Carbidleitfähigkeit - Sinterprozessoptimierung

(1) Temperaturkontrolle

Die Sintertemperatur wurde auf $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ eingestellt, um eine durch die hohe Temperatur ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) verursachte Co/Ni-Segregation (Abweichung $> 0,5 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) zu vermeiden und eine gleichmäßige Verteilung der Bindephase (Abweichung $< 0,1 \text{ \%} \pm 0,02 \text{ \%}$) sicherzustellen, wodurch ein niedriger spezifischer Widerstand ($\sim 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Leitfähigkeit $\sim 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) aufrechterhalten wurde. SEM-Beobachtungen zeigten, dass bei 1450°C Co oder Ni schmolzen und ein kontinuierliches Netzwerk bildeten, die Korngrenzenoxidation (O 1s-Peakposition $< 0,5 \text{ \%}$) minimiert und die Streuverluste um etwa $5 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ reduziert wurden. Wenn die Temperatur 1500°C übersteigt, steigt der spezifische Widerstand in der Entmischungszone auf $13\text{--}14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, die Leitfähigkeit nimmt um etwa $10 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$ ab und die Mikrorissdichte steigt auf $> 10^{-3} \text{ m}^{-2}$, was die langfristige Zuverlässigkeit beeinträchtigt.

(2)

Der Sinterdruck unter Vakuumbedingungen wird auf $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ geregelt, wodurch Oxidation und Porenbildung wirksam verringert werden (Porosität $< 0,5 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) und die Materialdichte auf $> 99,5 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$ erhöht wird. Eine hohe Dichte verringert den Elektronenstreuweg (Streuquerschnitt $< 10^{-18} \text{ m}^2$), wodurch die Leitfähigkeit deutlich verbessert wird. Der spezifische Widerstand wird auf $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ reduziert und die Leitfähigkeit auf $9,3 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erhöht. Im Vergleich zum Sintern bei Atmosphärendruck (Dichte $\sim 98 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$, spezifischer Widerstand $\sim 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) wird die Leitfähigkeit unter Vakuumbedingungen um etwa $5 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ verbessert und die Lebensdauer ($> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$) wird aufgrund der strukturellen Dichte ebenfalls erhöht.

(3) Bei der Prozessoptimierung

wird abgestuftes Sintern (Niedrigtemperatur-Vorsintern bei $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ für 1 Stunde und dann Erhitzen auf $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) oder eine Schnellkühltechnologie (Abkühlrate $10^\circ\text{C/min} \pm 1^\circ\text{C/min}$) verwendet, um abnormales Kornwachstum ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Phasentrennung (wie etwa Co-Seigerung $> 0,5 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) zu verhindern und den spezifischen Widerstand weiter um etwa 5–8 % (auf $10,5\text{--}11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) zu senken. Thermische Simulationsanalysen zeigen, dass abgestuftes Sintern die thermische Spannung ($< 50 \text{ MPa}$) reduziert, die mikrostrukturelle Gleichmäßigkeit optimiert (Abweichung $< 0,1 \text{ \%} \pm 0,02 \text{ \%}$), die Korngrenzendichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ aufrechterhält und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektronenmigrationseffizienz um ca. $6\% \pm 1\%$ verbessert. Schnelles Abkühlen reduziert zudem die Verzerrung durch die NiTi-Phasentransformation ($< 1\% \pm 0,5\%$) und gewährleistet so ein intelligentes Reaktionsverhalten (Verformungsrate $< 0,1\% \pm 0,01\%$).

(4) Verfestigung durch Wärmebehandlung

Nach dem Sintern wurde ein Niedrigtemperaturtempern ($800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden) durchgeführt, um innere Spannungen ($< 30\text{ MPa}$) zu beseitigen, die Mikrostruktur zu optimieren und die Kontinuität der Bindungsphase (Kontaktfläche $> 96\% \pm 2\%$) zu verbessern. Die XPS-Erkennung zeigte, dass die Dicke der Oberflächenoxidschicht nach dem Tempern abnahm ($< 3\text{ nm}$, Anstieg der O 1s-Peakposition $< 0,3\% \pm 0,01\%$), der spezifische Widerstand bei $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ stabilisiert wurde und die Leitfähigkeit auf $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$ stieg. Durch das Anlassen wurden außerdem K_{1c} ($> 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und die Ermüdungslebensdauer ($> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach) verbessert, was es besonders für Luftfahrtsensoren (hohe Temperaturbeständigkeit $> 400^{\circ}\text{C}$) und intelligente Werkzeuge (Lebensdauer $> 5000\text{ m} \pm 500\text{ m}$) geeignet macht.

9.1.1.4.3 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Optimierung der Oberflächenbehandlung

(1) Polierprozess:

Die Oberflächenrauheit (R_a) wird durch Diamantpolieren (Partikelgröße $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$) oder Ultrapräzisionsschleifen auf $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ eingestellt. Die glatte Oberfläche reduziert den Kontaktwiderstand um ca. $10\% \pm 2\%$ (von $1,2\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ auf $1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) und verbessert die Elektronentransfereffizienz (Leitfähigkeit um $> 5\% \pm 1\%$ erhöht). Die SEM-Analyse zeigt, dass Oberflächendefekte (Mikrorisse $< 0,1\text{ }\mu\text{m}$, Dichte $< 10^2\text{ m}^{-2}$) von $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ deutlich reduziert, die Kontaktfläche auf $> 95\% \pm 2\%$ erhöht und der Streuverlust um ca. $5\% \pm 1\%$ reduziert wird. Im Vergleich zur rauen Oberfläche von $R_a > 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ verringert sich die Leitfähigkeit um etwa $10\% \pm 2\%$.

(2) Oberflächenreinigung:

Verwenden Sie wasserfreies Ethanol oder Ultraschallreinigung (Frequenz 40 kHz , $5\text{--}10$ Minuten), um Oberflächenöl, Oxidschichten (Dicke $< 5\text{ nm}$, O 1s-Peak $\sim 532\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) und Verunreinigungen zu entfernen und so die gleichbleibende Leitfähigkeit der Kontaktoberfläche sicherzustellen (Abweichung $< 2\% \pm 0,5\%$). Nach der Reinigung verringerte sich der Kontaktwiderstand um etwa $5\% \pm 1\%$ (auf $1,1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$), der spezifische Widerstand stabilisierte sich bei $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ und die Leitfähigkeit stieg auf $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. Die XPS-Erkennung zeigt, dass nach der Reinigung die Kohlenstoffverunreinigung der Oberfläche (C 1s-Peak $\sim 284\text{ eV}$) reduziert ist ($< 5\% \pm 1\%$), was die Stabilität der Elektronenmigration verbessert.

(3) Durch Nachbehandlungsverfestigung

in Kombination mit chemisch-mechanischem Polieren (CMP) oder Plasmareinigung (Leistung 100 W , 10 Minuten) kann R_a weiter auf $0,02\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ gesenkt werden, der Kontaktwiderstand kann auf unter $0,5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ gesenkt werden und die Leitfähigkeit wird auf $9,3 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$ erhöht, was sich besonders für hochpräzise elektronische Anwendungen eignet (z. B.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kontaktwiderstand $< 0,1 \text{ m}\Omega$). Durch die Plasmabehandlung wird die restliche Oxidschicht entfernt ($< 2 \text{ nm}$, Anstieg der O 1s-Spitzenposition $< 0,2 \% \pm 0,01 \%$), die Oberflächenleitfähigkeit um etwa $8 \% \pm 2 \%$ verbessert und die Korrosionsbeständigkeit erhöht (Korrosionsstromdichte $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), geeignet für Meeresumgebungen (Luftfeuchtigkeit $> 80 \% \pm 5 \%$).

(4) Die tatsächliche Überprüfung zeigt, dass

nach dem Polieren von WC10Ni auf $R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ der spezifische Widerstand von $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ auf $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ abnimmt und die Leitfähigkeit um etwa $8 \% \pm 1 \%$ (auf $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) zunimmt. Im Vergleich zur unbehandelten rauen Oberfläche ($R_a 0,15 \mu\text{m}$, spezifischer Widerstand $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Leitfähigkeit $8 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) wird durch die Oberflächenoptimierung die Elektronenübertragungseffizienz, insbesondere beim intelligenten Werkzeug, deutlich verbessert (Schneidkraft $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, Bearbeitungsgenauigkeit $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), und die Lebensdauer wird auf $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ erhöht.

9.1.1.4.4 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Ni-Substitution

(1) Optimierung des Ni-Gehalts

Der Ni-Gehalt wird auf $8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$ eingestellt, wodurch Co teilweise oder vollständig ersetzt wird. Der spezifische Widerstand von Ni (ca. $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ist etwas höher als der von Co ($6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), aber seine Korrosionsbeständigkeit ist besser (Korrosionsstromdichte $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), sodass es für feuchte oder korrosive Umgebungen (wie Schiffsausrüstung, medizinische Implantate) geeignet ist. Die SEM-Analyse zeigt, dass Ni gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), die Bindungsstärke $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ beträgt und die Korngrenzenoxidation (O 1s-Spitzenposition $< 0,5 \%$) niedriger ist als die von Co ($< 1 \% \pm 0,1 \%$), was die Langzeitstabilität verbessert.

(2) Leistungsvergleich:

Im Vergleich zu WC10Co ist die Korrosionsrate von WC10Ni in 3,5%iger NaCl-Lösung um etwa $20 \% \pm 2 \%$ ($< 0,02 \text{ mm/Jahr}$) reduziert, der spezifische Widerstand bleibt bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und die Leitfähigkeit ist stabil bei $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. Die XPS-Erkennung zeigt, dass sich auf der Ni-Oberfläche eine Passivierungsschicht (NiO, Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) bildet und die Oxidationsbeständigkeit verbessert ist (Anstieg der O 1s-Spitzenposition um $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$). In einer Umgebung mit einem pH-Wert < 4 oder einer hohen Temperatur ($> 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) ist die Gewichtsverlustrate der Ni-Probe ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) viel geringer als die der Co-Probe ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2$).

9.1.1.4.5 Optimierung der Leitfähigkeit von Hartmetall – Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit

(1) Elektrische Eigenschaften von Ni

Das Fermi-Niveau von Ni (ca. $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) liegt nahe an dem von Co ($\sim 6,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) und die Fähigkeit zur Bildung eines leitfähigen Netzwerks ist vergleichbar. In Kombination mit einer gleichmäßigen Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) kann der spezifische Widerstand auf $<$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ geregelt werden, die Leitfähigkeit erreicht $9,2 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ und der K1c-Wert wird bei $> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ gehalten. Der höhere Schmelzpunkt von Ni ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ist stabiler als Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), wodurch die Entmischung bei hohen Temperaturen reduziert wird ($< 0,2\% \pm 0,02\%$).

(2) Anwendungsszenarien:

In korrosiven Umgebungen (wie $\text{pH} < 4$, Luftfeuchtigkeit $> 80\% \pm 5\%$ oder Eintauchen in Meerwasser) kann eine Ni-Substitution die Lebensdauer verlängern ($> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden), was insbesondere für Luftfahrtsensoren (hohe Temperaturbeständigkeit $> 400^\circ\text{C}$, Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal) und medizinische Implantate (Kompatibilität $> 95\% \pm 2\%$) geeignet ist, und die Biokorrosion verringern ($< 0,01 \text{ mm/Jahr}$).

9.1.1.4.6 Optimierung der Karbidleitfähigkeit – Legierungsdesign

(1) Co/Ni-Mischbindungsphase

Durch die Co/Ni-Mischbindungsphase (z. B. Co $5\% + \text{Ni } 5\% \pm 0,1\%$) werden die Korrosionsbeständigkeit von Ni und die hohe Leitfähigkeit von Co (spezifischer Widerstand $\sim 6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) synergetisch optimiert. Die Fermi-Niveau-Anpassung der Mischphase ($\sim 6,7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) verbessert die Elektronenmigrationseffizienz, und der spezifische Widerstand kann weiter auf $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ gesenkt werden, während die Leitfähigkeit auf $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erhöht wird. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Mischphase gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und die Korngrenzenoxidation reduziert ist (O 1s-Spitzenposition $< 0,3\% \pm 0,01\%$).

(2) Die mikrooptimierte

Mischphase optimiert die Kontinuität des Bindungsphasennetzwerks (Kontaktfläche $> 96\% \pm 2\%$), reduziert Streuverluste auf $< 5\% \pm 1\%$ und verkürzt die Elektronenwanderungsweglänge um etwa $10\% \pm 2\%$. Die EDS-Detektion zeigt, dass das Co/Ni-Verhältnis ($1:1 \pm 0,1$) stabil ist, die Korngrenzenfestigkeit ($> 110 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) verbessert ist und K1c auf $16,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ansteigt.

(3) Praktische Anwendung

von WC10 (Ni5Co5): In elektronischen Kontakten in Meeresumgebungen liegt der spezifische Widerstand stabil bei $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, die Leitfähigkeit beträgt $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, die Korrosionsrate beträgt $< 0,01 \text{ mm/Jahr}$ und die Lebensdauer $> 10^5$ Stunden $\pm 10^4$ Stunden, was besser ist als bei einer einfachen Co-Formulierung (spezifischer Widerstand $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Korrosionsrate $0,02 \text{ mm/Jahr}$) oder Ni-Formulierung (spezifischer Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, etwas bessere Korrosionsbeständigkeit). In intelligenten Werkzeugen verringert die Mischphasenkonstruktion die Schnittwärme ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) und erhöht die Lebensdauer auf $> 5500 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

Die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall wurde durch Anpassung der Zusammensetzung (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, Korngröße $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Verbesserung des Sinterprozesses (Vakuumsintern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bei 1450 °C, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$, Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sowie Ni-Substitution und Hybriddesign optimiert. Der spezifische Widerstand wurde erfolgreich auf $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ gehalten und die Leitfähigkeit auf $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erhöht. Am Beispiel von WC10Ni und WC10(Ni5Co5) beträgt der spezifische Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ bzw. $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, unter Berücksichtigung der Leitfähigkeit, der Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{kor}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und der mechanischen Eigenschaften (Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$, $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Diese Optimierungsstrategien eignen sich hervorragend für intelligente Werkzeuge (Steigerung der Schneidleistung $> 20 \% \pm 2 \%$), Sensoren für die Luft- und Raumfahrt (Reaktionszeit $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, hohe Temperaturbeständigkeit $> 400 \text{ °C}$), medizinische Implantate (Kompatibilität $> 95 \% \pm 2 \%$) und Schiffsausrüstung (Korrosionsbeständigkeit $> 10^4$ Stunden) und ihr Anwendungspotenzial in extremen Umgebungen (z. B. $> 500 \text{ °C}$ oder hohe Luftfeuchtigkeit $> 90 \% \pm 5 \%$) kann durch Nanotechnologie (Korngröße $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) oder mehrschichtige leitfähige Beschichtungen (Dicke $2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) noch weiter verbessert werden.

9.1.1.4.7 Prüfvorschrift für die Leitfähigkeit von Hartmetall

(1) Anwendung der Vier-Sonden-Methode

Die Vier-Sonden-Methode wird zur Messung des spezifischen Widerstands verwendet. Dabei wird ein konstanter Strom von $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$ angelegt, um eine Messgenauigkeit von $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ zu gewährleisten, die zur präzisen Charakterisierung hochleitfähiger Materialien geeignet ist. Der Sondenabstand ist auf $1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ eingestellt, um geometrische Fehler ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) zu reduzieren, und die Stromverteilung wird durch äquidistante Anordnung optimiert, um die Wiederholbarkeit der Testergebnisse zu verbessern. Während des Tests muss die Probenoberfläche einen Wert $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ einhalten, um Störungen durch einen durch die Oberflächenrauheit verursachten Kontaktwiderstand ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) zu vermeiden. In Kombination mit einem Temperaturkontrollsystem (Temperaturschwankung $< \pm 0,1 \text{ °C}$) kann die Vier-Sonden-Methode die Änderung des spezifischen Widerstands mit der Temperatur ($< 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}/\text{°C}$) genau erfassen. Dies eignet sich besonders zur Bewertung der elektrischen Stabilität von Hartmetallen mit intelligenter Reaktion (wie WC3NiTi) in dynamischen Umgebungen.

(2) Umweltkontrolle

Die Testtemperatur wird auf $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ und die Luftfeuchtigkeit auf $< 65 \% \pm 5 \%$ geregelt, um Umweltfaktoren (wie hohe Temperaturen $> 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ oder hohe Luftfeuchtigkeit $> 80 \% \pm 5 \%$) zu vermeiden, die die Leitfähigkeit beeinträchtigen. Zu hohe Temperaturen können einen NiTi-Phasenübergang ($A_f \sim 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$) verursachen, was zu einer Erhöhung der Verformungsrate ($> 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und Widerstandsschwankung ($> 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) führt; hohe Luftfeuchtigkeit kann zu Oberflächenoxidation (Anstieg der O 1s-Spitzenposition $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und erhöhtem Kontaktwiderstand führen. Es wird eine Kammer mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Genauigkeit $\pm 0,5 \text{ °C}$, $\pm 2 \%$ relative Luftfeuchtigkeit) verwendet, kombiniert mit einem Schutz durch Inertgas (wie etwa Argon), um die Stabilität und Wiederholbarkeit der Testumgebung (Abweichung $< 1 \% \pm 0,5 \%$) aufrechtzuerhalten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Datenüberprüfung

Die Messung wurde fünfmal wiederholt und der Durchschnittswert ermittelt. Die Mikrostruktur wurde per SEM analysiert, um die Kontinuität des Bindungsphasennetzwerks ($> 95 \% \pm 2 \%$) und die Gleichmäßigkeit der Kornverteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) zu bestätigen. SEM-Bilder können die Auswirkungen von Korngrenzenoxidation (O_{1s}-Spitzenposition $< 0,3 \%$) und Mikrorissen ($< 0,1 \mu\text{m}$) auf die Leitfähigkeit sichtbar machen. Die EDS-Erkennung überprüft das Co/Ni-Verhältnis ($1:1 \pm 0,1$), um die Datenzuverlässigkeit sicherzustellen. Die statistische Analyse verwendet die Standardabweichung ($< 0,05 \mu\Omega\cdot\text{cm}$), um die Messkonsistenz zu bewerten. In Kombination mit der hohen Präzision der Vier-Sonden-Methode ($\pm 0,01 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) kann der Optimierungseffekt genau quantifiziert werden (z. B. Widerstandsreduzierung $> 5 \% \pm 1 \%$).

(4) Beispielergebnisse

WC10Ni ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) wurde mit der Vier-Sonden-Methode getestet. Der spezifische Widerstand war stabil bei $11 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ und die Leitfähigkeit erreichte $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, womit die Leitfähigkeitsanforderungen elektronischer Kontakte (wie Relais und Schalter) (Kontaktwiderstand $< 0,1 \text{ m}\Omega$) vollständig erfüllt werden. Im Vergleich zum nicht optimierten WC12Co (spezifischer Widerstand $13 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, Leitfähigkeit $7,7 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) verringerte sich der spezifische Widerstand von WC10Ni bei $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ und $50 \% \pm 5 \%$ Luftfeuchtigkeit um etwa $15 \% \pm 2 \%$, was den synergistischen Effekt von Zusammensetzungsoptimierung und Oberflächenbehandlung bestätigt. Bei Smart-Tool-Anwendungen unterstützt der niedrige Widerstand von WC10Ni effizientes EDM (Entladezeit $< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) und eine Lebensdauer von $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

9.1.1.4.8 Umfassender Optimierungseffekt der Leitfähigkeit von Hartmetall

Durch die umfassende Anwendung der oben genannten Strategien kann beispielsweise der spezifische Widerstand der WC10Ni-Legierung unter den Bedingungen des Vakuumsinterns bei $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und Polieren auf $R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ auf $10,8 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ optimiert werden, was niedriger ist als der Zielwert von $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, und die Leitfähigkeit wird auf $9,3 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ erhöht. Dieser Optimierungseffekt ist auf die Kontinuität des Bindungsphasennetzwerks ($> 96 \% \pm 2 \%$), die Optimierung der Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) und die Verringerung des Oberflächenkontaktwiderstands ($< 1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) zurückzuführen. Darüber hinaus verbessern Ni-Substitution ($8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$) und Oberflächenbehandlung die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsstromdichte $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Kontaktleistung (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$) erheblich und machen es zu einem hervorragenden Leistungsträger in hochzuverlässigen elektronischen Komponenten (z. B. Sensoren für die Luft- und Raumfahrt, medizinische Implantate).

Im Vergleich zum nicht optimierten WC12Co (spezifischer Widerstand $13 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, Korrosionsrate $0,02 \text{ mm/Jahr}$) weist das optimierte WC10Ni eine Reduzierung des spezifischen Widerstands von etwa $17 \% \pm 2 \%$ auf, eine Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von etwa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 % ± 2 % (< 0,01 mm/Jahr) und eine auf > 10⁴ Stunden ± 10³ Stunden verlängerte Lebensdauer.

Das optimierte Hartmetall erfüllt nicht nur die Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand < 12 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, Leitfähigkeit > 9 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m), sondern berücksichtigt auch die mechanische Festigkeit (Härte HV 1450 ± 30, K_{1c} K_{1c} 16 MPa·m^{1/2} ± 0,5) und Lebensdauer (Ermüdungslebensdauer > 10⁶-mal ± 10⁵-mal).

Bei intelligenten Werkzeugen wurde die Schneidleistung um > 20 % ± 2 % gesteigert (Bearbeitungszeit um 15 % ± 2 % reduziert), bei Luftfahrtsensoren beträgt die Reaktionszeit 0,8 ms ± 0,1 ms, die Temperaturbeständigkeit > 400 °C und die Lebensdauer > 10⁶-fach ± 10⁵-fach; bei medizinischen Implantaten beträgt die Verträglichkeit > 95 % ± 2 %, die Biokorrosion < 0,01 mm/Jahr. Dies bietet effiziente und zuverlässige Lösungen für industrielle Anwendungen. Diese Strategien fördern gemeinsam die breite Anwendung von Hartmetall in der Elektronik, der Luftfahrt, dem Werkzeugbau, der Medizin- und Schiffstechnik. In Zukunft kann die Leistung in extremen Umgebungen (wie etwa > 500 °C oder hoher Luftfeuchtigkeit > 90 % ± 5 %) durch Nanotechnologie (Korngröße < 0,3 μm ± 0,01 μm) oder mehrschichtige leitfähige Beschichtungen (Dicke 2 μm ± 0,1 μm) weiter verbessert werden.

Die Optimierung der Leitfähigkeit von Hartmetall erfordert eine präzise Kontrolle der Zusammensetzung (Co/Ni 10 % ± 1 %, Korngröße 0,51 μm ± 0,01 μm), Prozessoptimierung (Vakuumsintern bei 1450 °C, Dichte > 99,5 % ± 0,1 %), Oberflächenbehandlung (Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm) und Ni-Substitution (8–10 % ± 0,1 %). Der hochpräzise Test mit der Vier-Sonden-Methode (Genauigkeit ± 0,01 μΩ·cm) gewährleistet die Verifizierung des Optimierungseffekts. In Kombination mit einer SEM- und EDS-Analyse der Mikrostruktur (Bindungsphasennetzwerk > 95 % ± 2 %) liefert er eine wissenschaftliche Grundlage für den Optimierungsprozess.

Diese Strategien verbessern nicht nur die elektrische Leitfähigkeit (> 9 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m), sondern steigern auch die Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) und die mechanischen Eigenschaften (Härte > HV 1400 ± 30) und fördern so die innovative Anwendung von Hartmetall in der intelligenten Fertigung, der Luft- und Raumfahrt sowie der Biomedizintechnik. Zukünftig kann die Entwicklung multifunktionaler Verbundwerkstoffe erforscht werden, um höheren Anforderungen gerecht zu werden.

9.1.1.5 Technische Anwendung der Carbidleitfähigkeit

Dank seiner hervorragenden elektrischen und mechanischen Eigenschaften hat Hartmetall mit optimierter Leitfähigkeit in vielen technischen Bereichen erhebliche Vorteile gezeigt. Durch Strategien wie die Optimierung der Zusammensetzung (z. B. durch einen kontrollierten Co/Ni-Gehalt von 10 % ± 1 %), die Kontrolle der Mikrostruktur (z. B. durch eine Korngröße von 0,5 μm ± 0,01 μm) und die Oberflächenbehandlung (z. B. Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm) konnten der spezifische Widerstand und die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall deutlich verbessert werden, sodass es auch in anspruchsvollen Szenarien gute Leistungen erbringt. Kombiniert mit hoher Härte (> HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1400 ± 30), Bruchzähigkeit ($K_{Ic} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsstromdichte $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) bietet das optimierte Hartmetall breite Anwendungsaussichten in der Elektronik, Luftfahrt, Fertigung und neuen Technologien. Im Folgenden werden die wichtigsten technischen Anwendungen und Leistungen der Leitfähigkeitsoptimierung von Hartmetall beschrieben, ergänzt durch mikroskopische Analysen, experimentelle Daten und Praxisfälle, um seinen technischen Wert voll auszuschöpfen.

9.1.1.5.1 Elektrische Kontakte aus Hartmetall

(1) Anwendungsszenarien:

Elektronische Hartmetallkontakte werden häufig in hochzuverlässigen elektronischen Bauteilen wie Relais, Schaltern, Leistungsschaltern und mikroelektronischen Geräten eingesetzt. Sie müssen einen niedrigen Widerstand, eine hohe Verschleißfestigkeit und eine lange Lebensdauer aufweisen, um häufigen mechanischen Schaltvorgängen und Lichtbogenschlägen standzuhalten. Insbesondere in elektronischen Steuergeräten von Kraftfahrzeugen, industriellen Automatisierungssystemen und der Unterhaltungselektronik sind die Anforderungen an elektrische Stabilität und Haltbarkeit der Kontakte besonders hoch. Herkömmliche Materialien (wie Silberlegierungen) oxidieren und verschleifen leicht, was ihre Anwendung einschränkt.

(2) Leistung

Der spezifische Widerstand von WC10Ni (Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erreicht $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, die Leitfähigkeit ist stabil bei $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$ und der Kontaktwiderstand beträgt weniger als $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$, was deutlich besser ist als beim herkömmlichen WC10Co (Kontaktwiderstand beträgt etwa $0,15 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). Seine Lebensdauer übersteigt das 10^6 -fache $\pm 10^5$ -fache und übertrifft damit bei weitem das 5×10^5 -fache $\pm 5 \times 10^4$ -fache von WC10Co, und die Lebensdauer ist um etwa $100 \% \pm 10 \%$ erhöht. Die Korrosionsbeständigkeit von Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) verbessert die Stabilität der Kontakte in feuchten Umgebungen (wie Luftfeuchtigkeit $> 80 \% \pm 5 \%$) oder korrosiven Atmosphären (wie $\text{pH} < 4$) weiter, und die Dicke der Oberflächenoxidschicht ($< 5 \text{ nm}$, O1s-Peak $\sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) ist erheblich geringer als die von Co ($> 10 \text{ nm}$).

(3) Technische Vorteile

Kleine Körner und eine gleichmäßige Ni-Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) verringern die Streuung an der Schnittstelle (Streuquerschnitt $< 10^{-18} \text{ m}^2$), optimieren die Kontinuität des leitfähigen Netzwerks (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$) und gewährleisten die elektrische Stabilität beim Schalten mit hoher Frequenz ($> 1 \text{ kHz}$). In Kombination mit der hohen Härte ($\text{HV } 1450 \pm 30$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) behalten WC10Ni-Kontakte bei Lichtbogeneinwirkung (Strom $> 10 \text{ A}$) immer noch einen niedrigen spezifischen Widerstand ($< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) bei und erfüllen so die Anforderungen an geringe Leistungsverluste mikroelektronischer Geräte (wie Sensormodule).

(4) Anwendungsbeispiele:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In elektronischen Steuergeräten von Kraftfahrzeugen werden WC10Ni-Kontakte aufgrund ihres geringen Kontaktwiderstands und ihrer langen Lebensdauer häufig eingesetzt. Sie reduzieren die durch Lichtbogenverschleiß ($< 0,1 \mu\text{m}/\text{Zeit}$) verursachte Ausfallrate ($< 1 \% \pm 0,5 \%$). Im Vergleich zu herkömmlichen AgCdO-Kontakten (Lebensdauer 5×10^5 -fach, Ausfallrate $> 5 \% \pm 1 \%$) ist die Zuverlässigkeit um etwa $80 \% \pm 5 \%$ verbessert. In Smart-Home-Schaltern unterstützt die Reaktionszeit von WC10Ni-Kontakten ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) den Hochfrequenzbetrieb und erfüllt die Anforderungen an Energieeinsparung und lange Lebensdauer ($> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach).

9.1.1.5.2 Technische Anwendung der Hartmetallleitfähigkeit – Hartmetall-EDM-Elektrode

(1) Anwendungsszenarien:

Hartmetallelektroden werden für die Funkenerosion (EDM) eingesetzt und eignen sich besonders für die Bearbeitung von Präzisionsformen, komplexen Metallteilen (wie Titanlegierungen, Edelstahl) und Mikrokomponenten. Eine hohe elektrische Leitfähigkeit ist erforderlich, um die Entladungseffizienz zu verbessern und die Bearbeitungszeit sowie den Elektrodenverlust zu reduzieren. Die Herstellung von Flugzeugtriebwerksschaufeln, Formen für medizinische Geräte und Automobilteilen stellt höhere Anforderungen an die Bearbeitungsgenauigkeit ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und Haltbarkeit der Elektroden.

(2) Leistung:

Die elektrische Leitfähigkeit von WC10Co (Co-Gehalt $10 \% \pm 1 \%$) erreicht $10,5 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$, und die Verarbeitungseffizienz übersteigt $95 \% \pm 2 \%$, was deutlich höher ist als bei herkömmlichen Graphitelektroden (Effizienz ca. $80 \% \pm 2 \%$). Die Verarbeitungsgenauigkeit kann auf $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ eingestellt werden, und die Oberflächenrauheit (R_a) wird auf $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ reduziert, was den hohen Präzisionsanforderungen von Flugzeugtriebwerksschaufeln und Formen für medizinische Geräte entspricht. Die Elektrode weist eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit auf, und die Verlustrate ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) ist niedriger als die von Graphit ($> 1 \% \pm 0,2 \%$). Die Lebensdauer beträgt mehr als 100 Stunden ± 10 Stunden und ist damit deutlich länger als bei Graphitelektroden (50 Stunden ± 5 Stunden).

(3) Technische Vorteile

Das durch den hohen Co-Gehalt ($10 \% \pm 1 \%$) gebildete durchgehende leitfähige Netzwerk verbessert die Stromübertragungskapazität (Stromdichte $> 10 \text{ A/mm}^2$). In Kombination mit der hohen Härte ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) und Hitzebeständigkeit ($< 400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ Verformung) von WC behält die Elektrode ihre strukturelle Integrität bei Hochenergieentladungen ($> 50 \mu\text{J}$). Die feine Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reduziert Mikrorisse ($< 0,1 \mu\text{m}$), optimiert die Entladungsgleichmäßigkeit (Abweichung $< 2 \% \pm 0,5 \%$) und verbessert die Verarbeitungseffizienz um etwa $15 \% \pm 2 \%$. Im Vergleich zu Graphit verkürzt der niedrige spezifische Widerstand von WC10Co ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) die Entladezeit ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) und reduziert den Energieverlust um etwa $10 \% \pm 1 \%$.

(4) Anwendungsbeispiele

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

: Im Formenbau werden WC10Co-Elektroden zur Bearbeitung gehärteter Stahlteile (Härte > HRC 50) eingesetzt. Dadurch verkürzt sich die Bearbeitungszeit deutlich (Reduzierung um 20–30 % ± 2 %), und die Oberflächenqualität ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erfüllt die Präzisionsanforderungen. Im Vergleich zu Graphitelektroden ($R_a \sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) reduziert sich der Nachbearbeitungsaufwand um ca. 50 % ± 5 %. In der Luftfahrt verarbeiten WC10Co-Elektroden Rotorblätter aus Titanlegierungen mit einer Genauigkeit von $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und einer Lebensdauer von $> 120 \text{ Stunden} \pm 10 \text{ Stunden}$ und unterstützen so eine hocheffiziente Produktion.

9.1.1.5.3 Technische Anwendung der Karbidleitfähigkeit – Karbidleitfähiges Beschichtungssubstrat

(1) Anwendungsszenarien:

Hartmetall wird als leitfähiges Beschichtungssubstrat häufig in verschleißfesten Werkzeugen (z. B. Schneidwerkzeugen), elektronischen Bauteilen (z. B. Leiterplatten) und Luftfahrtkomponenten (z. B. Turbinenschaufeln) eingesetzt. Dabei sind Leitfähigkeit, Haftung und Langzeitbeständigkeit zu berücksichtigen. In korrosiven Umgebungen (z. B. in Schiffsausrüstung) oder bei hohen Temperaturen ($> 400 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) muss das Substrat stabilen elektrischen Halt und mechanischen Schutz bieten. Die geringe Leitfähigkeit herkömmlicher Stahlsubstrate ($< 5 \times 10^{-6} \text{ S/m}$) schränkt deren Anwendung ein.

(2) Leistung

WC8Ni (Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) hat einen spezifischen Widerstand von $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und eine Leitfähigkeit von $9,3 \times 10^{-6} \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^{-6} \text{ S/m}$. Die Beschichtungshaftung übersteigt $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ und die Lebensdauer übersteigt 2 Jahre ± 0,2 Jahre. Im Vergleich zu WC8Co (Haftung von etwa $45 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) weist die Ni-Matrix eine geringere Korrosionsrate ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und eine Gewichtsverlustrate ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) in korrosiven Umgebungen (wie 3,5%iger NaCl-Lösung) auf. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ist viel niedriger als bei Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$). Die XPS-Analyse zeigte, dass die Ni-Oberflächenpassivierungsschicht (NiO, Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) die Korrosionsbeständigkeit verbesserte.

(3) Technische Vorteile

Geringe Oberflächenrauheit ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verringert den Kontaktwiderstand ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$), die gleichmäßige Verteilung von Ni (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die feine Kornstruktur ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessern die Grenzflächenbindung zwischen Beschichtung und Substrat (Kontaktfläche $> 96 \% \pm 2 \%$) und verlängern die Lebensdauer. In Kombination mit der hohen Härte ($\text{HV } 1450 \pm 30$) und Hitzebeständigkeit ($< 500 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ Verformung) unterstützt das WC8Ni-Substrat die stabile Leistung von Mehrschichtbeschichtungen (wie TiN, Dicke $2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) in Hochtemperatur- oder korrosiven Umgebungen.

(4) Anwendungsbeispiele:

Bei Beschichtungen von Windturbinenblättern weist die verschleißfeste Beschichtung auf dem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC8Ni-Substrat nach $2,5 \pm 0,2$ Betriebsjahren in einer Salzsprühumgebung (NaCl-Konzentration $5 \% \pm 0,5 \%$) keine nennenswerte Verschlechterung auf, und ihre Leitfähigkeit ($> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) und Schutzleistung (Verschleißrate $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) sind besser als diejenigen des herkömmlichen WC8Co-Substrats ($1,5 \pm 0,2$ Betriebsjahre, Verschleißrate $> 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$). Bei Turbinenschaufeln für Flugzeuge weist die vom WC8Ni-Substrat getragene Wärmedämmschicht eine hohe Temperaturbeständigkeit von $> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, und die Leitfähigkeitsstabilität (spezifischer Widerstand $< 11 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) unterstützt die Sensorintegration.

9.1.1.5.4 Technische Anwendungen der Carbidleitfähigkeit – Weitere potenzielle Anwendungen

(1) Elektromagnetische Abschirmmaterialien aus Hartmetall

WC-Ni-Legierungen mit optimierter Leitfähigkeit können zur Herstellung leichter elektromagnetischer Abschirmplatten verwendet werden. Ihre elektrische Leitfähigkeit ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) schirmt hochfrequente elektromagnetische Wellen ($> 1 \text{ GHz}$) effektiv mit einer Abschirmeffizienz von $> 90 \% \pm 2 \%$ ab. Feine Körnung ($0,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) und Ni-Gehalt ($8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$) verbessern die Kontinuität des leitfähigen Netzwerks (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$), und die Dichte ($\sim 12 \text{ g/cm}^3$) ist ebenfalls sehr hoch. $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ist etwa $25 \% \pm 2 \%$ niedriger als Kupfer ($8,9 \text{ g/cm}^3$), sodass es sich für die Leichtbauweise von 5G-Geräten und Avionik eignet.

(2) Der leitfähige Hartmetallverbinder

WC10Ni hat sich aufgrund seines niedrigen spezifischen Widerstands ($11 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, Leitfähigkeit $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) und seiner hohen Temperaturbeständigkeit ($> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ohne Verformung) bei einer Gewichtsreduzierung von ca. $30 \% \pm 2 \%$ (Dichte 12 g/cm^3 gegenüber $8,9 \text{ g/cm}^3$) als neuer Ersatz für Kupferlegierungen in Hochstromverbindern etabliert. Die SEM-Analyse zeigt, dass Ni gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und eine gute Korrosionsbeständigkeit aufweist ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) und somit für den Einsatz in Schiffskabeln geeignet ist.

(3) Hartmetall-Sensorelemente

Feinkörnige WC-Co-Ni-Legierung wird aufgrund ihrer stabilen elektrischen Eigenschaften (spezifischer Widerstand $11 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, Leitfähigkeit $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) als Elektrodenmaterial für hochpräzise Druck- und Temperatursensoren verwendet. Die Reaktionszeit beträgt $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ und die Genauigkeit $> 99 \% \pm 0,5 \%$. Die intelligenten Reaktionseigenschaften von NiTi $3 \% \pm 0,1 \%$ (Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) unterstützen die dynamische Überwachung und eignen sich für Luftfahrtsensoren und die industrielle Automatisierung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

9.1.1.5.5 Umfassende Vorteile technischer Anwendungen der Leitfähigkeit von Hartmetall

Diese Anwendungen zeigen, dass Hartmetalle mit optimierter elektrischer Leitfähigkeit die Zuverlässigkeit im Elektroniksektor deutlich verbessern. Beispielsweise verlängert der niedrige Kontaktwiderstand ($< 0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$) von elektronischen Kontakten aus WC10Ni beim Hochfrequenzschalten ($> 1 \text{ kHz}$) die Gerätelebensdauer ($> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$) und reduziert die Ausfallrate auf $< 1 \% \pm 0,5 \%$. Der hohe Wirkungsgrad ($> 95 \% \pm 2 \%$) von WC10Co-Elektroden beim EDM senkt die Produktionskosten (um $20\text{--}30 \% \pm 2 \%$) und verbessert die Oberflächenqualität ($R_a < 0,2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) um etwa $50 \% \pm 5 \%$. Die langfristige Lebensdauer ($> 2,5 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) des WC8Ni-Beschichtungssubstrats in rauen Umgebungen (wie Salzsprühnebel, NaCl $5 \% \pm 0,5 \%$) entspricht den industriellen Anforderungen und die Verschleißfestigkeit ($< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) ist besser als die herkömmlicher Materialien.

Das optimierte Hartmetall weist einen niedrigen spezifischen Widerstand ($< 12 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, Leitfähigkeit $> 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), eine hohe elektrische Leitfähigkeit und hervorragende mechanische Eigenschaften (Härte HV 1450 ± 30 , $K_{1c} 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) auf. $\pm 0,5$) und erweitert damit erfolgreich seine Anwendungsaussichten bei elektronischen Kontakten, EDM-Elektroden, leitfähigen Beschichtungssubstraten, elektromagnetischen Abschirmmaterialien, leitfähigen Steckverbindern und Sensorelementen. In der intelligenten Fertigung unterstützen WC10Ni-Kontakte effizientes Schalten (Reaktionszeit $< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$), und WC10Co-Elektroden verbessern die Effizienz der Formenproduktion ($> 20 \% \pm 2 \%$). In der Luft- und Raumfahrt gewährleisten WC8Ni-Substrate und WC-Co-Ni-Sensoren eine hohe Temperaturstabilität und Präzision ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$). Im Schiffsbau weisen WC10Ni-Steckverbinder eine Korrosionsbeständigkeit auf ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), die die Lebensdauer verlängert ($> 10^4 \text{ Stunden} \pm 10^3 \text{ Stunden}$).

Die technische Anwendung der Leitfähigkeit von Hartmetall profitiert vom Synergieeffekt aus optimierter Zusammensetzung (Co/Ni $10 \% \pm 1 \%$, Korngröße $0,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$), Prozesskontrolle (Vakuumsintern bei $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) und Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$). Die hervorragende Leistung in elektronischen Kontakten (Lebensdauer $> 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$), EDM-Elektroden (Wirkungsgrad $> 95 \% \pm 2 \%$) und leitfähigen Beschichtungssubstraten (Lebensdauer $> 2 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) bestätigt den praktischen Wert der Leitfähigkeitsoptimierung. Darüber hinaus zeigt das Potenzial elektromagnetischer Abschirmmaterialien (Abschirmeffizienz $> 90 \% \pm 2 \%$), leitfähiger Steckverbinder (Gewichtsreduzierung von $30 \% \pm 2 \%$) und Sensorelementen (Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), dass das optimierte Hartmetall in den Bereichen 5G-Technologie, Avionik und intelligente medizinische Versorgung eingesetzt werden kann und eine wichtige Referenz für die Entwicklung von Hochleistungsmaterialien darstellt. Seine Anwendungsmöglichkeiten in extremen Umgebungen ($> 500 \text{ }^\circ\text{C}$ oder hohe Luftfeuchtigkeit $> 90 \% \pm 5 \%$) können künftig durch Nanokörner ($< 0,3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) oder ein funktionales Gradientendesign verbessert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2 Magnetische Prüfung und Qualitätskontrolle von Hartmetall

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall und deren Nachweisttechnologie spielen eine Schlüsselrolle in der zerstörungsfreien Prüfung, der Qualitätskontrolle und der Vorhersage mechanischer Eigenschaften. Diese Eigenschaften werden hauptsächlich durch den Ferromagnetismus der Bindungsphase bestimmt und durch die kombinierten Effekte von Mikrostruktur, Zusammensetzungsverteilung und Defektzustand beeinflusst. Durch präzise magnetische Prüfungen und Analysen können die innere Qualität, Gleichmäßigkeit und Leistungskonsistenz von Hartmetall effektiv bewertet werden, was eine zuverlässige Garantie für industrielle Anwendungen bietet. Dieser Abschnitt analysiert umfassend die wissenschaftlichen Grundlagen und den praktischen Nutzen der magnetischen Erkennung und Qualitätskontrolle von Hartmetall, indem er den magnetischen Mechanismus, die Prüftechnologie und die technische Anwendung eingehend untersucht und experimentelle Daten mit mikroskopischer Charakterisierung kombiniert.

9.1.2.1 Übersicht über magnetische Prinzipien und Technologien von Hartmetall

Prinzip des Karbidmagnetismus

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall werden hauptsächlich durch den Ferromagnetismus der Bindungsphase bestimmt. Zu seinen magnetischen Parametern gehören die Sättigungsmagnetisierung, die üblicherweise unter $10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ liegt, und die Koerzitivfeldstärke, die bei etwa $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ liegt. Diese Eigenschaften verleihen Hartmetall einen hohen Anwendungswert in der zerstörungsfreien Prüfung, Qualitätskontrolle und Vorhersage mechanischer Eigenschaften und können die Verteilung der Bindungsphase, den Kornzustand und innere Defekte widerspiegeln. In Kombination mit der hohen Härte ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), der Bruchzähigkeit ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) ist die magnetische Prüfung ein wichtiges technisches Mittel zur Leistungsoptimierung und Produktionskonsistenz von Hartmetall. In diesem Abschnitt wird eine umfassende Analyse anhand magnetischer Mechanismen, Prüftechnologien und technischer Anwendungen durchgeführt, um die intrinsische Beziehung zwischen magnetischen Eigenschaften und Mikrostruktur sowie mechanischen Eigenschaften aufzudecken.

(1) Beitrag des Ferromagnetismus von Co

Der Magnetismus von Hartmetall rührt hauptsächlich vom Ferromagnetismus von Co her, dessen magnetisches Moment etwa $1,7 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$ (Bohrsches Magneton) beträgt und aus dem Spin und der Umlaufbewegung ungepaarter Elektronen von Co-Atomen resultiert. Co bildet als Bindungsphase ein kontinuierliches Netzwerk und sein Gehalt und seine Verteilung wirken sich direkt auf die Magnetisierung und Koerzitivkraft aus. Bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ erreichen die magnetischen Eigenschaften ein Gleichgewicht, die Sättigungsmagnetisierung ist stabil bei $8 - 9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, die Koerzitivkraft beträgt etwa $100 - 120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ und die magnetischen Domänen sind gleichmäßig verteilt (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Ein zu hoher

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co-Gehalt ($> 12 \% \pm 1 \%$) führt zu einer Erhöhung der Magnetisierung auf $> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, reduziert jedoch K_{1c} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) aufgrund der Schwächung der Korngrenzen (Mikrorissdichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) $\pm 0,5$), während ein zu niedriger Co-Gehalt ($< 8 \% \pm 1 \%$) die Magnetisierung aufgrund der Unterbrechung des leitfähigen Netzwerks auf $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ reduziert. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Co-Homogenität (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) der Schlüssel zur Aufrechterhaltung der magnetischen Stabilität ist.

(2) Nichtmagnetische Eigenschaften von WC

WC selbst ist ein nichtmagnetisches Material mit einer Magnetisierungsintensität von weniger als $0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$. Seine kovalente Bindungsstruktur (WC-Bindungsenergie $\sim 4 \text{ eV}$) begrenzt den Beitrag des Elektronenspins und hat wenig Einfluss auf den Gesamtmagnetismus. Eine XPS-Detektion zeigt, dass auf der WC-Oberfläche kein signifikantes magnetisches Signal vorhanden ist (magnetisches Moment $< 0,01 \mu_B$). Seine Hauptfunktion besteht darin, eine hohe Härte ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) zu gewährleisten, während die magnetischen Eigenschaften fast vollständig von der Co-Phase abhängen. Die WC-Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reguliert die magnetischen Parameter indirekt, indem sie die Co-Verteilung beeinflusst, aber ihr eigener Beitrag zur Magnetisierung ist vernachlässigbar.

(3) Mikrostrukturelle Effekte: Die Gleichmäßigkeit

der Co-Phase und die Korngrenzenverteilung bestimmen die Bildung und Ausrichtung magnetischer Domänen. Bei einer Abweichung der Co-Verteilung von $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ ist die Magnetisierungsintensität stabil bei $8\text{--}9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, die Koerzitivkraft bleibt bei $100\text{--}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ und die Magnetfeldantwort ist konsistent ($> 95 \% \pm 2 \%$). Entmischung ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) führt zu lokaler magnetischer Inhomogenität, die Schwankungsbreite der Magnetisierungsintensität erhöht sich auf $\pm 1 \text{ emu/g}$, und die Koerzitivkraft kann auf $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ ansteigen, was die Messgenauigkeit verringert. Die EDS-Analyse zeigt, dass der Co-Gehalt in der Entmischungszone $15 \% \pm 1 \%$ erreichen kann, wodurch ein Bereich mit hoher Magnetisierung ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) entsteht, während die Korngrenzendichte ($> 10^4 \text{ m}^{-2}$) die Koerzitivfeldstärke weiter beeinflusst, indem sie das Wachstum magnetischer Domänen begrenzt.

(4) Defekte beeinträchtigen

die innere Porosität (Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), was für die Gleichmäßigkeit des magnetischen Flusses entscheidend ist. Porosität oder Mikrorisse ($< 0,1 \mu\text{m}$, Dichte $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) zerstreuen das Magnetfeld und schwächen die Magnetisierungsintensität (Reduktion $> 5 \% \pm 1 \%$). SEM-Beobachtungen zeigen, dass bei einer Porosität $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$ die Magnetisierungsintensität auf $7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ sinken kann und die Koerzitivfeldstärke um $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$ schwankt, was die Empfindlichkeit der zerstörungsfreien Prüfung ($< 90 \% \pm 2 \%$) beeinträchtigt. Mikrorisse können außerdem lokale Spannungskonzentrationen ($> 50 \text{ MPa}$) verursachen, die K_{1c} weiter reduzieren ($< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Daher ist es wichtig, den Sinterprozess zu kontrollieren (z. B. Vakuumsintern bei $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), um die Porosität gering zu halten.

Magnetische Prüftechnologie aus Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Instrumente und Parameter Das

üblicherweise zur magnetischen Detektion verwendete Vibrationsmagnetometer (VSM) weist eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ und eine Empfindlichkeit von $> 99 \% \pm 0,5 \%$ auf, was es zur genauen Charakterisierung magnetischer Spurenstoffe geeignet macht. Während der Prüfung liegt die angelegte Magnetfeldstärke bei $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ und die Probengröße beträgt $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, um die Repräsentativität der Messergebnisse sicherzustellen (Fehler $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$). Die Prüfumgebung muss auf $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Luftfeuchtigkeit $< 65 \% \pm 5 \%$ geregelt werden, um eine Drift der magnetischen Parameter ($< 0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$) durch Temperatur ($> 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) oder Feuchtigkeit ($> 80 \% \pm 5 \%$) zu vermeiden.

(2) Messindikatoren

Die Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivfeldstärke wurden mittels VSM gemessen, um die Gleichmäßigkeit und inneren Defekte der Co-Phase zu bewerten. Die Magnetisierung korreliert positiv mit dem Co-Gehalt ($R^2 > 0,95$), und jede 1%ige Co-Steigerung entspricht einer Magnetisierungssteigerung von etwa $0,8 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$; die Koerzitivfeldstärke wird von der Korngröße und dem Spannungszustand beeinflusst. Bei einer Korngröße von $0,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ ist die Koerzitivfeldstärke stabil bei $100\text{-}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, und bei einer Korngröße von $> 2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ steigt sie auf $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. In Kombination mit der Hystereseschleifenanalyse können die Änderungen der Magnetisierung und Koerzitivfeldstärke die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur widerspiegeln (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

(3) Empfindlichkeit und Genauigkeit:

Die Empfindlichkeit der magnetischen Detektion liegt bei $> 95 \% \pm 2 \%$, die Fehlerrate bei $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Poren ($> 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) und Mikrorisse ($> 0,1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) lassen sich erkennen. Beispielsweise beträgt die Magnetisierungsintensität der WC10Co-Probe $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, die Koerzitivfeldstärke $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, und die Detektionsgenauigkeit liegt über $98 \% \pm 1 \%$, was auf eine hohe Zuverlässigkeit hindeutet. Im Vergleich zur herkömmlichen Magnetpulverprüfung (Empfindlichkeit $\sim 90 \% \pm 2 \%$) eignet sich VSM aufgrund seiner hohen Auflösung ($< 0,1 \text{ emu/g}$) besser für die quantitative Analyse innerer Defekte von Hartmetall.

(4) Datenanalyse:

Durch die Kombination von SEM und EDS werden die Co-Verteilung analysiert, der Entmischungsbereich ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die Porosität ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) bestätigt und die Beziehung zwischen magnetischen Parametern und Mikrostruktur weiter kalibriert. SEM-Bilder zeigen eine lokale Erhöhung der Magnetisierungsintensität im Co-Entmischungsbereich ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), und die EDS-Erkennung bestätigt die Fluktuation des Co-Gehalts ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), was mit den VSM-Daten übereinstimmt. Nach der Datenkorrektur reduziert sich die Abweichung der Magnetisierungsintensität auf $\pm 0,2 \text{ emu/g}$, und die Fluktuation der Koerzitivkraft wird auf $\pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$ kontrolliert, wodurch die Genauigkeit der Qualitätskontrolle ($> 99 \% \pm 0,5 \%$) gewährleistet wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.2 Analyse des magnetischen Mechanismus von Hartmetall

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetallen werden hauptsächlich durch den Ferromagnetismus der Bindungsphase (wie Kobalt (Co) oder Nickel (Ni)) bestimmt, und ihr Mechanismus umfasst mehrere Faktoren wie Elektronenspin, Mikrostruktur und Herstellungsverfahren. In Kombination mit hoher Härte ($> HV\ 1400 \pm 30$), Bruchzähigkeit ($K_{Ic} > 15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\ mm^3/m \pm 0,01\ mm^3/m$) bilden die magnetischen Eigenschaften eine wichtige Grundlage für zerstörungsfreie Prüfungen und Qualitätskontrolle. Im Folgenden wird der Mechanismus des Magnetismus von Hartmetall anhand der Quelle des Magnetismus, mikroskopischer Einflüsse, Phasengrenzfläche und Netzwerkkontinuität, Erkennung und Leistungskorrelation sowie Umwelt- und Temperatureinflüsse im Detail erörtert und seine inneren Gesetzmäßigkeiten durch die Kombination von experimentellen Daten und mikroskopischer Analyse enthüllt.

9.1.2.2.1 Quelle des Karbidmagnetismus

(1) 3d-Elektronenspin von Co

Der Magnetismus von Co entsteht durch seine leere 3d-Elektronenschale. Das durch den Spin erzeugte magnetische Moment beträgt etwa $1,7\ \mu_B \pm 0,1\ \mu_B$ (Bohrsches Magneton), das durch Spin-Bahn-Kopplung eine ferromagnetische Ordnung bildet. Die Sättigungsmagnetisierung (Sättigungsmagnetisierung, M_s) ist proportional zum Co-Volumenanteil (f_{Co}), der durch folgende Beziehung angenähert werden kann:

$$M_s \approx f_{Co} \cdot M_{Co}$$

Dabei ist f_{Co} der Volumenanteil von Co ($10\ \% \pm 1\ \%$) und M_{Co} die Magnetisierung von reinem Co (ca. $160\ emu/g \pm 5\ emu/g$). Bei einem Co-Gehalt von $10\ \%$ beträgt der theoretische M_s -Wert daher ca. $16\ emu/g$, reduziert sich aber aufgrund mikrostruktureller Einschränkungen (Korngrenzenstreuung, Defekteffekte) tatsächlich auf $8\text{--}10\ emu/g \pm 0,5\ emu/g$. XPS-Messungen zeigen, dass die 3d-Spitzenposition von Co ($\sim 778\ eV \pm 0,1\ eV$) den Beitrag ungepaarter Elektronen bestätigt und die magnetische Stabilität von der Kontinuität des Co-Netzwerks abhängt ($> 95\ \% \pm 2\ \%$).

(2) Schwacher Ferromagnetismus von Ni

Wenn Ni (Gehalt $8\text{--}10\ \% \pm 0,1\ \%$) als Bindungsphase hinzugefügt wird, beträgt sein magnetisches Moment nur $0,6\ \mu_B \pm 0,1\ \mu_B$. Es handelt sich dabei um ein schwach ferromagnetisches Material, was zu einer deutlichen Verringerung der Magnetisierung ($< 5\ emu/g \pm 0,5\ emu/g$) führt. Ni hat einen hohen Grad an 3d-Elektronenpaarung (etwa $0,6\ \mu_B/\text{Atom}$), eine schwache ferromagnetische Ordnung und eine Sättigungsmagnetisierung von etwa $55\ emu/g \pm 5\ emu/g$ (reines Ni), aber in Hartmetall sinkt sie aufgrund des Verdünnungseffekts auf $4\text{--}5\ emu/g \pm 0,5\ emu/g$. Obwohl die Einführung von Ni die Korrosionsbeständigkeit verbessert ($i_{corr} < 10^{-6}\ A/cm^2 \pm 10^{-7}\ A/cm^2$), schwächt es den Gesamtmagnetismus und eignet sich für Anwendungen, die einen niedrigen Magnetismus, aber eine hohe Korrosionsbeständigkeit erfordern (wie etwa Schiffsausrüstung).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.2.2 Einfluss der Mikrostruktur auf die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

(1) Korngröße und Koerzitivfeldstärke

die Korngröße beträgt $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, die Korngrenzendichte ist hoch ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$), was das Umschalten der magnetischen Domänen behindert. Die Umschaltenergie beträgt etwa $10^{-19} \text{J} \pm 10^{-20} \text{J}$, was zu einer Erhöhung der Koerzitivfeldstärke auf $120 \text{Oe} \pm 10 \text{Oe}$ führt und die magnetische Reaktion empfindlicher auf Änderungen des externen Magnetfelds reagiert. Größere Körner ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verringern die Korngrenzenstreuung, reduzieren den Widerstand gegen das Umschalten der magnetischen Domänen und die Koerzitivfeldstärke kann auf $80 \text{Oe} \pm 10 \text{Oe}$ fallen, aber die Schwankung der Magnetisierungsintensität steigt auf $\pm 0,5 \text{emu/g} \pm 0,1 \text{emu/g}$. Die SEM-Analyse zeigte, dass die feinkörnigen Proben eine konsistente magnetische Domänenausrichtung ($> 95 \% \pm 2 \%$) aufwiesen, während die grobkörnigen Proben eine ungleichmäßige magnetische Verteilung aufwiesen (Abweichung $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$).

(2) Sintertemperatur und Co-Verteilung

Die Sintertemperatur von $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung der Co-Phase (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und behält so eine stabile Magnetisierung ($8-9 \text{emu/g} \pm 0,5 \text{emu/g}$) und Koerzitivfeldstärke ($100-120 \text{Oe} \pm 10 \text{Oe}$) bei. Übersteigt die Temperatur jedoch $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, tritt eine Co-Segregation ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) auf, der lokale Co-Gehalt steigt auf $15 \% \pm 1 \%$, wodurch ein Bereich mit hoher Magnetisierung ($> 10 \text{emu/g} \pm 0,5 \text{emu/g}$) entsteht, die Magnetisierungsabweichung um etwa $10 \% \pm 2 \%$ zunimmt und die Fluktuation der Koerzitivfeldstärke ($> 130 \text{Oe} \pm 10 \text{Oe}$) verstärkt wird. Durch EDS-Erkennung wurde bestätigt, dass die Korngrenzenoxidation (O 1s-Spitzenposition $\sim 532 \text{eV} \pm 0,1 \text{eV}$) in der Entmischungszone zunahm ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), was die magnetische Konsistenz beeinträchtigte.

(3) Defekte und Poren

Innere Defekte (z. B. Poren $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Dichte $> 10^2 \text{m}^{-2}$) erhöhen die Koerzitivfeldstärke um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $125 \text{Oe} \pm 10 \text{Oe}$), indem sie das Magnetfeld zerstreuen. Proben mit hoher Dichte und einer Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ haben stabilere magnetische Eigenschaften und eine verbesserte Magnetisierungskonstanz (Abweichung $< \pm 0,2 \text{emu/g}$), während bei einer Porosität $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$ die Magnetisierung auf $7 \text{emu/g} \pm 0,5 \text{emu/g}$ sinkt und die Flussgleichmäßigkeit abnimmt ($< 90 \% \pm 2 \%$). Mikrorisse können außerdem lokale Spannungen ($> 50 \text{MPa}$) verursachen, die K_{1c} verringern ($< 14 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), was durch Vakuumsintern (Druck $< 10^{-3} \text{Pa} \pm 10^{-4} \text{Pa}$) kontrolliert werden muss.

9.1.2.2.3 Kontinuität der magnetischen Phasengrenzfläche und des Netzwerks von Hartmetall

(1) SEM- und EDS-Analysen des Co-Phasennetzwerks

zeigen, dass die Kontinuität der Co-Phase in WC10Co $95 \% \pm 2 \%$ übersteigt und einen effizienten magnetischen Leitfähigkeitspfad bildet. Die Gleichmäßigkeit des Co-Netzwerks bestimmt direkt die räumliche Verteilung der Magnetisierungsintensität. Die magnetischen Eigenschaften sind

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimal, wenn die Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ beträgt (M_s 8–9 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, Koerzitivkraft 120 Oe ± 10 Oe). Eine Unterbrechung des Co-Netzwerks (z. B. eine Porosität $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$) führt zu einem Verlust des magnetischen Flusses ($> 5 \% \pm 1 \%$), und die Magnetisierungsintensität verringert sich um etwa $10 \% \pm 2 \%$.

(2) Ni-Substitutionseffekt

In der WC10Ni-Probe verringert der schwache Magnetismus der Ni-Phase M_s auf 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g und die Koerzitivfeldstärke beträgt etwa 110 Oe ± 10 Oe, aber ihre Verteilungsgleichmäßigkeit (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{kor}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²) gleichen den Verlust an Magnetismus aus, sodass es für Anwendungen geeignet ist, die niedrigen Magnetismus, aber hohe Korrosionsbeständigkeit erfordern (wie medizinische Implantate). Die Feinkornstruktur der Ni-Phase (0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessert die Stabilität der magnetischen Domäne und die Schwankungsbreite wird auf $\pm 0,1$ emu/g reduziert.

(3) Streuung an der Grenzfläche

Gitterfehlpassungen ($\sim 5 \% \pm 1 \%$) an der WC/Co-Grenzfläche verursachen zusätzliche Streuung, welche die magnetische Domänenausrichtung beeinflusst und zu einer Erhöhung der Koerzitivfeldstärke um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf 125 Oe ± 10 Oe) führt. Durch Optimierung des Sinterprozesses (z. B. abgestuftes Sintern, Vorsintern bei 1200 °C und anschließende Erhöhung der Temperatur auf 1450 °C ± 10 °C) können Grenzflächendefekte ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verringert, die magnetische Stabilität (M_s -Abweichung $< \pm 0,2$ emu/g) erhöht und K_{1c} ($> 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) verbessert werden.

9.1.2.2.4 Zusammenhang zwischen magnetischen Tests und der Leistung von Hartmetall

(1) VSM-Messung

Das Vibrationsmagnetometer (VSM) hat eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ emu/g. Bei einem angelegten Magnetfeld von 1 T $\pm 0,01$ T beträgt der M_s -Wert von WC10Co 8 emu/g $\pm 0,5$ emu/g und die Koerzitivfeldstärke 120 Oe ± 10 Oe; der M_s -Wert von WC10Ni sinkt auf 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g und die Koerzitivfeldstärke beträgt etwa 110 Oe ± 10 Oe. Die Hystereseschleife zeigt, dass WC10Co eine schnelle Magnetisierungssättigung aufweist ($< 0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), während WC10Ni ein höheres Magnetfeld benötigt ($> 0,7 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), was den Einfluss des Co/Ni-Gehalts und der Mikrostruktur widerspiegelt.

(2) Fehlererkennung:

Magnetische Prüfungen können Risse ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Dichte $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) und Abweichungen im Kohlenstoffgehalt ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$) identifizieren. Überschüssiger Kohlenstoff ($> 6,13 \text{ Gew.}\% \pm 0,01 \text{ Gew.}\%$) oder zu wenig Kohlenstoff ($< 6,13 \text{ Gew.}\% \pm 0,01 \text{ Gew.}\%$) verändern die Eigenschaften der WC/Co-Grenzfläche und beeinflussen die Magnetisierungsintensität (Abnahme $> 5 \% \pm 1 \%$) und die Koerzitivfeldstärke (Zunahme $> 10 \% \pm 2 \%$). SEM-Aufnahmen zeigen, dass Co im Bereich der Kohlenstoffabweichung ungleichmäßig verteilt ist (Abweichung $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), wodurch die Schwankungen der magnetischen Parameter verstärkt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Mechanische Korrelation

Die Koerzitivfeldstärke korreliert negativ mit der Bruchzähigkeit (K_{1c}) (Korrelationskoeffizient $> -0,9 \pm 0,05$). Proben mit hoher Koerzitivfeldstärke (z. B. $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) entsprechen üblicherweise einem niedrigeren K_{1c} -Wert ($< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), da die Korngrenzstreuung die Umkehrenergie der magnetischen Domänen begrenzt ($> 10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$). Proben mit niedriger Koerzitivfeldstärke (z. B. $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) entsprechen einem höheren K_{1c} -Wert ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und bieten somit einen Bezugspunkt für die Bewertung mechanischer Eigenschaften.

9.1.2.2.5 Umwelt- und Temperatureffekte auf die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

(1) Temperatureffekt

Im Bereich von 20°C bis 200°C nimmt die Magnetisierungsintensität mit steigender Temperatur leicht ab ($< 5\% \pm 1\%$), da thermische Schwingungen die Streuung magnetischer Domänen verstärken (Zunahme des Streuquerschnitts $> 10\% \pm 2\%$). Oberhalb von $300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beginnt die Co-Phase zu erweichen (Schmelzpunkt $1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), der Magnetismus nimmt deutlich ab (M_s sinkt auf $< 6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und die Koerzitivfeldstärke schwankt um $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$. Die Ni-Phase (Schmelzpunkt $1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ist bei hohen Temperaturen etwas stabiler, mit einer Abnahme von etwa $3\% \pm 1\%$, was für Hochtemperaturumgebungen (wie z. B. Luftfahrtkomponenten) geeignet ist.

(2) Korrosionseffekt

Die niedrige Korrosionsrate der Ni-Phase in einer feuchten Umgebung (wie $3,5\% \text{ NaCl}$, Feuchtigkeit $> 80\% \pm 5\%$) ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) macht ihre magnetische Stabilität besser als die von Co ($i_{\text{corr}} \sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) und verlängert die Lebensdauer ($> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden). Die XPS-Erkennung zeigt, dass sich auf der Ni-Oberfläche eine Passivierungsschicht (NiO , Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) bildet und die Zunahme der O1s-Spitzenposition $< 0,1\% \pm 0,01\%$ beträgt, wodurch die magnetische Dämpfung reduziert wird.

Der magnetische Mechanismus von Hartmetall beruht auf dem Spin der Co 3d-Elektronen, M_s ist proportional zum Co-Gehalt (der theoretische Wert wird aufgrund mikroskopischer Einschränkungen auf $8\text{--}10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ reduziert) und die Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und die Sintertemperatur ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) regulieren die Koerzitivfeldstärke ($100\text{--}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) durch die Korngrenzendichte und die Gleichmäßigkeit der Co-Verteilung (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Durch Ni-Substitution wird M_s (auf $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) verringert, jedoch die Korrosionsbeständigkeit verbessert. Mikroskopische Defekte (Porosität $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und Grenzflächenstreuung (Gitterfehlanspassung $\sim 5\% \pm 1\%$) beeinträchtigen die magnetischen Eigenschaften zusätzlich. Durch VSM-Erkennung (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ emu/g}$) in Kombination mit SEM- und EDS-Analyse werden Zusammensetzung (Co $10\% \pm 1\%$) und Verfahren (Vakuumsintern) optimiert, was eine Grundlage für die Kalibrierung magnetischer Parameter bietet (M_s -Abweichung $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$, Koerzitivkraftschwankung $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$).

Zukünftig können die magnetischen Eigenschaften und das Anwendungspotenzial von Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch Feinkornkontrolle ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und reduzierte Segregation ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) weiter verbessert werden, insbesondere bei hohen Temperaturen ($> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) oder korrosiven Umgebungen ($i_{\text{kor}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

9.1.2.3 Analyse der Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetallen werden durch eine Kombination von Faktoren beeinflusst, zu denen der Gehalt der Bindungsphase, mikrostrukturelle Parameter, Herstellungsverfahren und chemische Zusammensetzung gehören. Diese Faktoren regulieren maßgeblich die Sättigungsmagnetisierung (M_s) und die Koerzitivfeldstärke, indem sie die Verteilung der ferromagnetischen Phase, das Verhalten magnetischer Domänen und den Zustand der Defekte beeinflussen. Zusammen mit hoher Härte ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), Bruchzähigkeit ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{m}$) bilden die magnetischen Eigenschaften eine wichtige Grundlage für die zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätskontrolle. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussfaktoren detailliert analysiert und ihre Rolle anhand von Beispielen verifiziert. Ziel ist es, wissenschaftliche Leitlinien für die Prozessgestaltung der magnetischen Optimierung bereitzustellen.

9.1.2.3.1 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Kobaltgehalt

(1) Einflussmechanismus:

Co ist eine ferromagnetische Phase, deren Gehalt die Magnetisierungsintensität direkt bestimmt. Bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ beträgt M_s etwa $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$. Die magnetischen Eigenschaften sind stabil, und die Konnektivität des magnetischen Netzwerks ($> 95 \% \pm 2 \%$) und die Gleichmäßigkeit (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) sind ausgeglichen. Übersteigt der Co-Gehalt $12 \% \pm 1 \%$, steigt M_s um etwa $20 \% \pm 3 \%$ (auf $9,6\text{--}10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Dies liegt daran, dass der höhere Co-Volumenanteil den magnetischen Permeabilitätspfad verbessert, gleichzeitig aber zu einer Schwächung der Korngrenzen (Mikrorissdichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) und einer Verringerung von K_{1c} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) führen kann. $\pm 0,5$). Wenn der Co-Gehalt unter $8 \% \pm 1 \%$ liegt, sinkt die Magnetisierung aufgrund der erhöhten Flussverluste ($> 5 \% \pm 1 \%$) infolge der Unterbrechung des Co-Netzwerks auf $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$.

(2) Leistungskompromisse:

Ein hoher Co-Gehalt ($> 15 \% \pm 1 \%$) verbessert zwar den M_s -Wert ($> 12 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), kann aber zu Entmischung ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), erhöhter lokaler magnetischer Inkonsistenz (Abweichung $> 1 \text{ emu/g}$) und verringerter Zähigkeit und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $> 0,1 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) führen. Entmischung sollte durch Prozesskontrolle (z. B. abgestuftes Sintern) vermieden werden, um eine koordinierte Optimierung der magnetischen und mechanischen Eigenschaften zu gewährleisten.

(3) Beispielanalyse:

Aufgrund des hohen Co-Gehalts ($12 \% \pm 1 \%$) stieg der M_s -Wert der WC12Co-Probe auf $9,6 \text{ emu/g}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,5 \text{ emu/g}$, was eine starke magnetische Reaktion zeigte (Magnetfeldsättigung $< 0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), aber die SEM-Analyse ergab Mikrorisse an den Korngrenzen (Dichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), und K_{1c} fiel auf $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, was darauf hindeutet, dass ein hoher Co-Gehalt mit einer Optimierung der Mikrostruktur kombiniert werden muss.

9.1.2.3.2 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Korngröße

(1) Einflussmechanismus

Die Korngröße beeinflusst die Korngrenzendichte und die Domänenwandbewegung. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Korngrenzendichte hoch ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), was die Domänenwandbewegung behindert, eine hohe Koerzitivfeldstärke (ca. $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) aufrechterhält und die magnetische Reaktionsempfindlichkeit erhöht ($> 95 \% \pm 2 \%$). Wenn die Korngröße $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ überschreitet, verringert sich die Anzahl der Korngrenzen, der Widerstand gegen Domänenwandbewegungen verringert sich und die Koerzitivfeldstärke verringert sich um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (auf $108 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$), aber die Schwankung der Magnetisierungsintensität erhöht sich aufgrund der ungleichmäßigen magnetischen Flusskonzentration auf $\pm 0,5 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$.

(2) Mikroskopische Effekte

Die feine Kornstruktur ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessert die Dispersion der Co-Phase (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und erhöht die magnetische Streuung (Streuquerschnitt $< 10^{-18} \text{ m}^2$), erhöht jedoch die Materialhärte ($\text{HV } 1450 \pm 30$) und K_{1c} ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$); grobe Körner ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) fördern die magnetische Flusskonzentration und eignen sich für Anwendungen mit geringer Koerzitivfeldstärke (wie elektromagnetische Abschirmung), jedoch nimmt die Härte ab ($< \text{HV } 1400 \pm 30$).

(3) Prozessoptimierung:

Durch Zugabe von Korninhibitoren (wie VC $0,5\text{--}1 \%$ oder $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1 \%$) können die Körner im Bereich von $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$ stabilisiert, die Korngrenzenenergie ($< 1 \text{ J/m}^2$) gesenkt, die magnetische Streuung verringert und die Fluktuation der Koerzitivkraft innerhalb von $\pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$ kontrolliert werden, wobei sowohl magnetische als auch mechanische Eigenschaften berücksichtigt werden.

9.1.2.3.3 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Nickelzugabe

(1) Einflussmechanismus

Ni ist eine schwache ferromagnetische Phase (magnetisches Moment $0,6 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$). Wenn die Zugabemenge $8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$ beträgt, verringert sich M_s im Vergleich zu WC-Co um etwa $40 \% \pm 5 \%$ (auf $4\text{--}5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), da die Magnetisierungsintensität von Ni (etwa $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$) viel geringer ist als die von Co ($160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$). Wenn der Ni-Gehalt $12 \% \pm 0,1 \%$ übersteigt, sinkt K_{1c} um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), was mit den schwachen Korngrenzen (Mikrorissdichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) zusammenhängt, die durch übermäßigen Ni-Gehalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verursacht werden. Auch die Konnektivität des magnetischen Netzwerks ($< 90 \% \pm 2 \%$) wird beeinträchtigt.

(2) Vorteile und Einschränkungen

Ni verbessert die Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), und die Gewichtsverlustrate in einer feuchten Umgebung (wie etwa 3,5 % NaCl) ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) ist viel niedriger als bei Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$), aber sein schwacher Magnetismus begrenzt seine Anwendungen mit hoher Magnetisierungsintensität (z. B. erfordert eine elektromagnetische Abschirmung $M_s > 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$).

(3) Verteilungseffekt: Eine gleichmäßige

Ni-Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) kann magnetische Fluktuationen reduzieren (M_s -Abweichung $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$). Die SEM-Analyse zeigt, dass die Ni-Netzwerkcontinuität von WC10Ni $> 95 \% \pm 2 \%$ beträgt und damit stabiler ist als WC10Co (Co-Segregation $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$).

9.1.2.3.4 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Sinterprozess

(1) Einflussmechanismus

Eine Sintertemperatur von $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung von Co oder Ni (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), eine stabile Magnetisierung ($8\text{--}9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und Koerzitivfeldstärke ($100\text{--}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Wenn die Temperatur $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ übersteigt, nimmt die Entmischung der Bindungsphase um etwa $15 \% \pm 3 \%$ zu (lokaler Co/Ni-Gehalt $> 15 \% \pm 1 \%$), was zu lokaler magnetischer Inkonsistenz (M_s -Abweichung $> 1 \text{ emu/g}$) führt, und die Koerzitivfeldstärke kann um $\pm 10 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$ schwanken.

(2) Verfahrensdetails

Vakuumsintern (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) verringert die Oxidation (O 1s-Peak $< 0,3 \% \pm 0,01 \%$), und eine Dichte von $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$ trägt zur Gleichmäßigkeit des magnetischen Flusses bei (Abweichung $< 2 \% \pm 0,5 \%$). Gradiertes Sintern (Vorsintern bei $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ für 1 Stunde, dann Erhöhung auf $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) unterdrückt die Entmischung ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), verringert die thermische Spannung ($< 50 \text{ MPa}$) und verbessert die Stabilität der magnetischen Parameter.

(3) Wirkung der Wärmebehandlung

Durch das Anlassen bei niedriger Temperatur nach dem Sintern ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden) werden innere Spannungen eliminiert ($< 30 \text{ MPa}$), die magnetische Domänenausrichtung optimiert (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), M_s ($8\text{--}9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und die Koerzitivfeldstärke ($120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) stabilisiert und K_{1c} ($> 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) verbessert.

9.1.2.3.5 Einflussfaktoren auf die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall – Kohlenstoffgehalt

(1) Einflussmechanismus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Abweichung des Kohlenstoffgehalts ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$) verändert die Eigenschaften der WC/Co-Grenzfläche und beeinflusst die magnetische Domänenstruktur. Zu wenig Kohlenstoff (z. B. $0,2 \% \pm 0,01 \%$ niedriger als der theoretische Wert von $6,13 \text{ Gew.}\% \pm 0,01 \text{ Gew.}\%$) führt zu einer unvollständigen WC-Phase und erhöht die Koerzitivfeldstärke um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $105\text{--}110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$); zu viel Kohlenstoff (z. B. $0,3 \% \pm 0,01 \%$) bildet freien Kohlenstoff, schwächt das magnetische Co-Netzwerk (M_s -Abnahme $> 5 \% \pm 1 \%$), und die Koerzitivfeldstärke schwankt um $\pm 10 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$.

(2) Die mikroanalytische

EDS-Analyse zeigt, dass bei einer Abweichung des Kohlenstoffgehalts von $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ die Co-Phasenreinheit hoch ($> 99 \% \pm 0,5 \%$) und die Magnetisierungsintensität konstant (M_s $8\text{--}9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) ist. Bei einer Abweichung von $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$ ist die Co-Verteilung ungleichmäßig (Abweichung $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und die Koerzitivkraftschwankung erhöht ($> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Die Rasterelektronenmikroskopie (SEM) bestätigt, dass die freie Kohlenstofffläche ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) den magnetischen Fluss beeinflusst.

(3) Die Kontrollstrategie

gewährleistet einen stabilen Kohlenstoffgehalt und verringert magnetische Anomalien (M_s -Abweichung $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$) durch präzise Kohlenstoffmischung (WC:Co-Molverhältnis $6,13:1 \pm 0,01$) und kombiniert Vakuumsintern (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa}$), um die Kohlenstoffverflüchtigung ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) zu kontrollieren.

9.1.2.3.6 Umfassendes Beispiel für Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen

$\pm 0,01 \%$) eine Koerzitivkraft von $140 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ und einen M_s von $9,6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ und zeigt damit eine höhere magnetische Reaktion, jedoch wurden mittels SEM magnetische Inhomogenität (Abweichung $> 0,5 \text{ emu/g}$) und Mikrorisse (Dichte $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) festgestellt. Im Gegensatz dazu wurde WC10Ni bei $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ vakuumgesintert und wies eine Abweichung des Kohlenstoffgehalts von $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, eine Koerzitivkraft von $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ und einen stabilen M_s von $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ auf, was den synergistischen Effekt der Ni-Zugabe und der Prozessoptimierung widerspiegelt. Die SEM-Analyse bestätigte außerdem, dass die Defektrate ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) und die Gleichmäßigkeit der Co/Ni-Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) von WC10Ni besser sind als diejenigen von WC12Co und dass seine Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) auch für feuchte Umgebungen besser geeignet ist.

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall werden durch Faktoren wie Co-Gehalt ($10 \% \pm 1 \%$), Korngröße ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Ni-Zugabe ($8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$), Sinterverfahren (Vakuumsintern bei $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und Kohlenstoffgehalt ($\pm 0,1 \% \pm 0,01 \%$) bestimmt. Co-Gehalt und Sintertemperatur dominieren M_s ($8\text{--}10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und Gleichmäßigkeit, Korngröße und Kohlenstoffgehalt beeinflussen die Koerzitivfeldstärke ($100\text{--}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) und die Ni-Zugabe gleicht magnetische Eigenschaften (bis hinunter zu $4\text{--}5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) aus.

Durch die Optimierung dieser Parameter können die magnetischen Parameter (M_s -Abweichung $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$, Koerzitivfeldstärke $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$) präzise gesteuert werden. Dies erfüllt die hohen Anforderungen der zerstörungsfreien Prüfung (Empfindlichkeit $> 95 \% \pm 2 \%$) und der Qualitätskontrolle (Fehlerrate $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und bietet technischen Support für Hartmetall in anspruchsvollen Anwendungen (z. B. in der Luftfahrt und Medizin). Zukünftig kann die magnetische Konsistenz durch Nanokörner ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und ein mehrphasiges Design weiter verbessert werden.

9.1.2.4 Optimierungsstrategie für magnetische Eigenschaften von Hartmetall

Um eine Sättigungsmagnetisierung (M_s) unter $10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ und eine stabile Koerzitivfeldstärke (Koerzitivfeldstärke) von etwa $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ zu erreichen, erfordert die magnetische Optimierung von Hartmetall eine umfassende Berücksichtigung von Zusammensetzungsdesign, Herstellungsprozess, Mikrostrukturregulierung und Testspezifikationen. Diese Strategien zielen darauf ab, die magnetische Gleichmäßigkeit zu verbessern, die Auswirkungen von Defekten zu verringern und sicherzustellen, dass die magnetischen Eigenschaften anspruchsvollen Anwendungsszenarien wie zerstörungsfreier Prüfung und Qualitätskontrolle gerecht werden. Der konkrete Optimierungsplan umfasst die folgenden Schlüsselaspekte: Erstens wird durch Optimierung der Zusammensetzung der Co-Gehalt auf $10 \% \pm 1 \%$ kontrolliert, wodurch als ferromagnetische Phase der Hauptbeitrag zur Magnetisierung geleistet wird, M_s im Bereich von $8\text{--}10 \text{ emu/g}$ gehalten und die durch einen übermäßigen Gehalt verursachte Abnahme der Zähigkeit vermieden wird; gleichzeitig wird ein Ni-Gehalt von $8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$ als zusätzliche Bindungsphase eingeführt. Der schwache Ferromagnetismus von Ni (magnetisches Moment $0,6 \mu_B$) reduziert M_s auf $< 5 \text{ emu/g}$, seine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) erhöht jedoch die Stabilität des Materials in korrosiver Umgebung. Die Co/Ni-Mischbindungsphase (z. B. $\text{Co } 6 \% + \text{Ni } 4 \%$) ermöglicht das optimale Gleichgewicht zwischen Magnetismus und Haltbarkeit. Zusätzlich trägt die Zugabe einer geringen Menge an Korninhibitoren (z. B. VC oder Cr_3C_2 , $< 1 \%$) dazu bei, die Co/Ni-Verteilung zu optimieren, die Entmischung zu reduzieren ($< 0,1 \%$) und die magnetischen Parameter weiter zu stabilisieren.

Beim Sinterprozess wird die Sintertemperatur auf $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ eingestellt, um eine durch hohe Temperaturen ($> 1500^\circ\text{C}$) verursachte Co/Ni-Segregation (Abweichung $> 0,5 \%$) zu vermeiden. Bei dieser Temperatur ist Co gleichmäßig verteilt (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), und die Konsistenz der Magnetisierungsintensität wird verbessert. Durch Vakuumsintern (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) wird eine Materialdichte von über $99,5 \% \pm 0,1 \%$ erreicht und die Porosität reduziert ($< 0,05 \%$). Dadurch wird die Gleichmäßigkeit des magnetischen Flusses verbessert und die niedrige Koerzitivfeldstärke beibehalten. Durch den Einsatz von abgestuftem Sintern (Vorsintern bei 1200°C und anschließendes Erhitzen auf 1450°C) oder heißisostatischem Pressen (HIP) können innere Spannungen eliminiert, abnormales Kornwachstum verhindert und magnetische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schwankungen auf $\pm 2\%$ reduziert werden. Durch Niedertemperaturtempern ($800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) nach dem Sintern kann zudem die magnetische Domänenausrichtung optimiert und M_s sowie Koerzitivfeldstärke weiter stabilisiert werden.

Zur Kontrolle der Mikrostruktur wird die WC-Korngröße auf $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ kontrolliert. Die hohe Korngrenzendichte ($> 10^{-14}\text{ m}^{-2}$) wird verwendet, um die Domänenumkehr (Domänenwandbewegung) zu verhindern und die Koerzitivfeldstärke stabil bei $100\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$ zu halten. Die feine Kornstruktur verbessert auch die Dispersion der Co-Phase und verbessert den magnetischen Leitfähigkeitspfad. VC ($0,5\% - 1\%$) oder TaC wird als Inhibitor hinzugefügt, um ein Kornwachstum über $1\text{ }\mu\text{m}$ zu verhindern und so eine Verringerung der Koerzitivfeldstärke ($< 90\text{ Oe}$) zu vermeiden. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Co-Netzwerkcontinuität der $0,5\text{-}\mu\text{m}$ -Kornprobe $> 95\%$ beträgt und die Fluktuation der magnetischen Parameter weniger als $\pm 0,2\text{ emu/g}$ beträgt. Im Vergleich zur Probe mit groben Körnern ($> 2\text{ }\mu\text{m}$) ist die Koerzitivfeldstärke der feinen Körner um $10\text{--}15\%$ erhöht und die Konsistenz der Magnetisierungsintensität deutlich verbessert.

Die Kohlenstoffkontrolle ist ein weiteres wichtiges Bindeglied. Die Abweichung des Kohlenstoffgehalts sollte auf $< 0,1\% \pm 0,01\%$ begrenzt werden, um einen Kohlenstoffmangel ($< 6,0\%$) zu vermeiden, der zu einer unvollständigen WC-Phase führt, oder einen Kohlenstoffüberschuss ($> 6,2\%$), der zu freiem Kohlenstoff führt. Ein stabiler Kohlenstoffgehalt kann die Fluktuation der Koerzitivfeldstärke ($< 5\% \pm 1\%$) und die M_s -Abweichung reduzieren. Eine gleichmäßige Kohlenstoffverteilung kann durch eine präzise Kohlenstoffanpassung (WC:Co-Molverhältnis $6,13:1 \pm 0,01$) oder die Kontrolle der Atmosphäre im Karbonisierungssofen (CO/CO_2 -Verhältnis $1:1 \pm 0,1$) sichergestellt werden. Die Koerzitivfeldstärke von Proben mit unzureichendem Kohlenstoffgehalt kann auf 110 Oe ansteigen, und M_s sinkt um $5\text{--}10\%$. Zu viel Kohlenstoff schwächt das magnetische Co-Magnetnetzwerk, was zur Aufrechterhaltung der magnetischen Stabilität einer strengen Überwachung bedarf.

Gemäß den Testspezifikationen wurde für die magnetische Prüfung ein Vibrationsmagnetometer (VSM) verwendet. Die angelegte Magnetfeldstärke betrug $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$ und die Messgenauigkeit $\pm 0,1\text{ emu/g}$, um die Datenzuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Probengröße betrug $10 \times 10 \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$. Die Testtemperatur wurde auf $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt und die Luftfeuchtigkeit lag bei $< 65\%$, um Umwelteinflüsse zu vermeiden. Die Messung wurde fünfmal wiederholt und der Durchschnittswert ermittelt. SEM und EDS wurden verwendet, um die Co/Ni-Verteilung und die Defektrate ($< 0,1\%$) zu analysieren. Beispielsweise wurde WC10Co bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesintert, mit einem M_s von etwa $8\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$ und einer Koerzitivfeldstärke von $100\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$. Die Erkennungsgenauigkeit überstieg $98\% \pm 1\%$, was die Anforderungen der zerstörungsfreien Prüfung vollständig erfüllte.

Unter den Bedingungen von WC10CoNi (Co $6\% + \text{Ni } 4\%$), gesintert bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, Korngröße $0,5\text{ }\mu\text{m}$ und Kohlenstoffabweichung $< 0,1\%$, wird M_s auf $7,8\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$ optimiert und die Koerzitivfeldstärke bei $98\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$ stabilisiert, was besser als der Zielwert ist. Durch die Oberflächenpolitur ($R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$) werden magnetische Fluktuationen weiter reduziert, und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit von Ni verbessert die Anwendbarkeit des Materials in feuchten Umgebungen. Diese Optimierungen ermöglichen Hartmetall eine gute Leistung bei der magnetischen Erkennung und der Bewertung mechanischer Eigenschaften und legen den Grundstein für zerstörungsfreie Prüfungen und hochwertige Fertigungsanwendungen.

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall werden durch den Ausgleich der magnetischen Eigenschaften und der Korrosionsbeständigkeit durch den Co-Gehalt ($10 \% \pm 1 \%$) und die Ni-Zugabe ($8 \%-10 \%$) optimiert. Das Sintern bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ gewährleistet Dichte ($> 99,5 \%$) und gleichmäßige Verteilung. $0,51\text{-}\mu\text{m}$ -Körner und eine Kohlenstoffabweichung ($< 0,1 \%$) stabilisieren die Koerzitivfeldstärke. VSM-Prüfungen ermöglichen eine hochpräzise Verifizierung. Die optimierten WC10Co- oder WC10Ni-Proben erfüllen die Anforderungen von $M_s < 10\text{ emu/g}$ und einer Koerzitivfeldstärke von $\sim 100\text{ Oe}$ und bieten zuverlässige Unterstützung für zerstörungsfreie Prüfungen und High-End-Fertigungsanwendungen.

9.1.2.5 Technische Anwendung der Hartmetallmagnetik

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall bieten erhebliche Vorteile im Ingenieurwesen, insbesondere bei der zerstörungsfreien Prüfung und Qualitätskontrolle. Seine exzellente Sättigungsmagnetisierung (M_s) und Koerzitivfeldstärke machen es zu einem idealen Werkzeug zur Erkennung innerer Defekte und zur Bewertung von Materialeigenschaften. Durch Optimierung der Zusammensetzung (z. B. Co $10 \% \pm 1 \%$, Ni $8-10 \% \pm 0,1 \%$) und des Prozesses (z. B. Vakuumsintern bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) eignet sich die magnetische Detektionstechnologie von Hartmetall für vielfältige Anwendungsszenarien, darunter Werkzeugqualitätskontrolle, Inspektion von Flugzeugkomponenten, Formenbau, magnetische Aufzeichnungsmedien und elektromagnetische Abschirmmaterialien. Diese Anwendungen demonstrieren voll und ganz das Potenzial der magnetischen Erkennung bei der Verbesserung der Effizienz und Zuverlässigkeit der Qualitätskontrolle von Hartmetall, kombiniert mit hoher Härte ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), Bruchzähigkeit ($K_{1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{m}$), und bieten technischen Support für High-End-Industrien.

Werkzeugqualitätskontrolle

Im Bereich der Werkzeugqualitätskontrolle hat sich WC10Co (Co-Gehalt $10 \% \pm 1 \%$) aufgrund seiner Koerzitivfeldstärke von $120\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$ zum bevorzugten Material zum Erkennen innerer Defekte in Schneidwerkzeugen entwickelt. Proben mit hoher Koerzitivfeldstärke können Risse unter $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ genau identifizieren. Das vibrierende Probenmagnetometer (VSM) analysiert die Magnetfeldänderungen mit einer Erfolgsquote von über $99 \% \pm 1 \%$, wodurch das Risiko eines durch Risse verursachten Werkzeugversagens deutlich reduziert wird. Die Feinkornstruktur ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) verbessert das magnetische Permeabilitätsnetzwerk der Co-Phase, kombiniert mit einer gleichmäßigen Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), was eine hohe Erkennungsempfindlichkeit ($> 95 \% \pm 2 \%$) gewährleistet und die Screening-Effizienz nicht qualifizierter Produkte im Produktionsprozess erheblich verbessert, insbesondere beim Hochgeschwindigkeitsschneiden und bei der Herstellung verschleißfester Werkzeuge. Im Vergleich zur herkömmlichen Magnetpulverprüfung (Empfindlichkeit $\sim 90 \% \pm 2 \%$) verbessert die hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Auflösung von VSM ($< 0,1 \text{ emu/g}$) die Genauigkeit der Defektidentifizierung weiter.

Inspektion von Luftfahrtteilen

Für die Anwendung in Luft- und Raumfahrtkomponenten hat WC8Ni (M_s beträgt etwa $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) eine niedrige Magnetisierung und eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und wird häufig zur Qualitätskontrolle wichtiger Strukturteile verwendet. Ni als schwache ferromagnetische Phase verringert magnetische Störungen, während seine gleichmäßige Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) die Stabilität der magnetischen Prüfung sicherstellt und Poren kleiner als $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ identifizieren kann, was für die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen von Luftfahrtkomponenten wie Turbinenschaufeln von entscheidender Bedeutung ist. Die Lebensdauer von WC8Ni-Proben nach optimiertem Sintern ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) beträgt mehr als 10^4 Stunden $\pm 10^3$ Stunden und übertrifft damit herkömmliche Materialien (wie WC10Co, Lebensdauer $\sim 5 \times 10^3$ Stunden $\pm 10^2$ Stunden) bei weitem. Die magnetische Prüfung kann zudem mit Ultraschalltechnologie kombiniert werden, um die Fehlererkennungsrate weiter auf $> 99 \% \pm 0,5 \%$ zu verbessern und so die Sicherheit von Luftfahrtkomponenten in extremen Umgebungen (wie hohen Temperaturen $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) effektiv zu gewährleisten.

Formenbau

Im Bereich des Formenbaus wird WC10Co (Sintertemperatur $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) häufig bei der Herstellung und Qualitätskontrolle von Präzisionsformen mit hervorragender magnetischer Leistung von M_s von etwa $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ und einer Abweichung des Kohlenstoffgehalts von $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ verwendet. Dank stabiler Magnetisierungsintensität und niedriger Defektrate ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) kann durch VSM-Prüfung eine Genauigkeit von $> 98 \% \pm 1 \%$ erreicht, innere Mikrorisse ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und anormale Kohlenstoffgehalte identifiziert und sichergestellt werden, dass die Genauigkeit der Formenverarbeitung den Mikrometerbereich ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) erreicht. Diese hochpräzise magnetische Erkennungstechnologie verkürzt nicht nur den Formenproduktionszyklus (um $20 \% \pm 2 \%$), sondern reduziert auch die durch Materialfehler verursachte Ausschussrate ($< 1 \% \pm 0,5 \%$). Sie eignet sich besonders gut für Präzisionsstanzformen für Automobilteile und elektronische Komponenten und steigert die Fertigungseffizienz deutlich.

Magnetische Aufzeichnungsmedien

Im Bereich magnetischer Aufzeichnungsmedien werden WC-Co-Ni-Legierungen aufgrund ihrer einstellbaren magnetischen Permeabilität ($> 1000 \pm 50$) zur Herstellung von Datenspeichergeräten verwendet. Durch Anpassung des Co- ($10 \% \pm 1 \%$) und Ni-Gehalts ($8\text{--}10 \% \pm 0,1 \%$) lässt sich die Magnetisierungsintensität ($4\text{--}8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) steuern und in Kombination mit einer feinen Kornstruktur ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) eine Datenaufzeichnung mit hoher Dichte ($> 10^{12} \text{ Bit/Zoll}^2$) erreichen. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Kontinuität des Co-Ni-Netzwerks ($> 95 \% \pm 2 \%$) die magnetische Homogenität gewährleistet und die VSM-Erkennungsgenauigkeit ($\pm 0,1 \text{ emu/g}$) die Qualitätskontrolle unterstützt und das Risiko einer Entmagnetisierung magnetischer Aufzeichnungsmedien ($< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) verringert, sodass es für die Herstellung von Festplatten und Bandspeichergeräten geeignet ist.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektromagnetische Abschirmmaterialien

Bei der Anwendung von elektromagnetischen Abschirmmaterialien bietet WC8Ni mit niedrigem M_s eine wirksame Abschirmwirkung gegen elektromagnetische Wellen und eignet sich für 5G-Basisstationen und Avionikgeräte. M_s liegt bei etwa $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, was magnetische Interferenzen reduziert und in Kombination mit der Korrosionsbeständigkeit von Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) die Abschirmeffizienz über $90 \% \pm 2 \%$ (Frequenz $> 1 \text{ GHz}$) beträgt. Die Dichte ($> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) und gleichmäßige Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) von WC8Ni nach optimiertem Sintern ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) verbessern die magnetische Pfadstabilität und die durch SEM bestätigte Defektrate ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) ist niedrig, was die Lebensdauer ($> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) verlängert und in hochfrequenten elektromagnetischen Umgebungen eine gute Leistung bringt.

Die Anwendungen von Hartmetall in der Magnettechnik profitieren von seiner optimierten Magnetisierung ($4\text{--}8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) und Koerzitivfeldstärke ($100\text{--}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) und zeigen eine hervorragende Leistung bei der Werkzeugqualitätskontrolle, der Inspektion von Luft- und Raumfahrtkomponenten, der Herstellung von Formen, magnetischen Aufzeichnungsmedien und elektromagnetischen Abschirmmaterialien. Die hohe Koerzitivfeldstärke von WC10Co gewährleistet eine hohe Risserkennungs Genauigkeit ($> 99 \% \pm 1 \%$), die niedrige Magnetisierung von WC8Ni unterstützt langlebige Luft- und Raumfahrtkomponenten ($> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) und elektromagnetische Abschirmung (Effizienz $> 90 \% \pm 2 \%$), die stabilen magnetischen Eigenschaften von WC10Co verbessern die Qualität der Formenherstellung (Genauigkeit $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und die WC-Co-Ni-Legierung erweitert die Datenspeicheranwendungen (Dichte $> 10^{12} \text{ Bit/Zoll}^2 \pm 10^{11} \text{ Bit/Zoll}^2$). Zusammen verdeutlichen diese Anwendungen die Schlüsselrolle der magnetischen Erkennung bei der Verbesserung der Zuverlässigkeit und Produktionseffizienz von Hartmetall. Durch eine weitere Optimierung der Zusammensetzung (z. B. Nanokörner $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und des Prozesses (z. B. Mehrphasendesign) wird das magnetische Anwendungspotenzial von Hartmetall in Zukunft auf weitere Hightech-Bereiche (z. B. Quantencomputing, 6G-Technologie) ausgeweitet.

9.2 Verschleißfeste, korrosionsbeständige und leitfähige Verbundeigenschaften von Hartmetall

Die multifunktionale Entwicklung von Hartmetall erfordert eine hervorragende Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrische Leitfähigkeit, um den zunehmend vielfältigen Anforderungen technischer Anwendungen gerecht zu werden. Insbesondere muss die Verschleißfestigkeit eine Verschleißrate von weniger als $0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ erreichen, um die Materialstabilität im Langzeiteinsatz zu gewährleisten. Die Korrosionsbeständigkeit erfordert einen Gewichtsverlust von weniger als $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, um den Einflüssen korrosiver Umgebungen standzuhalten. Die elektrische Leitfähigkeit erfordert einen spezifischen Widerstand von weniger als $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, um eine effiziente elektrische Leistung zu gewährleisten. Diese Eigenschaften bestimmen gemeinsam das Anwendungspotenzial von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hartmetall in Szenarien wie elektronischen Formen (Lebensdauer mehr als 10^6 -mal $\pm 10^5$ -mal), Schiffsausrüstung (Lebensdauer mehr als 5 Jahre $\pm 0,5$ Jahre) und leitfähigen Teilen (Kontaktwiderstand weniger als $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). Das WCTiCNi-System führt TiC (Härte über HV 2000 ± 50) als harte Phase und Ni (Korrosionsstromdichte $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) als korrosionsbeständige Bindungsphase ein und optimiert so effektiv diese Verbundeigenschaften.

Theorie der verschleißfesten, korrosionsbeständigen und leitfähigen Verbundeigenschaften von Hartmetall

Aus theoretischer Sicht lässt sich der Leistungsmechanismus von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen durch Phasendiagramme, elektronische Strukturen und mikroskopische Wechselwirkungen in der Materialwissenschaft erklären. Erstens zeigt die Phasendiagrammanalyse, dass die Löslichkeit zwischen WC und TiC gering ist ($< 5 \% \pm 0,1 \%$), was die Phasendiffusion begrenzt, doch beim Sintern bei hohen Temperaturen bildet der synergistische Effekt der hohen Härte von TiC (ca. HV 2200) und WC (ca. HV 1800) ein starkes hartes Skelett, das die Verschleißfestigkeit deutlich verbessert. Gemäß der Archard-Verschleißgleichung $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (wobei V das Verschleißvolumen, k der Verschleißkoeffizient, F die Last, L die Gleitdistanz und H die Härte ist) reduziert die Hinzufügung der Phase mit hoher Härte den k-Wert, wodurch die Verschleißrate auf unter $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ gehalten wird. Zweitens weist Ni als Bindungsphase aufgrund seiner hohen elektrochemischen Stabilität eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf. Die niedrige Korrosionsstromdichte weist auf eine starke Passivierungsfähigkeit in sauren oder salzhaltigen Umgebungen hin und der Gewichtsverlust kann unter $0,06 \text{ mg/cm}^2$ gehalten werden. Dies hängt damit zusammen, dass das Fermi-Niveau von Ni (ca. 7 eV) nahe an dem von Co (ca. 7,1 eV) liegt, aber eine geringere Oxidationstendenz aufweist. Außerdem hängt die Realisierung der Leitfähigkeit von den Elektronenmigrationseigenschaften der Ni- und WC/TiC-Phasen ab. Das Drude-Modell zeigt, dass die Leitfähigkeit $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (wobei nnn die Trägerdichte, eee die Elektronenladung, τ tau τ die Kollisionszeit und mmm die effektive Masse ist), die hohe Elektronendichte von Ni (ca. 10^{22} cm^{-3}) in Kombination mit der partiellen Leitfähigkeit von WC (ca. 10^5 S/m) den spezifischen Widerstand des Verbundmaterials bei ca. $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ stabil hält, was den Anforderungen an leitfähige Teile entspricht. Mikroskopisch wurde die gleichmäßige Verteilung der WC- und TiC-Partikel (Abweichung $< 0,1 \%$) mittels SEM verifiziert, und die Kontinuität des Ni-Netzwerks ($> 95 \%$) reduzierte den Kontaktwiderstand weiter.

Dieser Abschnitt beginnt mit dem Leistungstest von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen (spezifischer Widerstand $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), kombiniert mit einer Phasendiagrammanalyse (WCTiC-Löslichkeit $< 5 \% \pm 0,1 \%$), Teststandards (ASTM G65, G59) und Fällern, um den Mechanismus und die Anwendung der Verbundleistung zu untersuchen. Beispiel: WC10TiC10Ni: Härte $> \text{HV } 1600 \pm 30$, Gewichtsverlust $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, spezifischer Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

9.2.1.1 Prinzip- und Technologieübersicht von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

WCTiCNi-Verbundwerkstoff ist ein multifunktionales Hartmetall, das die Verschleißfestigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch die Einführung von TiC (Härte über HV 2000 $\pm$ 50, Gehalt 5–10 % $\pm$ 0,1 %) als Hartphase deutlich verbessert, während Ni (Gehalt 8–12 % $\pm$ 0,1 %) als Bindephase die Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit verbessert, um umfassende Leistungsziele zu erreichen: Härte über HV 1600 $\pm$ 30, Gewichtsverlust unter 0,08 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm² und spezifischer Widerstand unter 12 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ $\pm$ 0,1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Diese Eigenschaften ermöglichen es, anspruchsvolle Anwendungsszenarien wie elektronische Formen (Lebensdauer über 10⁶-mal), Schiffsausrüstung (Lebensdauer über 5 Jahre) und leitfähige Teile (Kontaktwiderstand unter 0,1 m Ω) zu erfüllen. Die hohe Härte von TiC rührt von seiner kovalenten Bindungsstruktur her (die TiC-Bindungsenergie beträgt etwa 500 kJ/mol $\pm$ 10 kJ/mol), die die Verschleißfestigkeit durch Gitterverstärkung deutlich verbessert; während die NiO-Passivierungsschicht von Ni (Dicke etwa 10 nm $\pm$ 1 nm) die Korrosionsstromdichte (i_{kor}) durch elektrochemische Stabilität verringert und die Korrosionsbeständigkeit verbessert. Zudem beträgt die Grenzflächenenergie zwischen WC und TiC etwa 1,5 J/m² $\pm$ 0,1 J/m², was zusammen mit der geringen Löslichkeit (< 5 % $\pm$ 0,1 %) eine gute Kompatibilität und strukturelle Stabilität zwischen den Phasen sicherstellt. Verglichen mit dem herkömmlichen WC-Co-System bieten die WCTiCNi-Verbundwerkstoffe durch ihre synergetische Optimierung hinsichtlich Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit einzigartige Vorteile.

9.2.1.2 Herstellungstechnologie und Leistung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Der Herstellungsprozess von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen umfasst mehrere wichtige Schritte: Zuerst wird das Pulver dosiert, wobei die TiC-Partikelgröße auf 0,51 μm $\pm$ 0,01 μm kontrolliert wird, um eine gleichmäßige Dispersion und Verstärkungswirkung sicherzustellen; dann wird eine Kugelmühle (Dauer 40 Stunden $\pm$ 1 Stunde) verwendet, um eine vollständige Mischung und Verfeinerung des Pulvers zu erreichen und den Kontakt zwischen den Partikeln zu optimieren; schließlich wird eine Vakuumsinterung (Temperatur 1450 °C $\pm$ 10 °C, Druck < 10⁻³ Pa $\pm$ 10⁻⁴ Pa) verwendet, um eine dichte Struktur mit hoher Dichte (> 99,5 % $\pm$ 0,1 %) und geringer Porosität (< 0,1 % $\pm$ 0,02 %) zu erhalten. Beispielsweise weist die Probe WC10TiC10Ni unter dem obigen Verfahren eine Härte von HV 1650 $\pm$ 30 und einen Gewichtsverlust von 0,06 mg/cm² auf. $\pm$ 0,01 mg/cm², spezifischer Widerstand 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ $\pm$ 0,1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$, im Vergleich zu WC10Co (Härte HV 1500 $\pm$ 30, Gewichtsverlust 0,09 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm²) stellt eine erhebliche Leistungsverbesserung dar. Dies zeigt, dass die Einführung von TiC und Ni nicht nur die mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften des Materials verbessert, sondern auch seine Leitfähigkeitseigenschaften optimiert, wodurch es für multifunktionale Anwendungen besser geeignet wird. In diesem Abschnitt werden die Leistungsvorteile von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen und ihre Realisierungsmethoden systematisch durch Mechanismusanalyse, Prozessoptimierung und Leistungstests untersucht.

9.2.1.3 Mechanismusanalyse von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Aus mechanistischer Sicht verbessert die hohe Härte von TiC (> HV 2000 $\pm$ 50) die Verschleißfestigkeit durch Gitterverstärkung erheblich, und seine Gitterkonstante beträgt etwa 4,3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{\AA} \pm 0,01 \text{\AA}$, wodurch ein dichtes kovalentes Bindungsnetzwerk gebildet wird. Gemäß der Archard-Verschleißgleichung $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (wobei V das Verschleißvolumen, k der Verschleißkoeffizient, F die Last, L die Gleitdistanz und H die Härte ist) reduziert der hohe H-Wert von TiC effektiv k und kontrolliert die Verschleißrate auf $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ oder weniger. Ni als Bindephase ist elektrochemisch stabil (Korrosionspotenzial E_{corr} beträgt etwa $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE) und bildet auf der Oberfläche eine NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), wodurch die Korrosionsstromdichte deutlich auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ reduziert wird, wodurch der Gewichtsverlust auf unter $0,06 \text{ mg/cm}^2$ gehalten wird, was in Meeresumgebungen oder sauren Medien besonders ausgeprägt ist. Die Grenzflächenbindungsstärke zwischen WC und TiC beträgt mehr als $120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, wodurch Partikelablösung wirksam verhindert wird ($\text{Rate} < 0,05 \% \pm 0,01 \%$), und der moderate Wert der Grenzflächenenergie ($1,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) verbessert die Bindung zwischen den Phasen weiter.

In Bezug auf die Leitfähigkeit trägt hauptsächlich das Ni-Netzwerk (Volumenanteil $10 \% \pm 1 \%$) bei. Seine hohe Elektronendichte (etwa 10^{22} cm^{-3}) bietet gemäß dem Drude-Modell $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (wobei n die Trägerdichte, e die Elektronenladung, τ die Kollisionszeit und m die effektive Masse ist) einen effizienten Elektronenmigrationspfad. Obwohl der höhere spezifische Widerstand von TiC (etwa $50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) den Gesamtwiderstand leicht erhöht, bleibt der spezifische Widerstand des Verbundmaterials aufgrund der Kontinuität des Ni-Netzwerks ($> 95 \% \pm 2 \%$) bei $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und erfüllt damit die Anforderungen an leitfähige Teile. Mikrostrukturanalysen zeigen anhand von SEM-Bildern, dass die TiC-Partikel in WC10TiC10Ni gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die Ni-Phase ein durchgehendes leitfähiges und korrosionsbeständiges Netzwerk bildet. EDS bestätigt einen TiC-Gehalt von $10 \% \pm 0,1 \%$, und XPS-Detektion verifiziert die Bildung einer NiO-Schicht (Ni 2p-Peak liegt bei ca. $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), was den Korrosionsbeständigkeitsmechanismus weiter belegt.

Die Kontrolle der Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessert die Verschleißfestigkeit durch Reduzierung der Verschleißrate um etwa $10 \% \pm 2 \%$, wenn der TiC-Gehalt jedoch $10 \% \pm 0,1 \%$ übersteigt, nimmt die Bruchzähigkeit (K_{1c}) um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ab. Dies liegt daran, dass ein zu hoher TiC-Gehalt zu Spannungskonzentrationen an den Korngrenzen führt und die Leistung durch Optimierung des Verhältnisses ausgeglichen werden muss. Eine Sintertemperatur von $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ stellt eine hohe Dichte und niedrige Defektrate (Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) des Materials sicher. Durch eine Vakuumumgebung und präzise Temperaturkontrolle wird die Gleichmäßigkeit der TiC- und Ni-Phasen gewährleistet und eine durch Hochtemperaturesintern ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) verursachte Phasentrennung oder -seigerung vermieden, wodurch die allgemeine Leistungsstabilität des Verbundmaterials aufrechterhalten wird.

9.2.1.4 Analyse der Faktoren, die die Leistung von WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffen beeinflussen

Die umfassenden Eigenschaften von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen, einschließlich Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrischer Leitfähigkeit, werden maßgeblich

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von mehreren Faktoren beeinflusst, die gemeinsam ihre Leistung in der Praxis bestimmen, indem sie die Mikrostruktur, die Phasenverteilung und die Wechselwirkung zwischen Material und Umgebung verändern. Zu diesen wichtigen Einflussfaktoren zählen TiC- und Ni-Gehalt, Korngröße, Sintertemperatur und die Umgebungsbedingungen. Bereits ein einzelnes Ungleichgewicht kann zu Leistungsabweichungen führen. Im Folgenden wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Leistung von Verbundwerkstoffen anhand theoretischer Mechanismen, experimenteller Daten und Anwendungsfällen detailliert analysiert. Außerdem wird die Optimierungsrichtung untersucht, um die Zuverlässigkeit in Szenarien wie elektronischen Formen, Schiffsausrüstung und leitfähigen Komponenten sicherzustellen.

(1) TiC-Gehalt

Der TiC-Gehalt ist der wichtigste Parameter, der die Verschleißfestigkeit und die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Bei einem TiC-Gehalt von $10\% \pm 0,1\%$ kann die Härte 1600 ± 30 HV überschreiten. Dies liegt daran, dass die hohe Härte von TiC ($> HV 2000 \pm 50$) durch kovalente Bindungen eine gitterverstärkende Wirkung hat (die TiC-Bindungsenergie beträgt etwa 500 kJ/mol). Gemäß der Archard-Verschleißgleichung $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (wobei V das Verschleißvolumen, k der Verschleißkoeffizient, F die Last, L die Gleitdistanz und H die Härte ist) reduziert der hohe H-Wert von TiC effektiv k und hält die Verschleißrate auf einem niedrigen Niveau. Wenn der TiC-Gehalt jedoch $15\% \pm 0,1\%$ übersteigt, verringert sich die Bruchzähigkeit (K_{1c}) um etwa $15\% \pm 3\%$, was auf die Korngrenzenspannungskonzentration und die Schwächung der Zwischenphasenbindungen durch zu viele TiC-Partikel zurückzuführen ist. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Agglomeration von TiC-Partikeln ($> 0,1\%$) diesen Effekt noch verstärkt, was zu einer erhöhten Partikelablösungsrate ($> 0,05\%$) führt. Beispielsweise beträgt der K_{1c} -Wert der WC15TiC10Ni-Probe aufgrund ihres hohen TiC-Gehalts nur $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, während WC10TiC10Ni $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ erreicht. Dies deutet darauf hin, dass ein moderater TiC-Gehalt der Schlüssel zur Leistungsoptimierung ist. Zukünftig können Härte und Zähigkeit durch eine Reduzierung des TiC-Gehalts auf 8–10 % und eine Optimierung der Partikelverteilung ausgeglichen werden.

(2) Ni-Gehalt

Der Ni-Gehalt spielt eine entscheidende Rolle für die Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Wenn der Ni-Gehalt $10\% \pm 1\%$ beträgt, bleibt der spezifische Widerstand unter $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Das liegt daran, dass das Ni-Netzwerk (Volumenanteil $10\% \pm 1\%$) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ gemäß dem Drude-Modell einen effizienten Elektronenmigrationspfad bietet und die Elektronendichte (ca. 10^{22} cm^{-3}) sicherstellt, dass die Leitfähigkeit den Anforderungen leitfähiger Teile entspricht. Gleichzeitig verringert die NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10 \text{ nm}$) von Ni durch elektrochemische Stabilität die Korrosionsstromdichte ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). Wenn der Ni-Gehalt jedoch $12\% \pm 1\%$ übersteigt, verringert sich die Härte um ca. $10\% \pm 2\%$. Dies liegt daran, dass ein zu hoher Ni-Gehalt die Stützfunktion der Hartphase schwächt und so die Korngrenzenfestigkeit verringert. EDS-Analysen zeigen, dass eine Ni-Phasensegregation ($> 0,5\%$) die Gleichmäßigkeit des Materials zusätzlich beeinträchtigt und die lokale Korrosionsempfindlichkeit erhöht. Daher muss bei der Optimierung des Ni-Gehalts ein Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit, mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit angestrebt werden. 8–12 % gelten üblicherweise als

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

idealer Bereich. Ein zu hoher Ni-Gehalt muss möglicherweise mit anderen Legierungselementen (z. B. Co, < 5 %) kombiniert werden, um die Härte zu erhalten.

(3) Korngröße

Die Korngröße hat einen erheblichen Einfluss auf die Verschleißfestigkeit und die Gesamtstabilität. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Korngrenzendichte hoch ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), was die Verschleißrate niedrig hält, indem das Eindringen von Schleifpartikeln behindert und die Partikelablösung reduziert wird (Rate < 0,05 %). Diese feine Kornstruktur verbessert auch die gleichmäßige Verteilung von TiC und WC. Eine SEM-Beobachtung zeigt, dass die Korngrenzenbindungskraft $> 120 \text{ MPa}$ beträgt, was die Wahrscheinlichkeit der Mikrorissbildung verringert. Wenn die Korngröße jedoch $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ überschreitet, steigt die Verschleißrate um etwa $15 \% \pm 3 \%$. Das liegt daran, dass grobe Körner die Anzahl der Korngrenzen verringern, die Verschleißfestigkeit reduzieren und das Risiko der Mikrorissbildung erhöhen. Die Korngröße lässt sich üblicherweise durch die Zugabe von Inhibitoren (z. B. VC, < 1 %) und die Optimierung der Kugelmahlzeit ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) steuern, um die Leistungsstabilität zu gewährleisten. Zukünftig könnten nanometergroße Körner ($< 0,3 \mu\text{m}$) erforscht werden, um den Verschleiß weiter zu reduzieren.

(4) Sintertemperatur

Die Sintertemperatur ist entscheidend für die Materialdichte und die Phasenverteilung. Bei $1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erreichen WCTiCNi-Verbundwerkstoffe eine hohe Dichte ($> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) und geringe Porosität ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Dies gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung der TiC- und Ni-Phasen (Abweichung < 0,1 %). Dies wird durch Vakuumintern (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa}$) erreicht, wodurch Oxidation und Defekte wirksam reduziert werden. Übersteigt die Sintertemperatur jedoch $1500 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nimmt die Entmischung um etwa $10 \% \pm 2 \%$ zu, die Migration der Ni-Phase führt zu erhöhter lokaler Korrosionsempfindlichkeit, und Härte und Leitfähigkeit können um 5–8 % abnehmen. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Entmischungszone ($> 0,5 \%$) die Leistungskonstanz erheblich beeinträchtigt und die Porosität ($> 0,15 \%$) erhöht. Daher gelten $1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ als optimale Sintertemperatur. Durch die Kombination von abgestuftem Sintern oder heißisostatischem Pressen (HIP) lässt sich die Mikrostruktur weiter optimieren und durch eine präzise Temperaturkontrolle ($\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) lässt sich das Risiko einer Phasentrennung zukünftig verringern.

(5) Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit. In einer stark sauren Umgebung mit einem pH-Wert von $< 2 \pm 0,1$ nimmt die Stabilität der NiO-Passivierungsschicht ab, die Korrosionsstromdichte (i_{corr}) steigt um etwa $20 \% \pm 5 \%$ und der Gewichtsverlust kann auf $0,10 \text{ mg/cm}^2$ ansteigen, was mit der Abweichung des Korrosionspotenzials (E_{corr}) von Ni im elektrochemischen Polarisationstest (ASTM G59) zusammenhängt. SEM-Beobachtungen zeigen, dass die Tiefe der Korrosionsgrube $0,5 \mu\text{m}$ erreichen kann. In einer Salzsprühumgebung mit einer NaCl-Konzentration von mehr als $5 \% \pm 0,1 \%$ steigt der Gewichtsverlust um etwa $15 \% \pm 3 \%$, was darauf zurückzuführen ist, dass Chloridionen die lokale Korrosion beschleunigen und die Passivierungsschicht der Ni-Phase beschädigt wird. Die XPS-Analyse zeigt, dass die Dicke der NiO-Schicht abnimmt ($< 5 \text{ nm}$). Zur Optimierung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umweltfaktoren ist eine Oberflächenbeschichtung (z. B. CrN, Dicke 2 μm) oder Legierung (z. B. Zugabe von Molybdän, < 2 %) erforderlich, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern und die Lebensdauer zu verlängern. Insbesondere bei Schiffsausrüstungen kann durch eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit der Gewichtsverlust unter 0,05 mg/cm^2 gehalten werden.

9.2.1.5 Strategie zur Leistungsoptimierung von WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffen

Um eine Härte von über HV 1600 $\pm$ 30 zu erreichen, sollte der Gewichtsverlust weniger als 0,08 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm$ 0,01 mg/cm^2 betragen und unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeit, um den Anforderungen multifunktionaler Anwendungen gerecht zu werden, erfordert die Leistungsoptimierung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen eine umfassende Betrachtung von Zusammensetzungsdesign, Herstellungsprozess, Mikrostrukturregulierung und Oberflächenbehandlung. Diese Strategien zielen darauf ab, die hervorragende Leistung der Materialien in Szenarien wie elektronischen Formen (Lebensdauer > 10^6 -mal), Schiffsausrüstung (Betriebsdauer > 5 Jahre) und leitfähigen Teilen (Kontaktwiderstand < 0,1 $\text{m}\Omega$) sicherzustellen, indem die Synergie von Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrischer Leitfähigkeit verbessert wird. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Erklärung des Optimierungsschemas und seiner Implementierungseffekte basierend auf theoretischen Grundlagen, Prozessoptimierung und Testüberprüfung.

(1) Optimierung der Zusammensetzung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Die Optimierung der Zusammensetzung ist ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Leistung von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen. Der TiC-Gehalt wird im Bereich von 5–10 % $\pm$ 0,1 % festgelegt. Die hohe Härte von TiC (> HV 2000 $\pm$ 50) sorgt für eine Gitterverstärkung $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ durch kovalente Bindungen (die TiC-Bindungsenergie beträgt etwa 500 kJ/mol). Gemäß der Archard-Verschleißgleichung (wobei V das Verschleißvolumen, k der Verschleißkoeffizient, F die Last, L die Gleitdistanz und H die Härte ist) reduziert der hohe H-Wert effektiv die Verschleißrate. Dieser Bereich stellt sicher, dass die Härte über HV 1600 erreicht, während die Abnahme der Bruchzähigkeit (K_{1c}) durch übermäßiges TiC (> 15 %) vermieden wird. Der Ni-Gehalt wird auf 8–10 % $\pm$ 1 % kontrolliert. Die NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim$ 10 nm) aus Ni verringert den Korrosionsgewichtsverlust durch elektrochemische Stabilität ($i_{\text{korr}} < 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$) auf unter 0,06 mg/cm^2 , während ihre hohe Elektronendichte (ca. 10^{22} cm^{-3}) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ einen spezifischen Widerstand von weniger als 12 $\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm$ 0,1 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ gemäß dem Drude-Modell unterstützt. Durch die geeignete Zugabe von Spurenlegierungselementen (wie VC, < 1 %) kann die gleichmäßige Verteilung von TiC und Ni weiter optimiert (Abweichung < 0,1 %) und die Zwischenphasenbindungskraft (> 120 MPa) erhöht werden, wodurch eine umfassende Leistungsbalance erreicht wird.

(2) Sinterprozess von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Der Sinterprozess beeinflusst direkt die Dichte und Phasenverteilung des Materials. Die Sintertemperatur beträgt 1450 $^{\circ}\text{C} \pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, um eine durch hohe Temperaturen (> 1500 $^{\circ}\text{C}$) verursachte Ni-Segregation (> 0,5 %) zu vermeiden. Die SEM-Analyse zeigt, dass bei dieser Temperatur die TiC- und Ni-Phasen gleichmäßig verteilt sind (Abweichung < 0,1 % $\pm$ 0,02 %) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Porosität gering ist ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Vakuumsintern (Druck $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) gewährleistet eine Dichte von über $99,5 \% \pm 0,1 \%$, reduziert Oxidation und Defekte und verbessert die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Theoretisch verkürzt eine hohe Dichte den Eindringweg korrosiver Medien, wodurch der Gewichtsverlust weiter reduziert werden kann. Durch den Einsatz der abgestuften Sintertechnologie (Vorsintern bei 1200°C und anschließende Erhöhung auf 1450°C) oder der Heißisostatischen Presstechnologie (HIP) kann die Mikrostruktur optimiert, abnormales Kornwachstum verhindert, die Verschleißrate um etwa $5\text{--}8 \%$ gesenkt und durch Anlassen bei niedriger Temperatur ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) innere Spannungen eliminiert, die NiO-Passivierungsschicht stabilisiert und die Lebensdauer verlängert werden.

(3) Kornkontrolle von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Die präzise Kontrolle der Korngröße ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften. Die Korngröße von WC und TiC wird auf $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert. Die hohe Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) verhindert das Eindringen von Schleifpartikeln und das Ablösen von Partikeln (Rate $< 0,05 \%$). Gemäß der Theorie der Korngrenzenverstärkung verbessern feine Körner die gleichmäßige Verteilung der harten Phasen. Die SEM-Beobachtung zeigt, dass die Korngrenzenbindungskraft $> 120 \text{ MPa}$ beträgt, wodurch die Verschleißrate niedrig gehalten wird und gleichzeitig Härte und Zähigkeit im Gleichgewicht bleiben ($K_{1c} > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Wenn die Korngröße $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ überschreitet, verringert sich die Anzahl der Korngrenzen, die Verschleißrate kann um $15 \% \pm 3 \%$ zunehmen und die Zähigkeit nimmt ab. Es ist notwendig, eine Kornverfeinerung durch Zugabe von Inhibitoren (z. B. VC, $0,5 \%\text{--}1 \%$) und eine Verlängerung der Kugelmahlzeit ($40 \text{ Stunden} \pm 1 \text{ Stunde}$) sicherzustellen. Zukünftig können nanoskalige Körner ($< 0,3 \mu\text{m}$) erforscht werden, um die Verschleißrate weiter zu senken und die Härte zu erhöhen. Dabei sollten jedoch die Produktionskosten und die Prozesskomplexität berücksichtigt werden.

(4) Oberflächenbehandlung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Die Oberflächenbehandlung ist ein wirksames Mittel, um Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu optimieren. Durch Diamantpolieren oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP) wird die Oberflächenrauheit (R_a) auf $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert, Oberflächendefekte und Mikrorisse reduziert und die Oberfläche theoretisch geglättet, um die Anhaftung von Schleifpartikeln und das Eindringen von korrosiven Medien zu verringern. Laut Kontaktmechanik kann eine Verringerung der Oberflächenrauheit um $10 \% \pm 2 \%$ die Verschleißrate um etwa $10 \% \pm 2 \%$ senken und der Kontaktwiderstand sinkt ebenfalls ($< 0,1 \text{ m}\Omega$), wodurch die Leistung leitfähiger Teile verbessert wird. Nach dem Polieren wird eine Ultraschallreinigung durchgeführt, um Rückstände zu entfernen, die Integrität der NiO-Passivierungsschicht (Dicke $> 10 \text{ nm}$) weiter zu verbessern und den Gewichtsverlust unter $0,06 \text{ mg/cm}^2$ zu stabilisieren. In Zukunft können korrosionsbeständige Beschichtungen (wie TiN, Dicke $1,5\text{--}2 \mu\text{m}$) oder Plasmanitrierbehandlungen entwickelt werden, um die Korrosionsbeständigkeit in extremen Umgebungen (wie $\text{pH} < 2$) weiter zu verbessern.

(5) Prüfvorschriften für WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Leistungsüberprüfung wird gemäß internationalen Normen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Daten sicherzustellen. Der Verschleißfestigkeitstest zur Bewertung der Verschleißrate basiert auf ASTM G65 (Trockensand-/Gummirad-Verschleißtest). Der Korrosionsbeständigkeitstest zur Messung des Gewichtsverlusts und von i_{corr} basiert auf ASTM G59 (elektrochemischer Polarisierungstest). Die Vier-Sonden-Methode wird zur Messung des spezifischen Widerstands verwendet (Genauigkeit $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Die Testprobengröße beträgt $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Die Umgebungsbedingungen werden auf $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ kontrolliert und die Luftfeuchtigkeit beträgt $< 65 \%$. Der Durchschnittswert wird nach 5-maliger Wiederholung der Messung ermittelt. Die Mikrostruktur und die Phasenverteilung werden durch eine Kombination aus SEM und EDS analysiert (Abweichung $< 0,1 \%$). Beispielsweise erreicht die Härte nach dem Sintern von WC10TiC10Ni bei $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $\text{HV } 1650 \pm 30$ und der Gewichtsverlust beträgt $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und der spezifische Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, was besser ist als die Zielwerte und die Wirksamkeit der Optimierungsstrategie beweist.

(6) Umfassende Optimierungseffekte und Anwendungsaussichten

Durch den Synergieeffekt der oben genannten Strategien weist die bei $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ gesinterte WC10TiC10Ni-Probe mit einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m}$ und $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m}$ eine Härte von $\text{HV } 1650$, einen Gewichtsverlust von $0,06 \text{ mg/cm}^2$ und einen spezifischen Widerstand von $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ auf, was besser ist als das ursprüngliche Ziel. Die Verschleißfestigkeit erfüllt die Anforderungen für elektronische Formen (Lebensdauer $> 10^6$ -mal), die Korrosionsbeständigkeit unterstützt Schiffsausrüstung (Betriebsdauer > 5 Jahre) und die Leitfähigkeit ist für leitfähige Teile geeignet (Kontaktwiderstand $< 0,1 \text{ m}\Omega$). Im Vergleich zu WC10Co (Härte $\text{HV } 1500$, Gewichtsverlust $0,09 \text{ mg/cm}^2$) bietet das WCTiC10Ni-System offensichtliche Vorteile hinsichtlich der Vielseitigkeit. Durch die Einführung der Nano-TiC- ($< 100 \text{ nm}$) oder Plasmasinter-Technologie (SPS) kann die Härte zukünftig noch weiter auf über $\text{HV } 1700$ gesteigert und der Gewichtsverlust auf $0,05 \text{ mg/cm}^2$ reduziert werden, wodurch sich das Anwendungspotenzial in den Bereichen Luftfahrt und High-End-Elektronik erweitert.

Die Leistungsoptimierung von WCTiC10Ni-Hartmetall gleicht Härte und Korrosionsbeständigkeit durch den TiC-Gehalt ($5\text{--}10 \%$) und den Ni-Gehalt ($8\text{--}10 \%$) aus. Vakuumsintern bei $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ gewährleistet Dichte ($> 99,5 \%$) und Gleichmäßigkeit, eine Kornkontrolle von $0,51 \mu\text{m}$ verbessert die Verschleißfestigkeit, Oberflächenpolitur ($\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m}$) reduziert den Verschleiß, und ASTM-Standardprüfungen bestätigen die Einhaltung der Normen. Am Beispiel von WC10TiC10Ni erfüllen dessen Härte $\text{HV } 1650$, der Gewichtsverlust $0,06 \text{ mg/cm}^2$ und der spezifische Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ multifunktionale Anforderungen. Nanotechnologie und Oberflächenmodifizierung können die Anwendbarkeit in extremen Umgebungen zukünftig weiter verbessern.

9.2.1.6 Technische Anwendungen von WCTiC10Ni-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

WCTiC10Ni-Hartmetall-Verbundwerkstoffe haben sich aufgrund ihrer hervorragenden Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrischen Leitfähigkeit in verschiedenen technischen Bereichen bewährt. Durch die Optimierung des TiC-Ni-Verhältnisses und ein **CTIA**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

ausgeklügeltes Herstellungsverfahren erfüllt das Material erfolgreich die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie Elektronikformen, Schiffsausrüstung und leitfähiger Kontakte. Diese Anwendungen bestätigen nicht nur die multifunktionalen Eigenschaften von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen, sondern legen auch den Grundstein für ihren breiten Einsatz in extremen Umgebungen und der Präzisionsfertigung. Im Folgenden werden der technische Anwendungswert und die Rolle des Werkstoffs für die Branchenentwicklung anhand von Anwendungsszenarien, Leistungsvorteilen und Praxisbeispielen detailliert erläutert.

(1) WCTiCNi Hartmetall-Verbundwerkstoff-Elektronikform

Im Bereich der Elektronikformen ist WC10TiC10Ni aufgrund seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit und hohen Härte die ideale Wahl. Das Material basiert auf einer feinen Körnung und weist eine sehr hohe Härte auf. Die Zugabe von TiC reduziert den Verschleiß deutlich und gewährleistet die Langzeitstabilität der Form beim Hochfrequenzstanzen. Seine Lebensdauer beträgt über eine Million Mal und übertrifft damit die Leistung herkömmlicher Materialien deutlich. Darüber hinaus verringern die gleichmäßige Verteilung und der Korrosionsschutz der Ni-Phase das Risiko von Formversagen durch Korrosion in feuchter Fabrikumgebung. Daher findet WC10TiC10Ni breite Anwendung bei der Herstellung von Präzisionselektronikkomponenten, beispielsweise bei der Herstellung von Handygehäusen und Steckerformen, und verbessert so die Produktionseffizienz und Produktqualität deutlich.

(2) WCTiCNi-Hartmetall-Verbundteile für Schiffsausrüstung

Für Anwendungen in der Schiffsausrüstung eignet sich WC8TiC10Ni dank seiner hervorragenden Korrosions- und Verschleißfestigkeit. Durch Oberflächenpolitur wird die Oberfläche sehr glatt, wodurch das Eindringen korrosiver Medien reduziert und der Gewichtsverlust gering gehalten wird. Dadurch erfüllt es die Anforderungen in Salzsprühumgebungen und hat eine Lebensdauer von über fünf Jahren. Ni als Bindephase sorgt für hohe Beständigkeit gegen Meerwassererosion, während der TiC-Gehalt die Härte des Materials erhöht und so die Langlebigkeit von Bohrgeräten und Schiffskomponenten gewährleistet. Darüber hinaus erhält der moderate Ni-Gehalt die Leitfähigkeit des Materials und unterstützt so die Anforderungen an elektrische Verbindungen, beispielsweise von Sensoren und Steuerungssystemen für Offshore-Plattformen, und beweist seine Zuverlässigkeit in rauen Umgebungen.

(3) Leitfähige Kontakte aus WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoff

Für leitfähige Kontakte wird WC10TiC10Ni aufgrund seiner hervorragenden elektrischen Eigenschaften bevorzugt. Der spezifische Widerstand ist sehr niedrig, und das Ni-Netzwerk sorgt für einen effizienten Stromfluss. Der Kontaktwiderstand ist ebenfalls sehr gering und erfüllt die Anforderungen von Hochfrequenzschaltern und mikroelektronischen Geräten. Die Lebensdauer beträgt über eine Million Mal, dank der hohen Härte von TiC, die den Verschleiß reduziert. Die Korrosionsbeständigkeit von Ni bietet zusätzlichen Schutz in feuchten oder sauren Umgebungen. Dadurch eignet es sich gut für elektronische Steuergeräte in Kraftfahrzeugen und Industrielerais und reduziert Lichtbogenverschleiß und Kontaktausfälle deutlich.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) WCTiCNi-Beschichtung für Flugzeugteile aus Hartmetallverbundwerkstoff

WCTiCNi-Verbundwerkstoffe bieten auch großes Potenzial für die Beschichtung von Flugzeugkomponenten. WC10TiC8Ni wird beispielsweise für verschleißfeste Beschichtungen von Turbinenschaufeln und Triebwerken eingesetzt. Seine hohe Härte und Temperaturbeständigkeit (bis über 800 °C) verlängern die Lebensdauer der Komponenten deutlich. TiC bietet zusätzlichen Oberflächenschutz und reduziert so den Verschleiß durch schnelle Luftströmungen und Partikelabrieb. Die Korrosionsbeständigkeit von Ni gewährleistet die Stabilität der Beschichtung in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit und Salznebel und verlängert so die Wartungszyklen. Die Beschichtung weist zudem eine gewisse Leitfähigkeit auf, unterstützt die Erdungsanforderungen von Avionikgeräten und eignet sich gut für Flugzeugtriebwerke und Propellerkomponenten, was die allgemeine Flugsicherheit verbessert.

(5) WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoff-Ölbohrwerkzeuge

In der Ölbohrindustrie wird WC12TiC10Ni aufgrund seiner hervorragenden Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit häufig für Bohrer und Schneidwerkzeuge verwendet. TiC erhöht die Verschleißfestigkeit des Materials und ermöglicht so einen langen Einsatz in Gesteinsformationen mit hoher Härte. Die Zugabe von Ni verbessert die Korrosionsbeständigkeit des Werkzeugs in schwefel- und chlorhaltigen Umgebungen deutlich, hält den Gewichtsverlust sehr gering und gewährleistet so Bohreffizienz und Werkzeuglebensdauer. Die Oberflächenpolitur reduziert das Verschleiß- und Korrosionsrisiko zusätzlich und ermöglicht so eine gute Leistung bei Tiefsee- und Onshore-Bohrungen, reduziert die Austauschhäufigkeit und senkt die Betriebskosten.

(6) Medizinische Geräte aus WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffen

WC8TiC5Ni findet auch im Bereich der Medizintechnik zunehmend Verwendung, beispielsweise bei der Herstellung von orthopädischen Skalpellen und Zahnbohrern. Die hohe Härte von TiC sorgt für eine stets scharfe Schneide und erfüllt die Anforderungen der Präzisionschirurgie. Die Biokompatibilität und Korrosionsbeständigkeit von Ni verringern das Korrosionsrisiko in der Körperflüssigkeitsumgebung. Der geringe Gewichtsverlust verlängert die Lebensdauer des Instruments. Darüber hinaus erfüllt der niedrige Widerstand die Leitfähigkeitsanforderungen bestimmter elektrochirurgischer Instrumente, bewährt sich in sterilen und feuchten Umgebungen und erhöht die Sicherheit und Effizienz chirurgischer Eingriffe.

(7) Umfassende Vorteile und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Diese Anwendungen demonstrieren die synergetische Optimierung von WCTiCNi-Verbundwerkstoffen hinsichtlich Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrischer Leitfähigkeit. In elektronischen Formen verlängern die hohe Härte und der geringe Verschleiß die Lebensdauer; in Schiffsausrüstungen unterstützt die Korrosionsbeständigkeit von Ni den Langzeitbetrieb; in leitfähigen Kontakten erfüllen der niedrige Widerstand und die lange Lebensdauer hohe Zuverlässigkeitsanforderungen; in Beschichtungen für Luftfahrtkomponenten verlängern die hohe Temperaturbeständigkeit und Verschleißfestigkeit die Lebensdauer; in Ölbohrwerkzeugen verbessern Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Arbeitseffizienz; in medizinischen Geräten gewährleisten Biokompatibilität und hohe Härte die Sicherheit. Im Vergleich zu herkömmlichen WC-Co-Werkstoffen bietet das WCTiCNi-System klare Vorteile hinsichtlich der Vielseitigkeit. Beispielsweise ist der Gewichtsverlust von WC10Co höher als der von WC10TiC10Ni, und die Korrosionsbeständigkeit ist deutlich verbessert.

WCTiCNi bietet zudem erweitertes Anwendungspotenzial. Beispielsweise kann seine hohe Härte in der verschleißfesten Schicht von Eisenbahnschienen den Verschleiß reduzieren; in tragbaren elektronischen Geräten ermöglicht sein niedriger Widerstand flexible leitfähige Komponenten. Durch die Anpassung der Materialzusammensetzung und der Oberflächenbehandlungstechnologie kann das Anwendungsspektrum in den Bereichen Energie, Medizin und Transport zukünftig weiter ausgebaut werden.

WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffe eignen sich gut für elektronische Formen, Schiffsausrüstung, leitfähige Kontakte, Beschichtungen von Flugzeugkomponenten, Ölbohrwerkzeuge und medizinische Geräte. Die hohe Härte, der geringe Verschleiß und die lange Lebensdauer von WC10TiC10Ni erfüllen die Anforderungen an Formen, der geringe Gewichtsverlust und die lange Lebensdauer von WC8TiC10Ni unterstützen maritime Anwendungen, der niedrige Widerstand und die hohe Kontaktleistung von WC10TiC10Ni gewährleisten Kontaktzuverlässigkeit, die hohe Temperaturbeständigkeit von WC10TiC8Ni verbessert die Lebensdauer von Flugzeugkomponenten, die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit von WC12TiC10Ni optimiert die Bohrleistung und die Biokompatibilität von WC8TiC5Ni unterstützt medizinische Geräte. Diese Anwendungen bestätigen die umfassenden Vorteile von WCTiCNi hinsichtlich Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit. Durch Prozessoptimierungen und Materialinnovationen kann sein Anwendungspotenzial in verschiedenen technischen Bereichen zukünftig weiter ausgebaut werden.

9.2.2 Leistungstest von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

9.2.2.1 Prinzip der Leistungsprüfung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Leistungstests sind das wichtigste Mittel zur Bewertung der Gesamtleistung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen. Sie quantifizieren Härte (Zielwert $> HV\ 1600 \pm 30$), Verschleißrate (Zielwert $< 0,06\ mm^3/N \cdot m \pm 0,01\ mm^3/N \cdot m$), Gewichtsverlust (Zielwert $< 0,08\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$) und spezifischen Widerstand (Zielwert $< 12\ \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1\ \mu\Omega \cdot cm$) und untersuchen systematisch Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit. Diese Indikatoren spiegeln die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit des Materials in der Praxis wider. Zu den Prüfnormen gehören ASTM G65 (Trockensandverschleißtest) zur Bewertung der Verschleißfestigkeit, ASTM G59 (elektrochemischer Korrosionstest) zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit und die Vier-Sonden-Methode zur Messung der Leitfähigkeit. Ziel ist es, die hervorragende Leistung von WCTiCNi-Materialien im Elektronikbereich (z. B. Kontaktwiderstand $< 0,1\ m\Omega \pm 0,01\ m\Omega$) und in der Meeresumwelt (z. B. Lebensdauer $> 5\ Jahre \pm 0,5\ Jahre$) sicherzustellen. Das Prüfverfahren liefert nicht nur quantitative Daten, sondern bildet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auch eine wissenschaftliche Grundlage für Materialoptimierung und Prozessverbesserung.

9.2.2.2 Methoden und Geräte zur Leistungsprüfung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Leistungstests basieren auf modernen Prüfgeräten und standardisierten Verfahren. Der Vickers-Härteprüfer führt eine Eindruckmessung auf der Materialoberfläche mit einer Last von $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ durch, um den Härtewert genau zu ermitteln und den Beitrag der hohen Härte ($> \text{HV } 2000$) der TiC-Phase zur Verschleißfestigkeit widerzuspiegeln. Der Verschleißprüfer simuliert tatsächliche Arbeitsbedingungen mit einer Last von $130 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ und quantifiziert die Verschleißrate durch den Trockensandverschleißtest (ASTM G65). Das Scheuern und die Reibung der Sandpartikel unter den Testbedingungen simulieren Umgebungen mit hohem Verschleiß, wie beispielsweise die Einsatzszenarien von elektronischen Formen und Ölbohrwerkzeugen. Die elektrochemische Arbeitsstation führt Korrosionstests (ASTM G59) mit einer potenziellen Genauigkeit von $\pm 0,001 \text{ V}$ durch und bewertet die Korrosionsbeständigkeit der Ni-Phase und die Stabilität ihrer NiO-Passivierungsschicht durch Messung des Gewichtsverlusts und der Korrosionsstromdichte in einer 3,5%igen NaCl-Lösung. Die Vier-Sonden-Regel bestimmt den spezifischen Widerstand präzise durch Anlegen eines konstanten Stroms und Messen des Spannungsabfalls, der den Leitfähigkeitsbeitrag des Ni-Netzwerks widerspiegelt. Die Probengröße beträgt üblicherweise $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Die Testumgebung wird auf $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine Luftfeuchtigkeit von $< 65 \text{ } \%$ geregelt, um Einflüsse durch Umweltfaktoren zu reduzieren. Der Test wird fünfmal wiederholt und der Durchschnittswert ermittelt, um die Zuverlässigkeit und statistische Signifikanz der Daten sicherzustellen.

(1) Datenanalyse und Leistungsüberprüfung

Die Testdaten zeigen die Leistungsvorteile von WCTiCNi-Werkstoffen durch umfassende Analyse. Am Beispiel von WC10TiC10Ni erreicht seine Härte $\text{HV } 1650 \pm 30$, was darauf hindeutet, dass der TiC-Gehalt ($10 \text{ } \% \pm 0,1 \text{ } \%$) und die Feinkornstruktur ($0,51 \text{ } \mu\text{m}$) die Verschleißfestigkeit effektiv verbessern, mit einer Verschleißrate von $0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, die besser als der Zielwert ist und eine Überlegenheit beim Hochfrequenzstanzen und -schneiden zeigt. Der Gewichtsverlust von $0,06 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ist niedriger als $0,08 \text{ mg}/\text{cm}^2$, was beweist, dass der Ni-Gehalt ($10 \text{ } \% \pm 1 \text{ } \%$) durch die NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10 \text{ nm}$) einen guten Korrosionsschutz bietet und die langfristigen Betriebsanforderungen von Schiffsausrüstung und medizinischen Geräten erfüllt. Der spezifische Widerstand beträgt $11 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und ist niedriger als $12 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Dies weist darauf hin, dass die Kontinuität des Ni-Netzwerks ($> 95 \text{ } \%$) eine effiziente Leitfähigkeit gewährleistet und die Anwendung von leitfähigen Kontakten und in der Avionik unterstützt. SEM- und EDS-Analysen bestätigen ferner die gleichmäßige Verteilung der TiC-Partikel (Abweichung $< 0,1 \text{ } \%$) und die Stabilität der Ni-Phase. Durch XPS-Erkennung wird die Bildung der NiO-Schicht verifiziert (Ni 2p-Spitzenposition $\sim 854 \text{ eV}$), was die Leistungsdaten mikroskopisch untermauert.

(2) Anwendungsorientierte und erweiterte Verifikation

Die Testergebnisse leiten die Anwendung von WCTiCNi-Werkstoffen in spezifischen technischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Szenarien direkt an. In elektronischen Formen gewährleisten Härte und geringer Verschleiß eine Lebensdauer von über einer Million Mal; in Schiffsausrüstung ermöglicht der geringe Gewichtsverlust eine Lebensdauer von über fünf Jahren; in leitfähigen Kontakten erfüllt der niedrige Widerstand hohe Zuverlässigkeitsanforderungen. Darüber hinaus wurden die Leistungstests auch auf andere Bereiche ausgeweitet, wie beispielsweise die Beschichtung von Flugzeugkomponenten. Die hohe Härte und die hohe Temperaturbeständigkeit ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) von WC10TiC8Ni haben seine Anwendbarkeit in Turbinenschaufeln durch Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeitstests bestätigt; bei Ölbohrwerkzeugen haben die geringe Verschleißrate und Korrosionsbeständigkeit von WC12TiC10Ni seine Vorteile in schwefelhaltigen Umgebungen durch Simulationstests bestätigt; bei medizinischen Geräten unterstützen der geringe Gewichtsverlust und die Biokompatibilität von WC8TiC5Ni durch Korrosionstests den Einsatz in orthopädischen Instrumenten. Testdaten bieten zudem eine Grundlage für Optimierungen. Beispielsweise führt eine zu große Korngröße ($> 2\text{ }\mu\text{m}$) zu einem um 15 % höheren Verschleiß, und eine zu hohe Sintertemperatur ($> 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) kann die Entmischung um 10 % erhöhen, was durch Prozessanpassungen kontrolliert werden muss. Zukünftig können dynamische Verschleißtests und Langzeitkorrosionssimulationen eingesetzt werden, um die Leistungsfähigkeit von Materialien unter extremen Bedingungen weiter zu überprüfen.

9.2.2.3 Analyse des Leistungstestmechanismus von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen

Die Analyse des Leistungstestmechanismus von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen zielt darauf ab, die mikroskopischen Mechanismen hinter Härte, Verschleißrate, Korrosionsverhalten und spezifischem Widerstand detailliert aufzudecken. Diese Eigenschaften bestimmen gemeinsam die Leistung von Materialien in technischen Anwendungen wie Elektronik, Meer und Leitfähigkeit. Durch die Kombination experimenteller Daten und mikroskopischer Beobachtung werden die verstärkende Wirkung von TiC, der Beitrag von Ni zu Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit sowie der Einfluss von Korngröße und Phasenverteilung analysiert, um theoretische Unterstützung für die Optimierung der Materialeistung und die Ausweitung von Anwendungen zu liefern. In diesem Abschnitt werden die Aspekte Härteprüfung, Verschleißmechanismus, Korrosionsverhalten und spezifischer Widerstandseigenschaften ausführlich erörtert und der Mechanismus in Kombination mit tatsächlichen Testergebnissen überprüft.

(1) Härteprüfmechanismus

Der Härte test spiegelt hauptsächlich die verstärkende Wirkung von TiC auf WCTiCNi-Verbundwerkstoffe wider. Die inhärente Härte von TiC übersteigt $\text{HV } 2000 \pm 50$, was auf seine enge kovalente Bindungsstruktur zurückzuführen ist. Diese hohe Härte verbessert die Gesamtleistung des Materials durch Gitterverstärkung erheblich. Am Beispiel von WC10TiC10Ni erreicht seine Härte $\text{HV } 1650 \pm 30$, was durch das Zusammenspiel von WC (ca. $\text{HV } 1800 \pm 30$) und TiC erreicht wird. WC sorgt als hauptsächliche Hartphase für die Grundhärte, und die Zugabe von TiC erhöht die Druckfestigkeit der Oberfläche zusätzlich. Im Test wurde ein Vickers-Härteprüfer (Last $10\text{ kg} \pm 0,1\text{ kg}$) verwendet, um die Oberflächeneindrückung zu messen. Die Feinkornstruktur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessert die Verformungsbeständigkeit zusätzlich durch Erhöhung der Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$), wodurch die Härte gleichmäßig verteilt wird und lokale Erweichungen reduziert werden. SEM-Beobachtungen zeigten, dass die TiC-Partikel gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet waren (Abweichung $< 0,1 \%$), was die Festigkeit der Zwischenphasenbindung ($> 120 \text{MPa}$) verbesserte und somit die hohe Härte unterstützte.

(2) Verschleißmechanismusanalyse

Der Verschleißratentest quantifiziert die Verschleißfestigkeit des Materials durch Simulation tatsächlicher Arbeitsbedingungen. Die Verschleißrate von WC10TiC10Ni beträgt weniger als $0,06 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, was durch die hohe Härte von TiC und die Zähigkeit von Ni beeinflusst wird. Der Verschleißprozess umfasst Massenverlust (Δm , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{mg}$), Materialdichte (ρ ca. $14,5 \text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$), aufgebrachte Last (F $130 \text{N} \pm 1 \text{N}$) und Gleitdistanz (L $1436 \text{m} \pm 1 \text{m}$), feine Körner ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reduzieren die Verschleißrate um ca. $10 \% \pm 2 \%$, indem sie das Eindringen von Schleifmitteln und die Rissausbreitung verringern. Die Zähigkeit von Ni (K_{IC} ca. $12 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) verringerte die Bildung von Verschleißrissen (Größe $< 0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$), und die mittels SEM beobachtete Verschleißmorphologie zeigte eine Rillentiefe von weniger als $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$, was auf eine sehr verschleißfeste Oberfläche hindeutet. Im Gegensatz dazu kann ein zu hoher TiC-Gehalt ($> 15 \%$) zu verringerter Zähigkeit und erhöhtem Mikrorissrisiko führen. Durch Optimierung des Verhältnisses muss ein Gleichgewicht gewahrt werden.

(3) Korrosionsverhaltensmechanismus

Der Korrosionstest bewertet die Korrosionsbeständigkeit von WCTiCNi mittels elektrochemischer Methoden. Mit Ni als Bindungsphase beträgt die Korrosionsstromdichte (i_{corr}) etwa $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ und ist damit dank der auf der Ni-Oberfläche gebildeten NiO-Passivierungsschicht (Dicke ca. 10nm) deutlich besser als die von herkömmlichen Co-basierten Materialien (i_{corr} beträgt etwa $10^{-5} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{A/cm}^2$). In einer 3,5%igen NaCl-Lösung wird der Gewichtsverlust auf $0,06 \text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{mg/cm}^2$ kontrolliert und liegt damit unter dem Zielwert von $0,08 \text{mg/cm}^2$. Die EDS-Analyse bestätigte die chemische Zusammensetzung der NiO-Schicht (Ni:O-Verhältnis ca. $1:1 \pm 0,1$). Die elektrochemische Stabilität von Ni (Korrosionspotenzial $E_{\text{corr}} \sim 0,1 \text{V vs. SCE}$) verlangsamte die Korrosionsrate effektiv. Im Gegensatz dazu neigt die Co-Phase unter den gleichen Bedingungen eher zur Oxidbildung, und der Gewichtsverlust kann bis zu $0,09 \text{mg/cm}^2$ betragen. Die Zugabe von Ni erhöht die Haltbarkeit des Materials in Meeresumgebungen oder sauren Medien deutlich. SEM-Beobachtungen zeigen eine Tiefe der Korrosionsnarbe von $< 0,5 \mu\text{m}$, was die Überlegenheit des Materials weiter bestätigt.

(4) Analyse der Widerstandseigenschaften

Der Widerstandstest misst die elektrische Leitfähigkeit von WCTiCNi mit der Vier-Sonden-Methode. Der Widerstand von WC10TiC10Ni ist stabil bei $11 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ und damit niedriger als der Zielwert von $12 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Dies ist hauptsächlich auf die Kontinuität des Ni-Netzwerks ($> 95 \% \pm 2 \%$) zurückzuführen. Ni bietet als Bindungsphase einen effizienten Elektronenmigrationspfad. TiC weist als nichtmetallische Hartphase einen hohen intrinsischen Widerstand (ca. $50 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) auf, wodurch der Gesamtwiderstand des Verbundwerkstoffs leicht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhöht wird (Beitrag $< 5 \% \pm 1 \%$). Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Ni-Phase (Abweichung $< 0,1 \%$) bleibt die Gesamtleitfähigkeit jedoch ausgezeichnet und unterstützt die Anwendung von leitfähigen Kontakten und in der Avionik. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Ni-Phase ein dreidimensionales Netzwerk bildet, und die EDS bestätigt, dass der Ni-Gehalt ($10 \% \pm 1 \%$) negativ mit dem spezifischen Widerstand korreliert, was darauf hindeutet, dass eine moderate Erhöhung des Ni-Gehalts den spezifischen Widerstand weiter verringern kann, aber die Härte und Korrosionsbeständigkeit ausgewogen sein müssen.

(5) Mikroskopische Beobachtung und umfassender Mechanismus

Mikroskopische Analysen mittels SEM und EDS liefern anschauliche Hinweise auf den Leistungsmechanismus. Die Verschleißmorphologie zeigt deutliche Rillen und Verschleißspuren. Die Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ begrenzt die Verschleißausbreitung effektiv. Die NiO-Schicht reduziert das Eindringen korrosiver Medien. EDS erkennt den Zusammenhang zwischen dem TiC-Gehalt ($10 \% \pm 0,1 \%$), der Härte und der Verschleißrate. Die XPS-Analyse verifiziert zusätzlich den chemischen Zustand der NiO-Schicht (Ni 2p-Peak $\sim 854 \text{ eV}$) und unterstützt den Korrosionsbeständigkeitsmechanismus. Der kombinierte Effekt aus Korngrenzenverstärkung und Interphasenbindung ($> 120 \text{ MPa}$) reduziert die Porosität ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die Defektrate ($< 0,05 \%$) und verbessert die allgemeine Leistungsstabilität des Materials. Im Vergleich zu WC10Co weist WCTiCNi offensichtliche Vorteile hinsichtlich Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit auf und auch die Daten zu Verschleißrate und Gewichtsverlust sind besser als bei herkömmlichen Materialien.

(6) Anwendungsüberprüfung und Optimierungsrichtung

Die Analyse des Testmechanismus gibt Aufschluss über die Leistung von WCTiCNi in technischen Anwendungen. In elektronischen Formen ermöglichen hohe Härte und geringer Verschleiß eine Lebensdauer von über einer Million Mal; in Schiffsausrüstung gewährleistet geringer Gewichtsverlust eine Lebensdauer von über fünf Jahren; in leitfähigen Kontakten erfüllt der niedrige Widerstand hohe Zuverlässigkeitsanforderungen. Zukünftige Optimierungen können sich auf die Reduzierung der Korngröße auf $0,3 \mu\text{m}$ konzentrieren, um den Verschleiß weiter zu reduzieren, oder den Ni-Gehalt auf 12% erhöhen, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern. Dabei ist jedoch das Risiko einer Härtereduzierung zu beachten. Oberflächenbeschichtungen (wie TiN) können die Korrosionsbeständigkeit verbessern und die Lebensdauer in Umgebungen mit einem pH-Wert < 2 verlängern. Der Einsatz von Plasmasinterstechnologie (SPS) kann Dichte und Gleichmäßigkeit verbessern, um höheren Anforderungen in der Luftfahrt und Medizin gerecht zu werden.

Der Leistungstestmechanismus des WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffs zeigt den synergistischen Effekt von TiC, das die Härte erhöht ($\text{HV } 1650 \pm 30$), Ni, das die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verbessert (Gewichtsverlust $0,06 \text{ mg/cm}^2$), Ni-Netzwerk, das die Leitfähigkeit unterstützt (spezifischer Widerstand $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$), und die Verschleißrate liegt dank feiner Körnung und Phasenbindung unter $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. SEM und EDS liefern mikroskopische Beweise, und die Anwendungsleistung in vielen Bereichen kann zukünftig durch Kornoptimierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Oberflächenbehandlung weiter verbessert werden.

9.2.2.4 Leistungstestmethoden für WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffe

Um die Genauigkeit und Konsistenz der Leistungsprüfung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen zu gewährleisten, sind standardisierte Prüfmethoden und Präzisionsgeräte erforderlich, die wichtige Indikatoren wie Härte, Verschleißrate, Korrosionsverhalten und spezifischen Widerstand abdecken. Diese Prüfmethoden müssen nicht nur die Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit des Materials widerspiegeln, sondern auch die Anwendbarkeit der Daten in Anwendungsszenarien wie elektronischen Formen, Schiffsausrüstung und leitfähigen Kontakten sicherstellen. Durch Optimierung der Prüfbedingungen und des Probenvorbereitungsprozesses können die Prüfergebnisse eine zuverlässige Grundlage für die Bewertung der Materialeistung, Prozessverbesserung und technische Anwendung bieten. Im Folgenden werden die Prüfmethoden, Geräteparameter und die Probenvorbereitung detailliert erläutert, um die Prüfgenauigkeit und Wiederholbarkeit sicherzustellen und den Anforderungen an die multifunktionale Leistung gerecht zu werden.

(1) Härteprüfung

Die Härteprüfung erfolgt mit einem Vickers-Härteprüfgerät. Durch Aufbringen einer Last von $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ wird eine Vertiefung auf der Materialoberfläche erzeugt. Die diagonale Länge wird gemessen, um den Härtewert mit einer Genauigkeit von ± 30 zu berechnen. Dies spiegelt den Beitrag der TiC-Phase (Härte $> \text{HV } 2000$) zur Gesamtverfestigung wider. Vor der Prüfung muss sichergestellt werden, dass die Oberfläche eben und frei von sichtbaren Defekten ist. Die Vertiefungspositionen müssen mindestens das 2,5-fache der diagonalen Länge der Vertiefung voneinander entfernt sein, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden. Jede Prüfung wird fünfmal wiederholt, und der Durchschnittswert wird ermittelt, um den Fehler zu minimieren. Die Härte der WC10TiC10Ni-Probe erreicht üblicherweise $\text{HV } 1650 \pm 30$. Dieses hochpräzise Prüfverfahren eignet sich zur Bewertung der Materialbeständigkeit beim Hochfrequenzstanzen und -schneiden und erfüllt die Anwendungsanforderungen von elektronischen Formen und Ölbohrwerkzeugen.

(2) Verschleißprüfung

Die Verschleißtests wurden gemäß ASTM G65 mit einem trockenen Sand-/Gummirad-Verschleißtester mit einer aufgebrachten Last von $130 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ und einer Gleitdistanz von $1436 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ durchgeführt, um das Verschleißverhalten unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen zu simulieren. Während des Tests wurden Sandpartikel mit einer konstanten Flussrate über die Probenoberfläche gespült und der Massenverlust mit einer Präzisionswaage gemessen (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$). Die Verschleißrate wurde anhand der Materialdichte (ca. $14,5 \text{ g/cm}^3$) berechnet, mit einem Zielwert von weniger als $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Die Testumgebung wird auf $23^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$ und eine Luftfeuchtigkeit von $< 65\%$ kontrolliert. Jeder Test wird dreimal wiederholt und der Durchschnittswert wird genommen, um eine Wiederholbarkeit von $> 95\% \pm 2\%$ sicherzustellen. Beispielsweise erreicht die Verschleißrate von WC10TiC10Ni $0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

was darauf hindeutet, dass seine Feinkornstruktur ($0,5\ \mu\text{m}$) und die gleichmäßige Verteilung von TiC (Abweichung $< 0,1\ \%$) die Verschleißfestigkeit wirksam verbessern und sich für Beschichtungen von Luftfahrtkomponenten und verschleißfesten Schichten für die Eisenbahn eignet.

(3) Korrosionsprüfung

Der Korrosionstest wurde mit einer elektrochemischen Workstation gemäß ASTM G59-Standard und einer Scanrate von $0,1\ \text{mV/s} \pm 0,01\ \text{mV/s}$ durchgeführt. Die Korrosionsstromdichte (i_{corr}) und der Gewichtsverlust wurden in einer 3,5%igen NaCl-Lösung gemessen. Nachdem die Probe 24 Stunden eingetaucht war, wurde die Polarisationskurve mit einem Dreielektrodensystem (Arbeitselektrode, Referenzelektrode und Hilfselektrode) aufgezeichnet und der Gewichtsverlust durch Wiegen bestimmt (Genauigkeit $\pm 0,01\ \text{mg/cm}^2$), mit einem Zielwert von weniger als $0,08\ \text{mg/cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg/cm}^2$. Die Testtemperatur wurde auf $25\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$ geregelt, der pH-Wert bei 6,5–7,0 stabilisiert und der Durchschnittswert nach drei Wiederholungen ermittelt. Der Gewichtsverlust von WC10TiC10Ni beträgt $0,06\ \text{mg/cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg/cm}^2$, i_{corr} beträgt etwa $10^{-6}\ \text{A/cm}^2$, was besser ist als bei Co-basierten Materialien und den Vorteil der Korrosionsbeständigkeit der NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10\ \text{nm}$) von Ni in Schiffsausrüstung und medizinischen Geräten beweist.

(4) Widerstandsprüfung

Der Widerstandstest erfolgt mit der Vier-Sonden-Methode. Dabei wird eine Konstantstromquelle mit $1\ \text{mA} \pm 0,01\ \text{mA}$ verwendet und der Spannungsabfall gemessen, um den Widerstand mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ und einem Zielwert von weniger als $12\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ zu berechnen. Der Sondenabstand beträgt $1\ \text{mm}$ und die Probenoberfläche muss frei von Oxidschichten oder Schmutz sein. Der Test wird fünfmal wiederholt und der Durchschnittswert wird genommen, um den leitfähigen Beitrag des Ni-Netzwerks ($> 95\ \%$ Kontinuität) sicherzustellen. Der spezifische Widerstand von WC10TiC10Ni ist stabil bei $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$, was die hohe Elektronendichte und gleichmäßige Verteilung der Ni-Phase (Abweichung $< 0,1\ \%$) widerspiegelt und die Anforderungen an einen niedrigen Kontaktwiderstand ($< 0,1\ \text{m}\Omega$) von leitfähigen Kontakten und tragbarer Elektronik unterstützt.

(5) Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung ist ein entscheidender Schritt zur Sicherstellung der Prüfgenauigkeit. Diamantpolieren oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP) wird eingesetzt, um die Oberflächenrauheit (R_a) auf $< 0,05\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ zu kontrollieren, Oberflächendefekte und Mikrorisse zu reduzieren und die Oberfläche zu glätten, um Verschleiß und das Eindringen korrosiver Medien zu verringern. Nach dem Polieren werden Rückstände durch Ultraschallreinigung entfernt. Die Probengröße beträgt $10 \times 10 \times 5\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, und die Kantenfase beträgt $0,2\ \text{mm}$, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden. Die Oberflächengleichmäßigkeit der vorbereiteten Probe wird mittels SEM (Abweichung $< 0,1\ \%$) überprüft und bietet so eine konsistente Grundlage für nachfolgende Prüfungen. Beispielsweise beträgt die Verschleißrate der WC10TiC10Ni-Probe unter der oben beschriebenen Vorbereitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m und eine Wiederholbarkeit von > 95 % ± 2 %, was darauf hindeutet, dass der Polierprozess die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Testergebnisse erheblich verbessert.

(6) Umweltkontrolle und Datenüberprüfung

Während des Tests müssen die Umgebungsbedingungen streng kontrolliert werden. Die Temperatur muss bei 23 °C ± 2 °C und die Luftfeuchtigkeit < 65 % gehalten werden, um Störungen durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu minimieren. Die Geräte werden vor jedem Test kalibriert, um die Stabilität der Last-, Strom- und Spannungsparameter zu gewährleisten. Die Datenüberprüfung erfolgte durch Vergleich mit Standardproben (wie WC10Co). Die Mikrostruktur wurde mittels SEM und EDS analysiert, der TiC-Gehalt (10 % ± 0,1 %) und die Ni-Verteilung (Abweichung < 0,1 %) wurden bestätigt. XPS kann die Bildung der NiO-Schicht zusätzlich verifizieren. Die Testergebnisse lassen sich auch auf andere Anwendungsszenarien übertragen, wie z. B. Beschichtungen für die Luftfahrt (hohe Temperaturbeständigkeit) und medizinische Geräte (Biokompatibilität), und liefern Daten zur Unterstützung der Materialoptimierung.

(7) Anwendungsorientierung und zukünftige Verbesserungen

Diese Prüfmethoden leiten die Anwendung von WCTiCNi-Werkstoffen in der Technik direkt an. Härteprüfungen unterstützen die Bewertung der Haltbarkeit von elektronischen Formen und Ölbohrwerkzeugen. Verschleißprüfungen optimieren die Leistung von Flugzeugteilen und verschleißfesten Schichten für die Eisenbahn. Korrosionsprüfungen gewährleisten die langfristige Zuverlässigkeit von Schiffsausrüstung und medizinischen Geräten. Widerstandsprüfungen erfüllen die Anforderungen an leitfähige Kontakte und tragbare Elektronik. Zukünftig können dynamische Verschleißsimulationen (z. B. Hochgeschwindigkeitsrotationstests) und Langzeit-Korrosionsimmersion (> 1000 Stunden) eingeführt und mit automatisierten Geräten (z. B. Roboterpoliersystemen) kombiniert werden, um die Effizienz zu verbessern. Durch nanoskalige Oberflächenbehandlungen (z. B. TiN-Beschichtungen) kann die Rauheit weiter auf Ra < 0,03 µm reduziert werden, was die Prüfgenauigkeit und die Materialeistung verbessert.

Die Leistungstests der WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffe wurden mit einem Vickers-Härteprüfgerät (Last 10 kg), ASTM G65 (Last 130 N), ASTM G59 (Abtastrate 0,1 mV/s) und der Vier-Sonden-Methode (Stromstärke 1 mA) quantifiziert, um Härte, Verschleißrate, Gewichtsverlust und spezifischen Widerstand zu quantifizieren. Zur Gewährleistung der Genauigkeit wurden die Proben auf Ra < 0,05 µm poliert. Am Beispiel von WC10TiC10Ni bestätigten eine Verschleißrate von 0,05 mm³/N·m und eine Wiederholgenauigkeit von > 95 % die Zuverlässigkeit der Methode. Zukünftig können dynamische Prüfungen und Oberflächenoptimierungen das Anwendungspotenzial in verschiedenen Bereichen weiter steigern.

9.3 Selbstschmierung und Antihaftwirkung von Hartmetall

9.3.1 Theorie der Selbstschmierung und Antihaftwirkung von Hartmetall

Selbstschmierung (Reibungskoeffizient < 0,2 ± 0,01) und Antihaftwirkung (Haftkraft < 1 N ± 0,1 N) sind Eigenschaften, die Hartmetall in modernen Industrieanwendungen verbessern muss. Diese

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften werden durch die Einführung von Festschmierstoffen (wie MoS₂ und C, mit einem Gehalt von 5 % ± 0,1 %) und eine optimierte Oberflächenstruktur (Tiefe 110 µm ± 0,1 µm) deutlich verbessert und erfüllen so die Anforderungen anspruchsvoller Szenarien wie Hochgeschwindigkeitsschneiden (Geschwindigkeit > 500 m/min ± 10 m/min), Trockenbearbeitung (Reibungswärme < 100 °C ± 1 °C) und Formenbau (Formtrennkraft < 10 N ± 1 N). Herkömmliche WCCo-Werkstoffe weisen einen hohen natürlichen Reibungskoeffizienten (ca. 0,5 ± 0,05) auf. Dies erschwert den effektiven Umgang mit Bedingungen mit geringer Reibung und hoher Haftung. Dies führt zu Verschleiß- und Haftungsproblemen bei der Trockenbearbeitung und beim Präzisionsformen und schränkt somit ihren Anwendungsbereich ein. Im Gegensatz dazu kombiniert das WCTiCNi-System die geringen Schereigenschaften von Festschmierstoffen mit dem reibungsreduzierenden Effekt des Texturdesigns und bietet so eine neue Lösung für Selbstschmierung und Antihafteffekt.

(1) Einführung von Festschmierstoffen

Die Festschmierstoffe MoS₂ und C sind der Schlüssel zur Selbstschmierung und Antihafteffekt. Als Schichtverbindung bietet MoS₂ aufgrund seiner schwachen Van-der-Waals-Kraft zwischen den Schichten (ca. 0,1 eV) geringe Reibungseigenschaften. Der Reibungskoeffizient kann auf 0,15 ± 0,01 reduziert werden, was für Hochgeschwindigkeitszerspanung und Trockenbearbeitung geeignet ist. C (z. B. in Graphit- oder Hartmetallform) reduziert die Scherspannung zwischen Oberflächen durch seine Lamellenstruktur und Selbstschmierung zusätzlich, insbesondere bei hohen Temperaturen (> 500 °C). Bei einem Gehalt von 5 % ± 0,1 % verteilt sich der Festschmierstoff gleichmäßig in der WC- und TiC-Matrix (Abweichung < 0,1 %). Die SEM-Analyse zeigt, dass MoS₂- und C-Partikel in die Phasengrenze eingebettet sind. Dadurch wird der direkte Metallkontakt reduziert und die Haftkraft auf 0,8 N ± 0,1 N reduziert. Im Vergleich zum hohen Reibungskoeffizienten von WCCo (0,5 ± 0,05) reduziert dieser Zusatz Energieverlust und Wärmestau (< 100 °C) deutlich und verbessert so die Werkzeugstandzeit und die Bearbeitungseffizienz. Beispielsweise beträgt der Reibungskoeffizient von WC5MoS₂ beim Trockenschneiden 0,15 ± 0,01 und die Haftkraft 0,8 N ± 0,1 N. Dies erfüllt die Umweltschutzanforderungen der kühlmittelfreien Bearbeitung.

(2) Oberflächenbeschaffenheit und Schmiermechanismus

µm ± 0,1 µm auf der Materialoberfläche durch Laserätzen oder -bearbeitung, was die Selbstschmierungs- und Antihafteigenschaften verbessert. Diese Texturstrukturen können MoS₂- oder C-Partikel einfangen und speichern, wodurch der direkte Kontakt zwischen Reibpaarungen verringert wird. Die Stribeck-Kurve zeigt, dass vom Grenzschmierbereich (niedrige Geschwindigkeit und niedrige Belastung) bis zum Mischschmierbereich (mittlere Geschwindigkeit und mittlere Belastung) der Reibungskoeffizient mit der Verbesserung der Schmiermittelverteilung auf unter 0,2 sinkt. Nachdem die Texturtiefe und der Abstand (ca. 100–120 µm) optimiert wurden, wird die Adhäsionskraft (< 1 N) wirksam verringert, insbesondere bei der Formgebung wird die Entformungskraft auf 10 N ± 1 N reduziert, wodurch die Werkstückhaftung und Oberflächenschäden verringert werden. Die REM-Untersuchung zeigt, dass die Schmierschichtdicke in der Textur etwa 5–10 µm beträgt. Dies reduziert die Anhaftungsneigung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von Spänen an der Werkzeugoberfläche deutlich, insbesondere bei der Bearbeitung klebriger Materialien (wie Aluminiumlegierungen). Darüber hinaus fördert die Textur die schnelle Ableitung der Reibungswärme ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), wodurch Verklebungen durch hohe Temperaturen vermieden und die Werkzeuglebensdauer verlängert werden.

(3) Tribologietheorie und Prüfnormen

Die tribologische Theorie liefert theoretische Belege für den Selbstschmierungs- und Antihaftmechanismus. Die Stribeck-Kurve beschreibt die Veränderung des Schmierzustands in Abhängigkeit von Belastung und Geschwindigkeit. Das WCTiCNi-System erreicht den Übergang von Grenzflächen- zu Mischschmierung durch Festschmierstoffe und Texturdesign, wodurch der Reibungskoeffizient von 0,5 WCCo auf 0,15–0,2 reduziert wird. Der Prüfstandard ASTM G99 (Stift-Scheibe-Reibungs- und Verschleißtest) wird zur Quantifizierung des Reibungskoeffizienten und der Haftung verwendet. Der Belastungsbereich liegt zwischen 10 und 200 N, die Geschwindigkeit zwischen 0,1 und 1 m/s. Der Test wird dreimal wiederholt und der Durchschnittswert ermittelt, um die Datenzuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Umgebungsbedingungen werden auf $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Luftfeuchtigkeit auf $50\% \pm 5\%$ geregelt, um Trockenbearbeitung und Hochgeschwindigkeitszerspanung zu simulieren. In Kombination mit der Analyse der Oberflächenmorphologie (SEM) und der Schmiermittelverteilung (EDS) bestätigen die Testergebnisse die Rolle von MoS_2 und C bei der Reduzierung von Reibung und Haftung und liefern Daten zur Unterstützung der Materialoptimierung.

(4) Tribologietheorie und Prüfnormen

Die tribologische Theorie liefert theoretische Belege für den Selbstschmierungs- und Antihaftmechanismus. Die Stribeck-Kurve beschreibt die Veränderung des Schmierzustands in Abhängigkeit von Belastung und Geschwindigkeit. Das WCTiCNi-System erreicht den Übergang von Grenzflächen- zu Mischschmierung durch Festschmierstoffe und Texturdesign, wodurch der Reibungskoeffizient von 0,5 WCCo auf 0,15–0,2 reduziert wird. Der Prüfstandard ASTM G99 (Stift-Scheibe-Reibungs- und Verschleißtest) wird zur Quantifizierung des Reibungskoeffizienten und der Haftung verwendet. Der Belastungsbereich liegt zwischen 10 und 200 N, die Geschwindigkeit zwischen 0,1 und 1 m/s. Der Test wird dreimal wiederholt und der Durchschnittswert ermittelt, um die Datenzuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Umgebungsbedingungen werden auf $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Luftfeuchtigkeit auf $50\% \pm 5\%$ geregelt, um Trockenbearbeitung und Hochgeschwindigkeitszerspanung zu simulieren. In Kombination mit der Analyse der Oberflächenmorphologie (SEM) und der Schmiermittelverteilung (EDS) bestätigen die Testergebnisse die Rolle von MoS_2 und C bei der Reduzierung von Reibung und Haftung und liefern Daten zur Unterstützung der Materialoptimierung.

Einführung von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)

9.3.2.1 Übersicht über das Prinzip und die Technologie von Hartmetall-Festschmierstoffen

Die selbstschmierenden Eigenschaften von Hartmetall werden durch die Einführung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Festschmierstoffe MoS₂ und C deutlich verbessert. MoS₂ (Scherfestigkeit zwischen den Schichten $< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, Gehalt $5 \% \pm 0,1 \%$) und C (Graphitform, Reibungskoeffizient $< 0,1 \pm 0,01$) reduzieren den Reibungskoeffizienten durch geringe Scherkraft ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$) wirksam, und der Zielwert wird auf $< 0,2 \pm 0,01$ festgelegt, wodurch die Anforderungen an geringe Reibung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, bei der Trockenverarbeitung und beim Formenbau erfüllt werden. Die geschichtete Struktur von MoS₂ (Schichtabstand etwa $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) bietet eine glatte Gleitfläche und verringert den direkten Kontakt und Reibungswiderstand zwischen den Oberflächen, während die sp²-Bindung von C (CC-Bindungsenergie etwa $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) durch ihre lamellaren Eigenschaften die Oberflächenhaftung ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) verringert und die Antihafwirkung verbessert. WC als Matrix sorgt für eine hohe Härte ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) und bietet dem Material strukturelle Unterstützung. Das Schmiermittel muss gleichmäßig verteilt sein (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), um die synergetische Optimierung von Schmierwirkung und mechanischen Eigenschaften sicherzustellen. Diese Kombination ermöglicht es Hartmetall, sich auf Grundlage seines traditionellen Vorteils der hohen Härte an die höheren Anforderungen der modernen Industrie hinsichtlich geringer Reibung und Antihafwirkung anzupassen.

Als typische Schichtverbindung verdankt MoS₂ seine selbstschmierenden Eigenschaften seiner einzigartigen hexagonalen Kristallstruktur. Die Schichten sind durch schwache Van-der-Waals-Kräfte (ca. $0,1 \text{ eV}$) verbunden. Durch diese niedrige Bindungsenergie gleiten die Schichten unter mechanischer Belastung leicht, wodurch der Reibungswiderstand besonders bei ölfreier Schmierung oder in Umgebungen mit hohen Temperaturen (z. B. $> 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$) deutlich reduziert wird. Wenn der Gehalt auf $5 \% \pm 0,1 \%$ kontrolliert wird, können MoS₂-Partikel gleichmäßig in der WC-Matrix verteilt werden und ein kontinuierliches Schmiernetzwerk bilden, das den direkten Kontakt zwischen Metallen reduziert, wodurch die Ansammlung von Reibungswärme ($< 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) wirksam verhindert und die Werkzeuglebensdauer verlängert wird. Die Graphitform von C basiert auf ihrer zweidimensionalen Lamellenstruktur und niedrigen Oberflächenenergie (ca. $0,1 \text{ J/m}^2$). Die hohe Stabilität und die geringen Schereigenschaften von sp²-Bindungen verleihen ihnen eine hervorragende Antihafwirkung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (z. B. $> 500 \text{ m/min}$) oder bei der Trockenbearbeitung. Die Haftkraft wird auf $< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ reduziert, was sich besonders für die Bearbeitung klebriger Materialien wie Aluminium- oder Kupferlegierungen eignet. Beide wirken synergetisch: MoS₂ sorgt für die dynamische Schmierung, C verstärkt die statische Antihafwirkung und bildet so einen komplementären Schmiermechanismus.

Als Skelettmaterial von Hartmetall weist WC aufgrund seiner kompakten Gitterstruktur und der Korngrenzenverstärkung eine hohe Härte ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) auf, wodurch die strukturelle Integrität des Materials bei hoher Belastung sichergestellt wird. WC selbst hat jedoch einen hohen Reibungskoeffizienten (etwa $0,5 \pm 0,05$) und es fehlt ihm an natürlicher Selbstschmierung. Dieser Mangel wird daher durch die Einführung von MoS₂ und C ausgeglichen. Die gleichmäßige Verteilung der Schmiermittel (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) ist der Schlüssel zur Leistungsoptimierung. Die SEM-Analyse zeigt, dass MoS₂- und C-Partikel in die WC-Phasengrenze eingebettet sind und eine Schmierschicht von etwa 5 bis 10 μm bilden, die die Reibung zwischen den Phasen und die Adhäsionsneigung verringert. Diese Verteilung wird durch Pulvermischen und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kugelmahlen erreicht, um sicherzustellen, dass das Schmiermittel die Härte und Verschleißfestigkeit von WC nicht beeinträchtigt und gleichzeitig die Gesamtleistung verbessert. Im Vergleich zu herkömmlichen WCCo-Werkstoffen reduziert das WCTiCNI-System durch die Zugabe von Schmiermitteln den Reibungskoeffizienten um etwa 70 % und die Haftung um mehr als 50 %, was die Effizienz der Trockenverarbeitung und die Qualität der Entformung deutlich verbessert.

Die Vorteile dieses selbstschmierenden und hafthemmenden Designs zeigen sich auch in seiner Anpassungsfähigkeit. MoS₂ zeigt besonders gute Leistungen im Vakuum oder in inerter Atmosphäre und eignet sich daher für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik, während die hohe Temperaturstabilität von C₂ die Energie- und Schwermaschinenindustrie unterstützt. Die geringe Scherkraft des Schmiermittels reduziert nicht nur den Energieverlust, sondern auch die thermische Belastung während der Verarbeitung (< 100 °C). Dies verlängert die Lebensdauer von Werkzeugen und Formen und entspricht damit dem industriellen Trend zu umweltfreundlicher Fertigung und nachhaltiger Entwicklung. Durch diese mehrstufige synergetische Optimierung konnte Hartmetall bei gleichzeitig hoher Härte Durchbrüche in Bezug auf Reibungsarmut und hafthemmende Eigenschaften erzielen. Dies erfüllt den Bedarf der modernen Industrie an effizienten, umweltfreundlichen und multifunktionalen Werkstoffen und bietet zuverlässige Unterstützung für Hochgeschwindigkeitszerspanung, Trockenbearbeitung und Präzisionsumformung.

9.3.2.2 Mechanismusanalyse von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS₂, C)

Die selbstschmierenden und hafthemmenden Eigenschaften von MoS₂ und C beruhen auf ihrer einzigartigen Mikrostruktur und ihren physikochemischen Eigenschaften, die das Reibungsverhalten der Werkstoffe beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, der Trockenbearbeitung und der Formenherstellung deutlich verbessern. Durch eine eingehende Analyse des Schmiermechanismus, des Einflusses mechanischer Eigenschaften und der Mikroverteilung untersucht dieser Abschnitt, wie MoS₂ und C synergetisch den Reibungskoeffizienten und die Haftung reduzieren und gleichzeitig die strukturelle Integrität der WC-Matrix erhalten. Dies schafft eine wissenschaftliche Grundlage für die Optimierung des Schmierstoffgehalts und des Herstellungsprozesses.

(1) Schmiermechanismus des Hartmetall-Festschmierstoffs (MoS₂, C)

Die selbstschmierenden Eigenschaften von MoS₂ beruhen hauptsächlich auf den schwachen Van-der-Waals-Kräften (ca. 0,1 eV ± 0,01 eV) in seiner geschichteten Kristallstruktur. Diese niedrige Bindungsenergie erleichtert das Verrutschen der Schichten unter Scherkräften. Während des Reibungsprozesses bildet sich ein Transferfilm (Dicke ca. 10 nm ± 1 nm), der die Oberfläche der Reibpaarung bedeckt. Der Reibungskoeffizient reduziert sich dadurch auf 0,15 ± 0,01. Dieser Transferfilm entsteht durch die Ablagerung und Neuausrichtung von MoS₂-Partikeln auf der Kontaktfläche. Dies reduziert den direkten Kontakt- und Reibungswiderstand zwischen Metallen deutlich, insbesondere in trockenen oder heißen Umgebungen (z. B. über 400 °C). C bietet durch das lamellare Gleiten seiner sp²-Hybridstruktur (Gleitenergie ca. 0,01 eV ± 0,001 eV) eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zusätzliche Schmierwirkung. Seine niedrige Oberflächenenergie (ca. $0,1 \text{ J/m}^2$) reduziert die Haftung effektiv auf $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, was sich besonders für die Verarbeitung klebriger Materialien wie Aluminium- oder Kupferlegierungen eignet. Der synergistische Effekt von MoS_2 und C bildet eine Kombination aus dynamischer und statischer Schmierung. MoS_2 bietet eine durchgehende Gleitfläche, während C die Antihafteigenschaft verbessert und so gemeinsam die Reibungsleistung optimiert.

(2) Einfluss von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C) auf die mechanischen Eigenschaften

In der WC 5MoS_2 -Probe bleibt die Härte bei $\text{HV } 1550 \pm 30$ und die Bruchzähigkeit (K_{1c}) beträgt etwa $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, was darauf hindeutet, dass die Zugabe des Schmiermittels nur eine begrenzte Wirkung auf die mechanischen Eigenschaften der WC-Matrix hat. MoS_2 - und C-Partikel sind gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet. Die SEM-Analyse zeigt, dass das Schmiermittel die Gitterstruktur des WC nicht wesentlich stört (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Die Härte wird hauptsächlich durch WC und TiC gewährleistet, während die Zähigkeit vom plastischen Beitrag der Ni-Phase profitiert. Wenn der MoS_2 -Gehalt jedoch $5 \% \pm 0,1 \%$ übersteigt, nimmt K_{1c} um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ab. Dies liegt daran, dass übermäßiger Schmierstoffgehalt zu einer Schwächung der Korngrenzen oder einer Partikelagglomeration ($> 0,1 \%$) führt und damit das Risiko der Mikrorissbildung erhöht. Daher ist eine präzise Kontrolle des Schmierstoffgehalts entscheidend für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen mechanischen Eigenschaften und Schmierwirkung. 5% gelten als idealer Bereich, und Leistungseinbußen müssen durch eine Optimierung des Verhältnisses vermieden werden.

(4) Mikroskopische Verteilung und Nachweis von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)

Mikroskopische Analysen mittels SEM und EDS lieferten visuelle Beweise für den Schmiermechanismus. Die SEM-Beobachtung zeigte, dass MoS_2 -Partikel gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet waren (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die Transferfilmbedeckung nach dem Reibungstest über $90 \% \pm 2 \%$ lag. Dies deutet darauf hin, dass das Schmiermittel während des Reibungsprozesses effektiv migrierte und die Kontaktfläche bedeckte, wodurch Verschleiß und Haftung reduziert wurden. Die EDS-Analyse bestätigte die chemische Zusammensetzung von MoS_2 (Mo : S-Verhältnis ca. $1:2 \pm 0,1$) und verifizierte die Integrität seiner Schichtstruktur. Die XPS-Detektion zeigte die sp^2 -Struktur von C (C 1s-Peakposition $\sim 284 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), was die Ursache seiner geringen Reibungseigenschaften unterstützt. Die Sintertemperatur wurde auf $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ geregelt, um die thermische Zersetzung von MoS_2 (Zersetzungstemperatur $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) zu vermeiden und sicherzustellen, dass das Schmiermittel während des Hochtemperatur-Herstellungsprozesses stabil blieb. SEM zeigte außerdem, dass die Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zur gleichmäßigen Dispersion des Schmiermittels beitrug und Interphasendefekte ($< 0,05 \%$) reduzierte.

(5) Reibungsverhalten und Lasteinfluss von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)

Der Reibungskoeffizient zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit in Abhängigkeit von der Belastung. Bei einer Belastung von $> 50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ steigt der Reibungskoeffizient leicht an ($< 5 \% \pm 1 \%$), da die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hohe Belastung die Dicke des Transferfilms ($< 8 \text{ nm}$) komprimiert und den lokalen Metallkontakt verstärkt. Der Reibungskoeffizient von WC_5MoS_2 bleibt jedoch im Bereich von $0,15 \pm 0,01$ und ist damit besser als der von WC_{10}Co ($0,5 \pm 0,05$). Dies weist darauf hin, dass die Schmierwirkung von MoS_2 und C auch bei mittleren bis hohen Belastungen noch wirksam ist. Die SEM-Analyse zeigt, dass der Transferfilm bei hoher Belastung lokal beschädigt wird ($< 5 \%$), aber der sp^2 -Gleit von C ergänzt die Schmierwirkung, und die Haftkraft bleibt $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Die Kontrolle der Reibungswärme ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) profitiert von den geringen Schereigenschaften des Schmiermittels, wodurch eine durch hohe Temperaturen verursachte Bindung vermieden und die Lebensdauer des Werkzeugs verlängert wird.

(6) Anwendungsüberprüfung und Optimierungsrichtung von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)

WC_5MoS_2 hat sich in technischen Anwendungen bewährt. Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (500 m/min) reduzieren der Reibungskoeffizient von $0,15 \pm 0,01$ und die Haftkraft von $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ den Verschleiß und die Spanhaftung bei der Trockenbearbeitung deutlich, wodurch die Werkzeugstandzeit um ca. 30 % erhöht wird. Bei der Formgebung unterstützt die geringe Haftung das reibungslose Entformen von Kunststoffprodukten (Entformungskraft $< 10 \text{ N}$). Zukünftige Optimierungen können durch Erhöhung des MoS_2 -Gehalts auf 6 % oder die Einführung von Nano- MoS_2 (Partikelgröße $< 100 \text{ nm}$) erreicht werden, um die Stabilität des Transferfilms zu verbessern und den Reibungskoeffizienten auf 0,12 zu senken. In Kombination mit einer Oberflächenstrukturierung (Tiefe $110 \text{ }\mu\text{m}$) oder Plasmaspritztechnologie kann die Haftkraft weiter auf $< 0,5 \text{ N}$ reduziert werden, was für Szenarien mit hohen Temperaturen ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) oder hohen Belastungen ($> 200 \text{ N}$) geeignet ist, wie beispielsweise bei Flugzeugtriebwerken und schweren Maschinen.

MoS_2 reduziert den Reibungskoeffizienten durch schwache Van-der-Waals-Kräfte ($0,1 \text{ eV}$) und Transferfilm (10 nm) auf $0,15 \pm 0,01$, C reduziert die Haftung durch sp^2 -Gleiten ($0,01 \text{ eV}$) auf $< 0,8 \text{ N}$, WC_5MoS_2 -Härte $\text{HV } 1550$ und $K_{1c} 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ erhalten die mechanischen Eigenschaften. SEM und EDS bestätigen die gleichmäßige Verteilung des Schmiermittels. Sintern bei $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ verhindert Zersetzung, und die Schmierwirkung kann zukünftig durch Nanooptimierung weiter verbessert werden.

9.3.2.3 Analyse der Einflussfaktoren auf Hartmetall-Festschmierstoffe (MoS_2 , C)

Die Hartmetall-Festschmierstoffe MoS_2 und C werden maßgeblich von zahlreichen Faktoren beeinflusst, die durch Veränderung der Schmierstoffverteilung, der Mikrostruktur und der Umgebungsbedingungen gemeinsam die Leistung ihres Reibungskoeffizienten und ihrer Haftung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, der Trockenbearbeitung und der Formenherstellung bestimmen. Wichtige Parameter wie Gehalt, Korngröße, Sintertemperatur und Einsatzumgebung von MoS_2 und C wirken sich direkt auf die Selbstschmierungs- und Antihafwirkung aus und wirken sich in gewissem Maße auf die mechanischen Eigenschaften des Materials (wie Härte und Zähigkeit) aus. Durch Analyse der Mechanismen und Beziehungen zwischen diesen Faktoren können Design

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Herstellungsprozess des Schmierstoffs optimiert werden, um die Anforderungen an geringe Reibung und hohe Haltbarkeit in technischen Anwendungen zu erfüllen. In diesem Abschnitt wird der Einfluss jedes Einflussfaktors auf die Schmierleistung basierend auf seinen Eigenschaften, experimentellen Daten und Anwendungsfällen detailliert erörtert und Optimierungsvorschläge unterbreitet.

(1) MoS₂-Gehalt

Der MoS₂-Gehalt ist ein wichtiger Faktor für Schmierung und mechanische Eigenschaften. Bei einem Gehalt von $5\% \pm 0,1\%$ kann der Reibungskoeffizient auf $< 0,2 \pm 0,01$ reduziert werden. Die schwachen Van-der-Waals-Kräfte ($0,1\text{ eV} \pm 0,01\text{ eV}$) der MoS₂-Schichtstruktur bilden einen stabilen Transferfilm (Dicke $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), der den Reibungswiderstand effektiv reduziert. Bei diesem Gehalt zeigt die SEM-Analyse, dass MoS₂ gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet ist (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$), mit einer Bedeckung von $> 90\% \pm 2\%$, was den Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsschneidens (500 m/min) und der Trockenbearbeitung gerecht wird. Wenn der MoS₂-Gehalt jedoch $10\% \pm 0,1\%$ übersteigt, verringert sich die Bruchzähigkeit (K_{1c}) um etwa $15\% \pm 3\%$, was auf übermäßiges Schmiermittel zurückzuführen ist, das zu einer Schwächung der Korngrenzen oder einer Partikelagglomeration ($> 0,1\%$) führt und somit das Risiko von Mikrorissen erhöht. Beispielsweise hat WC10MoS₂ aufgrund seines hohen MoS₂-Gehalts einen K_{1c} von nur $8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, während WC5MoS₂ $10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ erreicht, was darauf hindeutet, dass 5% den Gleichgewichtspunkt zwischen mechanischen Eigenschaften und Schmierwirkung darstellen. In Zukunft kann MoS₂ stufenweise hinzugefügt werden, um seine lokale Konzentration zu steuern und eine Verringerung der Zähigkeit zu vermeiden.

(2) C-Gehalt

Der C-Gehalt hat einen erheblichen Einfluss auf Haftung und Härte. Bei einem Gehalt von $3\% \pm 0,1\%$ bleibt die Haftung gering ($< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$). Aufgrund der sp^2 -Bindungsstruktur (Gleitenergie $0,01\text{ eV} \pm 0,001\text{ eV}$) und der lamellaren Gleiteigenschaften von C verringert sich die Haftung zwischen Oberflächen, insbesondere bei der Verarbeitung von Aluminiumlegierungen oder Kunststoffen. SEM-Beobachtungen zeigen, dass C-Partikel einen gleichmäßigen Schmierfilm mit einer Dicke von etwa $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ bilden, der die Antihaftwirkung verbessert. Übersteigt der C-Gehalt jedoch $5\% \pm 0,1\%$, verringert sich die Härte um etwa $10\% \pm 2\%$, da der übermäßige C-Gehalt die Gitterfestigkeit der WC-Matrix schwächt. Die EDS-Analyse zeigt, dass die C-Phasensegregation ($> 0,2\%$) die gleichmäßige Verteilung von TiC und WC beeinträchtigen kann. Daher gelten $3\text{--}5\%$ als idealer Bereich. Höhere C-Werte erfordern eine geringe Menge Härter (z. B. VC, $< 1\%$), um die Härte ($> \text{HV } 1500$) zu erhalten. Eine Optimierung kann durch eine verbesserte Dispersion von Nano-C (Partikelgröße $< 100\text{ nm}$) erreicht werden, wodurch die Haftkraft weiter auf $< 0,5\text{ N}$ reduziert wird.

(3) Korngröße

Die Korngröße ist entscheidend für die Schmierleistung und die Stabilität des Transferfilms. Bei einer Korngröße von $0,51 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ wird der Transferfilm stabil mit einem Deckungsgrad von $> 90\% \pm 2\%$ gebildet. MoS₂- und C-Partikel sind gleichmäßig zwischen den Feinkorngrenzen verteilt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Dichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), wodurch der Anstieg des Reibungskoeffizienten reduziert und dieser bei $< 0,2 \pm 0,01$ gehalten wird. Die SEM-Analyse zeigt, dass Feinkörner das Eindringen von Schleifmittel und die Rissausbreitung begrenzen und die Tragfähigkeit des Schmierstoffs verbessern. Wenn die Korngröße jedoch $2 \pm 0,01 \mu\text{m}$ übersteigt, steigt der Reibungskoeffizient um etwa $10 \% \pm 2 \%$. Dies liegt daran, dass die groben Körner die Anzahl der Korngrenzen verringern, die Bedeckungsrate des Transferfilms sinkt ($< 85 \%$), der lokale Metallkontakt nimmt zu und die Haftkraft kann auf über 1 N ansteigen. Die Kontrolle der Korngröße erfordert die Zugabe von Inhibitoren (z. B. VC, 0,5–1 %) und die Optimierung der Kugelmahlzeit ($40 \pm 1 \text{ h}$). Zukünftig können Nanopartikel ($< 0,3 \mu\text{m}$) erforscht werden, um den Transferfilm weiter zu stabilisieren und die Schmierleistung zu verbessern.

(4) Sintertemperatur

Die Sintertemperatur wirkt sich direkt auf die Integrität und Leistungsstabilität des Schmiermittels aus. Bei $1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bleibt MoS_2 stabil (Zersetzungstemperatur $> 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und zersetzt sich nicht nennenswert. Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zeigt eine gleichmäßige Schmiermittelverteilung (Abweichung $< 0,1 \%$), Reibungskoeffizient und Haftkraft erreichen Werte von $0,15 \pm 0,01$ bzw. $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Übersteigt die Sintertemperatur jedoch $1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, verstärkt sich die Zersetzung von MoS_2 um etwa $5 \% \pm 1 \%$, und EDS erkennt ein unausgewogenes Verhältnis von Mo und S ($\text{Mo:S} < 1:2$), was zu einer verminderten Schmierleistung führt und den Reibungskoeffizienten auf $0,25 \pm 0,01$ ansteigen lässt. Hohe Temperaturen können zudem eine übermäßige Graphitisierung der C-Phase auslösen, was die Härte ($> \text{HV } 1500$) beeinträchtigt. Daher gelten $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ als optimale Temperatur. In Kombination mit einer Argon-Schutzatmosphäre oder abgestuftem Sintern (Vorwärmen auf $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) kann das Zersetzungsrisiko weiter reduziert und die Schmierstoffstabilität verbessert werden.

(5) Umwelt

Die Umgebungsbedingungen wirken sich erheblich auf die Schmierleistung aus. Wenn die Luftfeuchtigkeit $50 \% \pm 5 \%$ übersteigt, erhöht sich der Reibungskoeffizient um etwa $10 \% \pm 2 \%$. Dies liegt daran, dass Wasser auf den MoS_2 - und C-Oberflächen adsorbiert wird, wodurch die Gleitfähigkeit zwischen den Schichten geschwächt und die Bildung eines Transferfilms verhindert wird (Bedeckung $< 85 \%$). Die Haftung kann auf $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ ansteigen. Die SEM-Analyse zeigt, dass bei hoher Luftfeuchtigkeit Spuren von Oxiden ($< 0,1 \%$) auf der Oberfläche erscheinen, was den Reibungswiderstand weiter erhöht. Bei Trockenverarbeitung oder in Meeresumgebungen kann eine Feuchtigkeitskontrolle bei 30–50 % die Schmierwirkung optimieren. Die NiO-Passivierungsschicht aus Ni (Dicke $\sim 10 \text{ nm}$) bietet zusätzlichen Schutz in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit, und der Gewichtsverlust bleibt $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$. Zukünftig können Oberflächenbeschichtungen (wie TiN, Dicke $2 \mu\text{m}$) oder die Zugabe hygroskopischer Mittel (wie SiO_2 , $< 1 \%$) verwendet werden, um den Einfluss von Feuchtigkeit zu verringern und die geringe Reibung aufrechtzuerhalten.

(6) Umfassender Fall

Nehmen wir $\text{WC}_{10}\text{MoS}_2$ und WC_5MoS_2 als Beispiele: $\text{WC}_{10}\text{MoS}_2$ hat einen zu hohen MoS_2 -Gehalt (10 %), sodass K_{1c} auf $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ sinkt und der Reibungskoeffizient leicht auf $0,18 \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 ansteigt, was auf einen Kompromiss zwischen Zähigkeit und Schmierwirkung hindeutet; WC5MoS₂ wurde bei 1400 °C gesintert, K_{1c} erreichte 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5, Reibungskoeffizient 0,15 ± 0,01, Haftung 0,8 N ± 0,1 N und zeigte damit eine hervorragende Gesamtleistung. Bei einer Umgebungsfeuchtigkeit von 60 % steigt der Reibungskoeffizient von WC5MoS₂ auf 0,165 ± 0,01, kann aber durch Oberflächenpolieren (Ra < 0,05 µm) auf 0,16 ± 0,01 wiederhergestellt werden. Zukünftige Optimierungen sind möglich, indem der MoS₂-Gehalt auf 4–6 %, der C-Gehalt auf 2–4 %, die Korngröße auf 0,3 µm und die Sintertemperatur auf 1380–1420 °C gesenkt werden. Außerdem wird eine feuchtigkeitsbeständige Beschichtung entwickelt, um den Reibungskoeffizienten auf 0,12 und die Haftung auf < 0,5 N zu senken und so den hohen Anforderungen von Flugzeugtriebwerken und medizinischen Geräten gerecht zu werden.

Die Schmierleistung von WCTiCNi-Hartmetall wird durch den MoS₂-Gehalt (5 %), den C-Gehalt (3 %), die Korngröße (0,51 µm), die Sintertemperatur (1400 °C) und die Umgebungsfeuchtigkeit (< 50 %) beeinflusst. 5 % MoS₂ senken den Reibungskoeffizienten auf < 0,2, 3 % C verringern die Haftung, feine Körner und Sintern bei moderater Temperatur gewährleisten die Stabilität des Transferfilms, und hohe Luftfeuchtigkeit erhöht die Reibung. Basierend auf WC5MoS₂ ist seine Leistung besser als die von WC10MoS₂, und die Schmierwirkung kann durch Optimierung des Verhältnisses und der Beschichtung weiter verbessert werden.

9.3.2.4 Optimierung von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS₂, C)

Um einen Reibungskoeffizienten von < 0,2 ± 0,01 für Hartmetall-Festschmierstoffe zu erreichen und gleichzeitig die Antihafteleistung (Haftkraft < 0,8 N ± 0,1 N) und die mechanische Stabilität (Härte > HV 1500, K_{1c} > 10 MPa·m^{1/2}) zu berücksichtigen, ist eine umfassende Strategie aus Schmierstoffoptimierung, Anpassung des Sinterprozesses, Kornkontrolle und Oberflächenbehandlung erforderlich. Diese Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, die selbstschmierende Wirkung von MoS₂ und C zu verbessern und die Anforderungen an geringe Reibung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (> 500 m/min), bei der Trockenbearbeitung und beim Formenbau zu erfüllen, während gleichzeitig die strukturelle Integrität der WC-Matrix erhalten bleibt und so zuverlässiger Halt für Anwendungen wie elektronische Formen, Schiffsausrüstung und Luftfahrtkomponenten geboten wird. Nachstehend folgt eine detaillierte Beschreibung des Optimierungsschemas unter den Aspekten der Prozessparameter, der Mikrostruktur und der Oberflächeneigenschaften. Seine Durchführbarkeit wird durch Kombination tatsächlicher Ergebnisse überprüft.

(1) Schmierstoffoptimierung

Die Optimierung des Schmiermittels ist der Schlüssel zur Reduzierung des Reibungskoeffizienten. Der MoS₂-Gehalt ist auf 5 % ± 0,1 % eingestellt, und seine Schichtstruktur (Schichtabstand 6,2 Å ± 0,1 Å) und die geringe Scherkraft (< 1 MPa ± 0,1 MPa) verringern wirksam den Reibungswiderstand durch Bildung eines Transferfilms (Dicke 10 nm ± 1 nm), wodurch der Reibungskoeffizient auf 0,15 ± 0,01 gesenkt werden kann. Der C-Gehalt ist auf 3 % ± 0,1 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eingestellt, und seine sp^2 -Bindungsstruktur (C-C-Bindungsenergie $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) ermöglicht lamellares Gleiten (Gleitenergie $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$), wodurch die Haftkraft auf $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ reduziert wird, was sich besonders für die Verarbeitung klebriger Materialien eignet. Die SEM-Analyse zeigt, dass MoS_2 und C gleichmäßig in der WC-Matrix verteilt sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), mit einer Abdeckungsrate von $> 90 \% \pm 2 \%$, wodurch die durch einen übermäßigen Gehalt ($> 10 \% \text{ MoS}_2$ oder $> 5 \% \text{ C}$) verursachte Abnahme der Zähigkeit (K1c-Abnahme um $10\text{--}15 \%$) vermieden wird. Die Zugabe von Spuren von Inhibitoren (z. B. VC, $< 1 \%$) kann die Kompatibilität von Schmierstoffen mit WC weiter optimieren und die Stabilität des Schmierfilms verbessern.

(2) Sinterprozess

Der Sinterprozess wirkt sich direkt auf die Integrität des Schmiermittels und die Dichte des Materials aus. Die empfohlene Temperatur beträgt $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ und der Druck $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, was durch Heißpressen erreicht wird. $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ist niedriger als die Zersetzungstemperatur von MoS_2 ($> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), wodurch sichergestellt wird, dass das Schmiermittel keiner thermischen Zersetzung unterliegt. Die SEM-Beobachtung zeigt, dass MoS_2 - und C-Partikel eine stabile Verteilung beibehalten (Abweichung $< 0,1 \%$), die Dichte $99 \% \pm 0,1 \%$ erreicht und die Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ beträgt. Hoher Druck (50 MPa) fördert die Einbettung des Schmiermittels in die WC-Phasengrenze, wodurch ein kontinuierliches Schmiernetzwerk gebildet und die Reibungswärme ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) reduziert wird. Im Vergleich zum herkömmlichen Vakuumsintern vermeidet das Heißpressverfahren die durch hohe Temperaturen ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C}$) verursachte Schmierstoffzersetzung ($> 5 \% \pm 1 \%$). Die schrittweise Erwärmung (Vorwärmen auf $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, anschließendes Erhitzen auf $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) reduziert zudem die thermische Belastung und gewährleistet ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Schmierwirkung und Härte ($> \text{HV } 1500$). Die Argon-Schutzatmosphäre verhindert zusätzlich Oxidation und verbessert die Langzeitstabilität des Schmierfilms.

(3) Kornkontrolle

Die präzise Kontrolle der Korngröße ist ein wichtiges Mittel zur Optimierung der Schmierleistung. Ziel ist eine Korngröße von $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$. Die Tragfähigkeit des Schmierstoffs und die Stabilität des Transferfilms werden durch feine Korngrenzen (Dichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) verbessert. Die SEM-Analyse zeigt, dass bei einer Korngröße von $0,51 \text{ } \mu\text{m}$ die MoS_2 - und C-Partikel gleichmäßig an den Korngrenzen verteilt sind, die Transferfilmbedeckung $> 90 \% \pm 2 \%$ beträgt, der Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,01$ bleibt und die Haftkraft $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ beträgt. Wenn die Korngröße $2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ überschreitet, verringert sich die Anzahl der Korngrenzen, die Transferfilmbedeckung verringert sich ($< 85 \%$), der Reibungskoeffizient kann um $10 \% \pm 2 \%$ zunehmen und die Haftkraft steigt auf über 1 N . Eine Kornverfeinerung wird durch Zugabe von Inhibitoren (wie VC, $0,5 \% - 1 \%$) und Verlängerung der Kugelmahlzeit ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) erreicht. In Zukunft können Nanopartikel ($< 0,3 \text{ } \mu\text{m}$) erforscht werden, um die Schmiereffizienz weiter zu verbessern und sich an Arbeitsbedingungen mit hoher Belastung ($> 200 \text{ N}$) anzupassen.

(4) Oberflächenbehandlung

Die Oberflächenbehandlung optimiert die Schmierleistung durch Poliertechnik. Es wird empfohlen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Oberflächenrauheit (Ra) auf $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ zu kontrollieren und Diamantpolieren oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP) zu verwenden, um Oberflächendefekte und Mikrorisse zu entfernen. Die flache Oberfläche verringert den direkten Kontakt des Reibpaares, verbessert die Haftung des MoS₂-Transferfilms (Bedeckung $> 95 \% \pm 2 \%$), verringert den Reibungskoeffizienten auf $0,15 \pm 0,01$ und verringert die Haftung weiter auf $< 0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Nach dem Polieren wird eine Ultraschallreinigung durchgeführt, um Rückstände zu entfernen, SEM überprüft die Oberflächengleichmäßigkeit (Abweichung $< 0,1 \%$) und reduziert den durch Feuchtigkeit ($> 50 \%$) verursachten Anstieg des Reibungskoeffizienten ($< 5 \% \pm 1 \%$). Die Oberflächenbehandlung fördert zudem die schnelle Ableitung der Reibungswärme ($< 90 \text{ }^\circ\text{C}$) und verlängert die Werkzeuglebensdauer. Bei der Formgebung reduziert ein Ra-Wert $< 0,05 \mu\text{m}$ die Entformungskraft ($< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) deutlich und verbessert die Oberflächenqualität des Werkstücks. Zukünftig könnten TiN-Beschichtungen (Dicke $2 \mu\text{m}$) oder Plasmanitrieren die Oberflächenverschleißfestigkeit und die Schmierdauer verbessern.

(5) Umfassender Optimierungseffekt und Anwendungsüberprüfung

Durch die obige Strategie wurde für WC5MoS₂C3 (5 % MoS₂, 3 % C) durch Heißpressintern bei $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, Korngröße $0,51 \mu\text{m}$ und Ra $< 0,05 \mu\text{m}$ ein Reibungskoeffizient von $0,15 \pm 0,01$, eine Haftung von $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, eine Härte von HV 1550 ± 30 und K1c $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ erreicht, was besser als der Zielwert ist. Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (500 m/min) erhöht sich die Standzeit um 30 %, und die Reibungswärme liegt unter $90 \text{ }^\circ\text{C}$, was den Anforderungen der Trockenbearbeitung entspricht. Beim Formenbau wird die Entformungskraft auf 8 N reduziert, wodurch die Kunststoffhaftung verringert wird. Bei Schiffsausrüstung ermöglicht die geringe Haftung eine Lebensdauer von über fünf Jahren. Im Vergleich zu WC10Co (Reibungskoeffizient $0,5 \pm 0,05$, Haftung $> 2 \text{ N}$) weist das WCTiCNi-System deutliche Vorteile auf. Zukünftig können Nanoschmiermittel oder Mehrschichtbeschichtungen eingesetzt werden, um den Reibungskoeffizienten weiter auf 0,12 und die Haftung auf $< 0,5 \text{ N}$ zu senken und so den hohen Anforderungen von Flugzeugtriebwerken und medizinischen Geräten gerecht zu werden.

(6) Umweltkontrolle und künftige Entwicklung

Während der Prüfung und Anwendung muss die Umgebungsfeuchtigkeit bei 30–50 % gehalten werden, um einen Anstieg des Reibungskoeffizienten ($10 \% \pm 2 \%$) um $> 50 \% \pm 5 \%$ zu vermeiden. Argongeschützte Sinter- und feuchtigkeitsbeständige Beschichtungen (wie SiO₂, $< 1 \%$) können die Auswirkungen der Feuchtigkeit verringern und die Schmierleistung aufrechterhalten. Zukünftig können dynamische Schmiersimulationen (wie Hochgeschwindigkeitsrotationstests) und Langzeit-Belastungstests (> 1000 Stunden) eingeführt werden. Mithilfe der Plasmaspritztechnologie kann die Dicke der Schmierschicht auf $15 \mu\text{m}$ erhöht, die Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) oder hohen Belastungen ($> 200 \text{ N}$) optimiert und das Anwendungspotenzial in den Bereichen Energie und Schwermaschinen erweitert werden.

Hartmetall-Festschmierstoff optimiert den Reibungskoeffizienten $< 0,2$ durch MoS₂ 5 % und C 3 %. Heißpressintern bei $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ sorgt für Schmiermittelstabilität. $0,51\text{-}\mu\text{m}$ -Körner verbessern den Transferfilmeffekt. Die Oberflächenbehandlung mit Ra $< 0,05 \mu\text{m}$ reduziert die Haftung. WC5MoS₂

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C3 beispielsweise ist leistungsfähiger als WC10Co. Durch Nanotechnologie und verbesserte Beschichtungen kann es zukünftig noch besser den Anforderungen extremer Arbeitsbedingungen gerecht werden.

9.3.2.3 Technische Anwendungen von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS₂, C)

Durch die Verwendung von MoS₂ und C als Festschmierstoffe verbessert selbstschmierendes Hartmetall seine Leistung unter reibungsarmen und langlebigen Arbeitsbedingungen deutlich und erfüllt so die vielfältigen Anforderungen der modernen Industrie an effiziente Verarbeitung und Umweltschutz. Dank seines hervorragenden Reibungskoeffizienten ($< 0,2 \pm 0,01$) und seiner Haftung ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) zeigt dieser Werkstoff hervorragende Leistung in Anwendungsbereichen wie Hochgeschwindigkeitsschneiden, Trockenbearbeitung und Formenbau. Dies verlängert nicht nur die Lebensdauer von Werkzeugen und Formen, sondern reduziert auch den Energieverbrauch und die Wärmeentwicklung während der Verarbeitung. Im Folgenden wird sein technischer Anwendungswert anhand spezifischer Anwendungsszenarien, Leistungsvorteile und Praxisbeispiele detailliert erläutert und sein Beitrag zu industrieller Effizienz und nachhaltiger Entwicklung analysiert.

(1) Hochgeschwindigkeitsschneiden

Im Bereich des Hochgeschwindigkeitsschneidens ist WC5MoS₂ aufgrund seiner hervorragenden selbstschmierenden Eigenschaften die ideale Wahl. Die Korngröße wird auf $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert, wodurch sichergestellt wird, dass die MoS₂-Partikel gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und einen stabilen Transferfilm (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) bilden. Der Reibungskoeffizient wird auf $0,15 \pm 0,01$ reduziert. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Transferfilmbedeckung $> 90 \% \pm 2 \%$ beträgt, was den direkten Kontakt zwischen den Spänen und der Werkzeugoberfläche deutlich reduziert und die Werkzeuglebensdauer um mehr als $5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ verlängert und damit die Lebensdauer herkömmlicher WC10Co-Werkzeuge (Standzeit ca. 3000 m) deutlich übertrifft. Diese Leistung ist besonders bei der Verarbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie etwa Titanlegierungen) oder bei Hochgeschwindigkeitsbedingungen ($> 500 \text{ m/min}$) hervorzuheben, da sie die Verschleißrate und die Schnittkraft verringert, die Oberflächengüte verbessert und den Kühlmittelverbrauch reduziert, was dem Trend zur umweltfreundlichen Fertigung entspricht.

(2) Trockenverarbeitung

bietet gute Leistungen dank geringer Haftung und Wärmemanagementfähigkeiten. Durch Polieren der Oberfläche auf $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ werden Oberflächendefekte und Mikrorisse reduziert und die sp²-Bindungsstruktur von C (Gleitenergie $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) bildet einen gleichmäßigen Schmierfilm und die Haftung wird auf $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ reduziert, was besonders für die Bearbeitung klebriger Materialien wie Aluminiumlegierungen oder Kupfer geeignet ist. Die Reibungswärme wird auf $< 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ kontrolliert und die SEM-Beobachtung zeigt, dass die Schmierfilmdicke etwa $5\text{--}10 \mu\text{m}$ beträgt, was Wärme effektiv ableitet und Hochtemperaturhaftung verhindert, wodurch die Werkzeuglebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Materialien um etwa 20–30 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verlängert wird. Die Trockenbearbeitung ohne Kühlmittel verringert die Umweltverschmutzung und verringert die Bearbeitungskosten. Sie wird häufig bei der Herstellung von Autoteilen und elektronischen Komponenten eingesetzt und zeigt das Potenzial von selbstschmierendem Hartmetall hinsichtlich Umweltschutz und hocheffizienter Bearbeitung.

(3) Formgebung

In der Formenherstellung wird WC5MoS₂ aufgrund seiner geringen Entformungskraft und langen Lebensdauer bevorzugt. Die Schichtstruktur von MoS₂ (Schichtabstand 6,2 Å ± 0,1 Å) reduziert den Reibungskoeffizienten durch schwache Van-der-Waals-Kräfte (0,1 eV ± 0,01 eV) und die Entformungskraft auf < 10 N ± 1 N. Dies verringert die Haftung von Kunststoff- oder Metallwerkstücken an der Formoberfläche und verbessert die Oberflächenqualität der Formteile. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Schmierfilmbedeckung > 90 % ± 2 % beträgt. Dies ermöglicht eine Lebensdauer der Form von mehr als dem 10⁶-fachen ± 10⁵-fachen und übertrifft damit die Lebensdauer der WC10Co-Form (ca. 5 × 10⁵-fachen). Diese Leistung ist hervorragend beim Präzisions-spritzguss und -stanzen, beispielsweise bei der Herstellung von Handygehäusen und Autoarmaturen Brettern, da sie Entformungsfehler und Wartungshäufigkeit reduziert und die Produktionseffizienz sowie den wirtschaftlichen Nutzen deutlich verbessert.

(4) Beschichtung von Luftfahrtteilen

WC10MoS₂ wird auch im Bereich der Beschichtung von Flugzeugkomponenten eingesetzt, insbesondere als verschleißfeste Beschichtung für Turbinenschaufeln und Triebwerke. Sein niedriger Reibungskoeffizient (0,15 ± 0,01) reduziert den Verschleiß durch Hochgeschwindigkeitsluftströmungen und Partikelabrieb. Die Korngröße von 0,5 µm ± 0,01 µm gewährleistet eine gleichmäßige Schmierstoffverteilung und verlängert die Lebensdauer auf über 6.000 Stunden. Die hohe Temperaturstabilität von MoS₂ (> 400 °C) erhält die Schmierwirkung im Umfeld von Flugzeugtriebwerken. Die Reibungswärme liegt unter 100 °C, was die Ermüdungsbeständigkeit der Komponenten erhöht und die Wartungskosten senkt. Es erfüllt die Zuverlässigkeitsanforderungen bei Höhenflügen.

(5) Ölbohrwerkzeuge

In Ölbohrwerkzeugen wird WC8MoS₂C (5 MoS₂ %, 3 C) aufgrund seiner hervorragenden Antihaft- und Verschleißfestigkeit bevorzugt. Der Schmierfilm reduziert die Haftung zwischen Bohrer und Gestein. Die Haftkraft beträgt < 0,8 N ± 0,1 N, was die Lebensdauer des Bohrers im Vergleich zu herkömmlichen Materialien um etwa 25 % verlängert. Unter Trockenbohrbedingungen liegt die Reibungswärme unter 100 °C. Die synergistische Wirkung von MoS₂ und C verringert den Schnittwiderstand und verbessert die Bohrleistung, insbesondere in schwefelhaltigen oder hochharten Gesteinsformationen. Dies reduziert die Austauschhäufigkeit und die Betriebskosten.

(6) Medizinprodukte

WC5MoS₂ setzt sich auch im Bereich der Medizintechnik, beispielsweise bei orthopädischen Skalpellen und Zahnbohrern, durch. Der Reibungskoeffizient von 0,15 ± 0,01 und die Adhäsion von 0,7 N ± 0,1 N sorgen für reibungsarmes Schneiden und reduzieren Gewebeschäden und Adhäsion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Oberflächenpolitur auf $Ra < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ verbessert die Schärfe der Schneide. Die Lebensdauer beträgt mehr als das 5.000-Fache. Dies erfüllt die hohen Präzisionsanforderungen in steriler Umgebung und erhöht die chirurgische Sicherheit und die Haltbarkeit der Instrumente.

(7) Umfassende Vorteile und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten

Diese Anwendungen demonstrieren die Überlegenheit von selbstschmierendem Hartmetall bei der Reduzierung von Reibung und Haftung. Es verlängert die Werkzeugstandzeit beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, reduziert die Umweltbelastung bei der Trockenbearbeitung, verbessert die Produktionseffizienz beim Formenbau, erhöht die Bauteilhaltbarkeit bei Flugzeugbeschichtungen, verbessert die Betriebseffizienz von Ölbohrwerkzeugen und gewährleistet die chirurgische Qualität von Medizinprodukten. Im Vergleich zu WC10Co (Reibungskoeffizient $0,5 \pm 0,05$, Haftung $> 2 \text{ N}$) ist der Reibungskoeffizient des WCTiCNi-Systems um etwa 70 % reduziert, die Haftung um mehr als 50 %, was die Bearbeitungsgenauigkeit und die Werkzeugstandzeit deutlich verbessert. Darüber hinaus ermöglichen die selbstschmierenden Eigenschaften auch neue Anwendungen, wie z. B. verschleißfeste Schichten für Eisenbahnschienen. WC8MoS₂C reduziert Reibungsverluste zwischen Gleisen und Radsätzen. Tragbare Elektronik. Die geringe Haftung von WC3C unterstützt flexible leitfähige Komponenten. Zukünftig kann das Anwendungspotenzial in den Bereichen Energie, Luftfahrt und Medizin durch Nanoschmierstoffe oder Mehrschichtbeschichtungen weiter ausgebaut werden.

Selbstschmierendes Hartmetall eignet sich hervorragend für Hochgeschwindigkeitszerspanung, Trockenbearbeitung, Formenbau, Flugzeugbeschichtungen, Ölbohrwerkzeuge und medizinische Geräte. Der Reibungskoeffizient von WC5MoS₂ beträgt $0,15 \pm 0,01$ und die Standzeit $> 5000 \text{ m}$, die Haftkraft von WC3C $0,8 \text{ N}$ und die Reibungswärme $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Entformungskraft von WC5MoS₂ beträgt $< 10 \text{ N}$ und die Standzeit $> 10^6$ -mal. Dies bestätigt die verbesserte Verarbeitungseffizienz und Lebensdauer durch optimierte Schmierung. Durch Materialinnovationen kann es zukünftig ein breiteres Spektrum technischer Anforderungen erfüllen.

9.3.2 Oberflächenbeschaffenheit und Schmiermechanismus von Hartmetall

9.3.2.1 Übersicht über die Oberflächenstruktur von Hartmetall sowie Prinzipien und Technologien des Schmiermechanismus

Das Design der Oberflächenstruktur von Hartmetall verbessert dessen Selbstschmier- und Antihafteigenschaften durch die Einführung spezifischer Mikrostrukturen auf der Materialoberfläche erheblich. Die Texturtiefe ist auf $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ eingestellt, und der Abstand beträgt $50\text{--}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Diese Texturstrukturen reduzieren effektiv den Reibungskoeffizienten ($< 0,2 \pm 0,01$) und die Haftung ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$), indem sie Festschmierstoffe (wie MoS₂ und C) speichern und Verschleißspäne (Größe $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) auffangen. So werden die Anforderungen an geringe Reibung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, bei der Trockenbearbeitung und beim Formenbau erfüllt. Das Texturdesign basiert auf der Stribeck-Kurventheorie. Durch Optimierung der fluiddynamischen Schmierung beträgt die Ölfilmdicke ca. $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Dies verbessert die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schmierwirkung bei gleichbleibender Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und Härte ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). Im Vergleich zur unstrukturierten Oberfläche reduziert die Strukturstruktur nicht nur den direkten Kontakt der Reibpaarung, sondern fängt auch Verschleißpartikel durch Mikrorillen oder -gruben auf. Dies verhindert Sekundärverschleiß und verlängert die Werkzeuglebensdauer. Ziel ist die synergetische Optimierung von Schmierfähigkeit und Verschleißfestigkeit, die sich für anspruchsvolle Anwendungen wie elektronische Formen, Luftfahrtkomponenten und Ölbohrwerkzeuge eignet.

Die Textur wird durch Laserbearbeitungstechnologie erreicht, wobei ein Lasergerät mit einer Wellenlänge von $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ und einer Leistung von $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet wird, um die Konsistenz von Texturtiefe und -abstand zu gewährleisten. Beispielsweise wird der Reibungskoeffizient der WC5MoS₂-Probe bei einer Texturtiefe von $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ auf $0,12 \pm 0,01$ reduziert, was besser ist als bei der untexturierten Probe ($0,15 \pm 0,01$), und die Adhäsionskraft wird auf $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ reduziert, was bestätigt, dass die Oberflächentextur die Schmierleistung deutlich verbessert. In diesem Abschnitt wird eine detaillierte Analyse unter den Aspekten Schmiermechanismus, Bearbeitungstechnologie und technische Anwendung durchgeführt, um zu untersuchen, wie durch Texturdesign die Reibung und Haltbarkeit von Hartmetall optimiert werden kann.

9.3.2.2 Technologie zur Bearbeitung von Hartmetalloberflächen

Die Texturbearbeitung erfolgt mittels Lasertechnologie. Der Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ wird für präzises Ätzen bei einer Leistung von $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ eingesetzt. Die Scangeschwindigkeit beträgt $100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$, die Genauigkeit erreicht $\pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Nach Optimierung der Laserparameter bilden die Texturtiefe von $110 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ und der Abstand von $50\text{--}100 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ eine gleichmäßige Mikrostruktur. Mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM) wird die Glätte der Texturkanten ($R_a < 0,05 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) zur Vermeidung von Spannungskonzentrationen bestätigt. Während der Bearbeitung verhindert die Argon-Schutzatmosphäre die Oxidation von MoS₂ (Zersetzungstemperatur $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und gewährleistet die Stabilität des Schmiermittels. Im Vergleich zur mechanischen Bearbeitung reduziert das Laserverfahren die Wärmeeinflusszone ($< 10 \text{ }\mu\text{m}$) und erhält die Härte der WC-Matrix ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). Eine anschließende Wärmebehandlung (z. B. Anlassen bei $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) beseitigt Eigenspannungen und verbessert die Bindung zwischen Textur und Matrix. Beispielsweise reduziert sich nach der Lasertexturierung der Reibungskoeffizient von WC5MoS₂ von $0,15 \pm 0,01$ auf $0,12 \pm 0,01$, und die Verschleißrate beträgt $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, was die Wirksamkeit der Prozessoptimierung belegt.

Analyse der Oberflächenstruktur und des Schmiermechanismus von Hartmetall

Die Oberflächenstruktur von Hartmetall verbessert durch die Mikrostrukturgestaltung dessen Selbstschmierungs- und Verschleißschutzeigenschaften deutlich. Die Struktur reduziert den Reibungskoeffizienten und den Oberflächenverschleiß durch erhöhte Schmierstoffspeicherung, optimierte Ölfilmbildung und das Auffangen von Verschleißpartikeln. Dies gewährleistet eine effiziente Schmierung für Anwendungen wie Hochgeschwindigkeitsschneiden,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Trockenbearbeitung und Formenbau. Dieser Abschnitt analysiert eingehend den Schmiermechanismus der Textur und untersucht deren Einfluss auf Reibungskoeffizient, Verschleißrate und Scherkraft. Durch die Kombination mikroskopischer Beobachtungen und experimenteller Daten wird aufgezeigt, wie Texturtiefe, -abstand und Verarbeitungstechnologie mit dem MoS₂-Transferfilm zusammenwirken, um die Schmierwirkung zu optimieren. Zudem werden Vorschläge zur Leistungsoptimierung gemacht.

9.3.2.3 Oberflächenbeschaffenheit und Schmiermechanismus von Hartmetall

Die Oberflächentextur verbessert die Selbstschmierleistung erheblich, indem sie die Schmiermittelspeicherkapazität erhöht ($> 90 \% \pm 2 \%$). Die Mikrorillen oder -gruben speichern MoS₂- und C-Partikel und bilden einen durchgehenden Ölfilm (Dicke $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), der den Reibungskoeffizienten auf $0,12 \pm 0,01$ verringert. Dieser Ölfilm sorgt für eine hydrodynamische Schmierung zwischen den Reibpaarungen und verringert den direkten Metallkontakt. Die Stribeck-Kurve zeigt, dass die Texturstruktur unter Mischschmierungsbedingungen die Schmiermittelverteilung optimiert und den Reibungswiderstand verringert. Die Textur verringert auch den Dreikörperverschleiß, indem sie Verschleißpartikel (Größe $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) einfängt, und die Verschleißrate wird auf $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ kontrolliert, insbesondere beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (z. B. $> 500 \text{ m/min}$). Eine Texturtiefe von $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ optimiert den fluidodynamischen Effekt, lokalen Druck $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ und verbessert die Tragfähigkeit des Ölfilms; ein Abstand von $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ gewährleistet einen gleichmäßigen Ölfilm (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), um lokale Schmierungsmängel zu vermeiden. Der Transferfilm aus MoS₂ (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) verringert die Scherkraft weiter ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$), und seine Schichtstruktur (Schichtabstand $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) gleitet innerhalb der Textur mit einer Bedeckung $> 90 \% \pm 2 \%$ und reduziert synergistisch die Adhäsionskräfte ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$).

9.3.2.4 Mikroskopische Betrachtung und Überprüfung der Oberflächenstruktur von Hartmetall

Die SEM-Analyse zeigte, dass der Abriebabrieb auf der strukturierten Oberfläche deutlich reduziert war ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), was darauf hindeutet, dass der Texturerfassungseffekt wirksam war und Sekundärverschleiß und Oberflächenkratzer reduziert wurden. Die EDS-Erkennung bestätigte, dass MoS₂ im Texturbereich angereichert war (Mo:S-Verhältnis $\sim 1:2 \pm 0,1$), wodurch die chemische Stabilität des Schmiermittels bestätigt wurde. XPS zeigte außerdem die S2p-Spitzenposition von MoS₂ ($\sim 162 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), was die Quelle seiner geringen Schereigenschaften unterstützt. Nach der Laserbearbeitung betrug die Oberflächenrauheit $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, die Texturintegrität $> 95 \% \pm 2 \%$, und mittels SEM wurde beobachtet, dass die Texturkante glatt war, ohne offensichtliche Wärmeeinflusszone ($< 10 \mu\text{m}$), was eine gleichmäßige Haftung des Schmiermittels und die Stabilität des Ölfilms sicherstellte. Im Vergleich zur unstrukturierten Oberfläche ($R_a \sim 0,5 \mu\text{m}$) verbessert die geringere Rauheit der strukturierten Oberfläche die Haftung des Schmierstoffs und verlängert die Werkzeuglebensdauer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2.5 Einfluss der Oberflächentexturparameter von Hartmetall

Die Texturtiefe hat einen doppelten Effekt auf Schmierung und Verschleißverhalten. Eine Tiefe von $5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ optimiert den hydrodynamischen Effekt und ein Druck von $> 1\ \text{MPa} \pm 0,1\ \text{MPa}$ unterstützt die Ölfilmstabilität bei einem Reibungskoeffizienten von $0,12 \pm 0,01$. Übersteigt die Texturtiefe jedoch $10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, erhöht sich die Verschleißrate um etwa $10\ \% \pm 2\ \%$. Dies liegt daran, dass zu tiefe Texturen zu Spannungskonzentrationen oder übermäßiger Schmierstoffansammlung führen können. SEM-Analysen zeigen, dass bei einer Tiefe von $> 10\ \mu\text{m}$ die Effizienz der Verschleißpartikelerfassung abnimmt ($< 85\ \%$) und der lokale Verschleiß zunimmt. Ein Abstand von $50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung des Ölfilms (Abweichung $< 0,1\ \% \pm 0,02\ \%$). Ein zu großer Abstand ($> 100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) kann die Schmiermittelspeichereffizienz verringern und den Reibungskoeffizienten auf $0,18 \pm 0,01$ erhöhen. Schmierung und Verschleißfestigkeit können künftig durch ein mehrskaliges Texturdesign (z. B. $5\ \mu\text{m}$ Mikrotextur kombiniert mit $100\ \text{nm}$ Nanotextur) ausgeglichen werden.

(1) Reibungsverhalten und Geschwindigkeitseinfluss

Der Reibungskoeffizient zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit. Bei Geschwindigkeiten $> 0,5\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$ sinkt der Reibungskoeffizient leicht ($< 5\ \% \pm 1\ \%$). Das liegt daran, dass die dynamische Bildung des MoS_2 -Transferfilms bei hoher Geschwindigkeit beschleunigt wird, die Ölfilmdicke leicht zunimmt ($> 1,1\ \mu\text{m}$) und die Scherkraft weiter reduziert wird ($< 0,9\ \text{MPa}$). SEM-Beobachtungen zeigen, dass nach Hochgeschwindigkeitsreibung die Transferfilmbedeckungsrate auf $> 95\ \% \pm 2\ \%$ zunimmt und die Haftkraft auf $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$ sinkt. Eine zu hohe Geschwindigkeit ($> 1\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$) kann jedoch zu einer Beschädigung des Ölfilms ($< 90\ \%$) führen, und der Reibungskoeffizient steigt wieder an. Die Texturtiefe und der Schmiermittelgehalt müssen optimiert werden, um sie an die Arbeitsbedingungen bei hohen Geschwindigkeiten anzupassen. Die Kontrolle der Reibungswärme ($< 100\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$) profitiert von der Wärmeableitung der Textur, was die Lebensdauer des Werkzeugs verlängert.

(2) Anwendungsüberprüfung und Optimierungsrichtung

Der Texturschmiermechanismus wurde in technischen Anwendungen nachgewiesen. Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden beträgt der Reibungskoeffizient von WC5MoS_2 (Texturtiefe $5\ \mu\text{m}$) $0,12 \pm 0,01$, die Standzeit $> 5000\ \text{m} \pm 500\ \text{m}$ und die Schnittkraft ist reduziert; bei der Trockenbearbeitung beträgt die Haftung von WC3C $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$, die Reibungswärme $< 100\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$ und es eignet sich für die Verarbeitung von Aluminiumlegierungen; beim Formenbau beträgt die Entformungskraft von WC5MoS_2 $< 10\ \text{N} \pm 1\ \text{N}$ und die Standzeit $> 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$. Zukünftige Optimierungen können durch die Anpassung der Texturtiefe auf $7\text{--}10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ erreicht werden, um die Tragfähigkeit des Ölfilms zu verbessern und den Reibungskoeffizienten auf $0,1 \pm 0,01$ zu reduzieren; durch die Verwendung von Laser-Nanobearbeitung (Wellenlänge $532\ \text{nm}$), um die Textur auf $100\ \text{nm}$ zu verfeinern und die Verschleißrate auf $< 0,04\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ zu reduzieren; durch die Kombination mit einer plasmagespritzten MoS_2 -Beschichtung (Dicke $15\ \mu\text{m}$) kann es an Umgebungen mit hohen Temperaturen ($> 800\ ^\circ\text{C}$) oder hohen Belastungen ($> 200\ \text{N}$) angepasst

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden, wie etwa in Flugzeugtriebwerken und schweren Maschinen.

Reduziert den Reibungskoeffizienten auf $0,12 \pm 0,01$ durch Speicherung von Schmierstoff ($> 90\%$) und Abfangen von Verschleißpartikeln. Die $5\text{ }\mu\text{m}$ Schichtdicke optimiert den hydrodynamischen Effekt. Der MoS_2 -Transferfilm (10 nm) reduziert die Scherkräfte. SEM und EDS bestätigen die Schmierwirkung. Die Laserbearbeitung gewährleistet $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$. Nanotexturierung und Beschichtungsoptimierung können die Leistung unter extremen Bedingungen zukünftig weiter verbessern.

9.3.2.6 Analyse der Faktoren, die die Oberflächenstruktur und Schmierung von Hartmetall beeinflussen

Die Schmierleistung der Hartmetall-Oberflächenstruktur wird durch eine Kombination von Faktoren beeinflusst, die den Reibungskoeffizienten und die Verschleißfestigkeit beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, der Trockenbearbeitung und der Formenherstellung durch Veränderung der Schmierstoffverteilung, der Ölfilmstabilität, der Verarbeitungsqualität und der Umgebungsbedingungen bestimmen. Wichtige Parameter wie Texturtiefe, Abstand, Schmierstoffgehalt, Bearbeitungsgenauigkeit und Umgebungsfeuchtigkeit wirken sich direkt auf das Gleichgewicht zwischen Selbstschmiereffekt und mechanischen Eigenschaften aus. Durch die Analyse der Mechanismen und Wechselwirkungen dieser Faktoren können Texturdesign und Verarbeitungstechnologie optimiert werden, um den Anforderungen anspruchsvoller Szenarien wie der Herstellung elektronischer Formen, Luftfahrtkomponenten und Ölbohrwerkzeugen gerecht zu werden. Dieser Abschnitt erörtert detailliert die Auswirkungen jedes Einflussfaktors auf die Schmierleistung anhand seiner Eigenschaften, experimentellen Daten und Anwendungsfälle und unterbreitet Verbesserungsvorschläge.

(1) Texturtiefe

Die Texturtiefe hat einen erheblichen Einfluss auf die Schmierung und das Verschleißverhalten. Bei einer Tiefe von $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ bleibt der Reibungskoeffizient niedrig ($< 0,12 \pm 0,01$). Dies liegt daran, dass die entsprechende Tiefe die hydrodynamische Schmierung optimiert. Die Ölfilmdicke liegt bei etwa $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ und der Druck beträgt $> 1\text{ MPa} \pm 0,1\text{ MPa}$, um die Tragfähigkeit des Schmierstoffs zu unterstützen. Die SEM-Analyse zeigt, dass eine Tiefe von $5\text{ }\mu\text{m}$ sicherstellt, dass der MoS_2 -Transferfilm (Dicke $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) eine Bedeckung von $> 90\% \pm 2\%$ aufweist und die Verschleißrate bei $0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ liegt. Wenn die Texturtiefe jedoch $10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ überschreitet, erhöht sich die Verschleißrate um etwa $10\% \pm 2\%$. Der Grund dafür ist, dass eine zu tiefe Textur zu Spannungskonzentrationen oder übermäßiger Schmiermittelansammlung führt, was die Effizienz der Spanaufnahme ($< 85\%$) verringert und den lokalen Verschleiß verstärkt. Beispielsweise erreicht die Verschleißrate von WC5MoS_2 mit einer Texturtiefe von $15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ $0,08\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, während sie bei $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ nur $0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ beträgt. Dies zeigt, dass die Tiefe genau kontrolliert werden muss, um ein Gleichgewicht zwischen Schmierung und Verschleißfestigkeit herzustellen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Texturabstand

Der Texturabstand ist entscheidend für die Stabilität des Ölfilms und die Gleichmäßigkeit der Schmierung. Ein Abstandsbereich von $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ gewährleistet eine gleichmäßige Ölfilmverteilung (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$), einen Reibungskoeffizienten $< 0,12 \pm 0,01$ und eine Haftkraft $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$. SEM-Beobachtungen zeigen, dass die Mikrorillen im Abstand von $50\text{ }\mu\text{m}$ MoS₂- und C-Partikel effektiv speichern und die Transferfilmbedeckung $> 90\% \pm 2\%$ beträgt, was die Anforderungen für Hochgeschwindigkeitsschneiden und Trockenbearbeitung erfüllt. Bei einem Abstand von weniger als $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ erhöht sich der Reibungskoeffizient jedoch um etwa $5\% \pm 1\%$, da die zu dichte Struktur den Schmiermittelfluss einschränkt, die Ölfilmdicke abnimmt ($< 0,9\text{ }\mu\text{m}$), die lokale Kontaktfläche zunimmt und die Haftkraft auf $1\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ ansteigen kann. Bei einem zu großen Abstand ($> 100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) verringert sich die Speichereffizienz und der Reibungskoeffizient steigt auf $0,18 \pm 0,01$. Zur Optimierung der Abstandsverteilung ist eine Laserbearbeitung erforderlich. Zukünftig kann eine abgestufte Abstandsgestaltung zur Verbesserung der Schmierungsgleichmäßigkeit eingesetzt werden.

(3) Schmiermittel

Der Schmiermittelgehalt beeinflusst direkt die Qualität und die mechanischen Eigenschaften des Transferfilms. Bei einem MoS₂-Gehalt von $5\% \pm 0,1\%$ ist die Transferfilmbedeckung hoch ($> 90\% \pm 2\%$), der Reibungskoeffizient reduziert sich auf $0,12 \pm 0,01$, und die Schichtstruktur (Schichtabstand $6,2\text{ }\text{\AA}$) reduziert die Scherkraft ($< 1\text{ MPa} \pm 0,1\text{ MPa}$) durch schwache Van-der-Waals-Kräfte ($0,1\text{ eV} \pm 0,01\text{ eV}$). Die EDS-Analyse zeigt eine Anreicherung mit MoS₂ (Mo:S $\sim 1:2 \pm 0,1$), was die Antihafwirkung verstärkt. Wenn der MoS₂-Gehalt jedoch $10\% \pm 0,1\%$ übersteigt, verringert sich die Bruchzähigkeit (K_{1c}) um etwa $10\% \pm 2\%$, da das übermäßige Schmiermittel zu einer Schwächung oder Agglomeration der Korngrenzen ($> 0,1\%$) führt und somit das Risiko von Mikrorissen erhöht. Ein AC-Gehalt von $3\% \pm 0,1\%$ bietet sp²-Gleiten (Gleitenergie $0,01\text{ eV} \pm 0,001\text{ eV}$) und eine Haftung $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$. Wenn der C-Gehalt zu hoch ist ($> 5\% \pm 0,1\%$), verringert sich die Härte ($> 10\% \pm 2\%$) und das Verhältnis muss optimiert werden. Zukünftig können Nanoschmiermittel eingeführt werden, um die Abdeckung zu erhöhen.

(4) Verarbeitungsgenauigkeit

Die Bearbeitungsgenauigkeit ist entscheidend für die Texturqualität und den Schmiereffekt. Die Bearbeitung mit einer Laserleistung von $10\text{ W} \pm 0,1\text{ W}$ gewährleistet eine Texturintegrität von $> 95\% \pm 2\%$, eine Oberflächenrauheit $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Mittels SEM wird bestätigt, dass die Texturkante glatt ist und keine Wärmeeinflusszone ($< 10\text{ }\mu\text{m}$) vorhanden ist. Die hochpräzise Bearbeitung fördert die Haftung des MoS₂-Transferfilms, der Reibungskoeffizient bleibt bei $0,12 \pm 0,01$ und die Verschleißrate beträgt $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Wenn die Laserleistung jedoch $20\text{ W} \pm 0,1\text{ W}$ übersteigt, nimmt der Schaden um etwa $5\% \pm 1\%$ zu, im SEM sind Mikrorisse ($< 0,5\text{ }\mu\text{m}$) oder Schmelzzonen ($> 15\text{ }\mu\text{m}$) an den Rändern der Textur zu beobachten, die Stabilität des Ölfilms nimmt ab ($< 90\%$) und der Reibungskoeffizient steigt auf $0,16 \pm 0,01$. Zur Optimierung müssen Leistung und Scangeschwindigkeit ($100\text{ mm/s} \pm 1\text{ mm/s}$) gesteuert werden. Zur Verbesserung der Verarbeitungskonsistenz können künftig Mehrstrahllaser eingesetzt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Umwelt

Die Umgebungsbedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Schmierleistung. Bei einer Luftfeuchtigkeit von über 50 % $\pm$ 5 % erhöht sich der Reibungskoeffizient um etwa 10 % $\pm$ 2 %. Der Grund dafür ist, dass Wasser an den MoS₂- und C-Oberflächen adsorbiert wird, wodurch die Gleitfähigkeit zwischen den Schichten geschwächt, die Transferfilmbedeckung reduziert (< 85 %) und die Haftkraft auf 1 N $\pm$ 0,1 N ansteigt. SEM-Analysen zeigen, dass sich bei hoher Luftfeuchtigkeit Spurenoxide (< 0,1 %) auf der Oberfläche bilden und den Reibungswiderstand erhöhen. Bei Trockenverarbeitung oder in Meeresumgebungen kann eine Feuchtigkeitskontrolle bei 30–50 % die Schmierung optimieren. Die NiO-Passivierungsschicht von Ni (Dicke ca. 10 nm) bietet Schutz in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit und einem Gewichtsverlust von < 0,06 mg/cm². In Zukunft können feuchtigkeitsabweisende Beschichtungen (wie TiN, Dicke 2 μ m) oder Trockenmittel (wie SiO₂, < 1 %) verwendet werden, um die Auswirkungen von Feuchtigkeit zu verringern und die geringe Reibung aufrechtzuerhalten.

(6) Umfassende Fälle und Optimierungsrichtungen

Am Beispiel von WC5MoS₂ beträgt unter den Bedingungen einer Texturtiefe von 5 μ m $\pm$ 0,1 μ m, eines Abstands von 50 μ m $\pm$ 1 μ m, MoS₂ 5 % $\pm$ 0,1 % und einer Laserleistung von 10 W $\pm$ 0,1 W der Reibungskoeffizient 0,12 $\pm$ 0,01 und die Verschleißrate 0,05 mm³/N·m $\pm$ 0,01 mm³/N·m, besser als 0,08 mm³/N·m bei einer Tiefe von 15 μ m $\pm$ 0,1 μ m $\pm$ 0,01 mm³/N·m. Bei einer Umgebungsfeuchtigkeit von 60 % steigt der Reibungskoeffizient auf 0,132 $\pm$ 0,01, kann aber durch Polieren auf Ra < 0,05 μ m auf 0,125 $\pm$ 0,01 wiederhergestellt werden. Durch künftige Optimierungen kann die Texturtiefe auf 7–10 μ m $\pm$ 0,1 μ m angepasst werden, um die Ölfilm-Tragfähigkeit zu verbessern; der Abstand auf 40–60 μ m $\pm$ 1 μ m optimiert werden, um die Schmiergleichmäßigkeit zu verbessern; der MoS₂-Gehalt auf 4–6 % kontrolliert werden, um eine Verringerung der Zähigkeit zu vermeiden; die Laserleistung auf 8–12 W $\pm$ 0,1 W begrenzt werden, um Schäden zu verringern; und eine feuchtigkeitsbeständige Beschichtung entwickelt werden, die sich an Umgebungen mit hohen Temperaturen (> 800 °C) oder hoher Luftfeuchtigkeit (> 70 %) anpasst.

Die Schmierleistung der Hartmetall-Oberflächenstruktur wird durch die Strukturtiefe (5 μ m), den Abstand (50–100 μ m), den MoS₂-Gehalt (5 %), die Bearbeitungsgenauigkeit (10 W) und die Umgebungsfeuchtigkeit (< 50 %) beeinflusst. Eine Tiefe von 5 μ m reduziert den Reibungskoeffizienten auf 0,12, während eine zu große Tiefe den Verschleiß erhöht. Die Leistung unter extremen Arbeitsbedingungen kann durch Optimierung von Parametern und Beschichtungen verbessert werden.

9.3.2.7 Strategie zur Optimierung der Oberflächentextur und Schmierung von Hartmetall

Um einen Reibungskoeffizienten von < 0,2 $\pm$ 0,01 für die Hartmetalloberflächenstruktur zu erreichen und gleichzeitig die Antihafteigenschaften (Haftkraft < 0,8 N $\pm$ 0,1 N) und die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate < 0,06 mm³/N·m $\pm$ 0,01 mm³/N·m) zu berücksichtigen, ist eine umfassende Strategie aus Strukturdesign, Schmierstoffoptimierung, Verbesserung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verarbeitungstechnologie und Optimierung der Oberflächenbehandlung erforderlich. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, die selbstschmierende Wirkung von MoS₂ und C zu verbessern und die Anforderungen an geringe Reibung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden, Trockenbearbeiten und Formenbau zu erfüllen, während gleichzeitig die Härte ($> HV 1500 \pm 30$) und Zähigkeit ($K1c > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) der WC-Matrix erhalten bleiben. Nachfolgend wird das Optimierungsschema im Hinblick auf Texturparameter, Schmiermittelverhältnis, Verarbeitungstechnologie, Oberflächenbehandlung und Testspezifikationen detailliert beschrieben und seine Durchführbarkeit durch die Kombination tatsächlicher Ergebnisse überprüft.

(1) Texturdesign

Das Texturdesign ist der Kern der optimierten Schmierleistung. Es wird eine Tiefe von $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und ein Abstandsbereich von $50\text{--}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ empfohlen. Diese Tiefe bildet durch den hydrodynamischen Effekt einen stabilen Ölfilm (Dicke $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) bei einem Druck von $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$. Der Reibungskoeffizient wird dadurch auf $0,12 \pm 0,01$ reduziert. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Transferfilmbedeckung $> 90 \% \pm 2 \%$ beträgt. Der Abstand von $50\text{--}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung des Ölfilms (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), fängt Verschleißpartikel auf ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und verringert den Dreikörperverschleiß mit einer Verschleißrate von $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Im Vergleich zu einer Tiefe von $> 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ (Verschleißrate um $10 \% \pm 2 \%$ erhöht) vermeidet eine Tiefe von $5 \mu\text{m}$ Spannungskonzentrationen und eignet sich für Anforderungen beim Hochgeschwindigkeitsschneiden und Formenbau.

(2) Schmiermittel

Die Optimierung des Schmiermittels verbessert die Schmierwirkung. Der MoS₂-Gehalt ist auf $5 \% \pm 0,1 \%$ eingestellt. Seine Schichtstruktur (Schichtabstand $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) bildet durch schwache Van-der-Waals-Kräfte ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$) einen Transferfilm (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), wodurch der Reibungskoeffizient auf $0,12 \pm 0,01$ reduziert wird. Der C-Gehalt ist auf $3 \% \pm 0,1 \%$ eingestellt, und seine sp²-Bindungsstruktur (Gleitenergie $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) reduziert die Haftung auf $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. SEM bestätigt die Gleichverteilung des Schmiermittels (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). MoS₂ $> 10 \% \pm 0,1 \%$ oder C $> 5 \% \pm 0,1 \%$ können zu einer Verringerung von K1c ($10\text{--}15 \%$) führen. Spurenhemmer (z. B. VC, $< 1 \%$) können die Verträglichkeit optimieren. Zukünftig können Nanoschmiermittel zur Verbesserung der Abdeckung eingesetzt werden.

(3) Verarbeitungstechnologie

Die Verarbeitungstechnologie nutzt Lasertechnologie mit einer Wellenlänge von $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ und einer Leistung von $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, wodurch eine Texturgenauigkeit von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ und eine Scangeschwindigkeit von $100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$ gewährleistet werden. Die SEM-Beobachtung zeigt, dass die Texturintegrität bei einer Leistung von $10 \text{ W} > 95 \% \pm 2 \%$ und $Ra < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ beträgt und keine Wärmeeinflusszone ($< 10 \mu\text{m}$) vorhanden ist, was die Haftung des MoS₂-Transferfilms fördert. Im Vergleich zu einer Leistung von $> 20 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ (Schadenserhöhung um $5 \% \pm 1 \%$) werden bei 10 W Mikrorisse ($< 0,5 \mu\text{m}$) oder Schmelzzonen vermieden, und die Argon-Schutzatmosphäre verhindert die Oxidation von MoS₂ (Zersetzungstemperatur $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anschließendes Glühen bei $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ beseitigt Spannungen und verbessert die Bindung zwischen Textur und Substrat.

(4) Oberflächenbehandlung

Oberflächenbehandlung: Optimieren Sie die Gleitfähigkeit durch Polieren (empfohlene Rauheit: $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und beseitigen Sie Defekte durch Diamantpolieren oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP). Ebene Oberflächen verbessern die Haftung von MoS_2 -Transferfolien (Bedeckung $> 95\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$), verringern den Reibungskoeffizienten auf $0,12 \pm 0,01$ und die Haftung auf $< 0,7\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$. Ultraschallreinigung nach dem Polieren entfernt Rückstände, und SEM überprüft die Gleichmäßigkeit (Abweichung $< 0,1\text{ } \%$), wodurch die durch Feuchtigkeit ($> 50\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$) verursachte Reibungszunahme ($< 5\text{ } \% \pm 1\text{ } \%$) verringert wird. Beim Formenbau verringert $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ die Entformungskraft ($< 10\text{ N} \pm 1\text{ N}$) und verbessert die Werkstückqualität. Zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit kann es künftig mit einer TiN-Beschichtung (Dicke $2\text{ }\mu\text{m}$) kombiniert werden.

(5) Prüfvorschriften

Der Test erfolgt nach ASTM G99-Standard, Stift-Scheibe-Reibungs- und Verschleißtest, Belastung $10\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$, Geschwindigkeit $0,1\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$, und simuliert Betriebsbedingungen bei niedriger Geschwindigkeit. Die Umgebungstemperatur beträgt $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Luftfeuchtigkeit $50\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$, der Test wird dreimal wiederholt und der Durchschnitt ermittelt, um Reibungskoeffizient und Verschleißrate zu messen. Unter diesen Bedingungen beträgt der Reibungskoeffizient der $\text{WC5MoS}_2\text{ C3}$ -Probe $0,12 \pm 0,01$ und die Verschleißrate $0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ und ist damit besser als die nicht optimierte Probe ($0,15 \pm 0,01$). Durch die Kombination von SEM und EDS zur Analyse der Transferfilmbedeckung und Schmiermittelverteilung kann es in Zukunft auf Hochgeschwindigkeitstests ($> 0,5\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$) oder Hochtemperaturumgebungen ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) ausgeweitet werden.

(6) Umfassender Optimierungseffekt und Anwendungsüberprüfung

Durch die obige Strategie weist $\text{WC5MoS}_2\text{C3}$ unter den Bedingungen einer Texturtiefe von $5\text{ }\mu\text{m}$, einer Teilung von $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$, eines 1064-nm -Lasers und $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ einen Reibungskoeffizienten von $0,12 \pm 0,01$, eine Haftkraft von $0,7\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ und eine Verschleißrate von $0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ auf. $\pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Härte $\text{HV } 1550 \pm 30$, $\text{K1c}_{10}\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Standzeit $> 5000\text{ m} \pm 500\text{ m}$ beim Hochgeschwindigkeitsschneiden; Reibungswärme $< 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei der Trockenbearbeitung; Standzeit $> 10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$ beim Gesenkformen. Im Vergleich zu WC10Co (Reibungskoeffizient $0,5 \pm 0,05$) verbessert sich die Leistung nach der Optimierung um ca. $75\text{ } \%$. Durch Nanotexturierung oder Mehrlagenbeschichtung kann es zukünftig an hohe Temperaturen ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) bzw. hohe Belastungen ($> 200\text{ N}$) angepasst werden.

(7) Umweltkontrolle und künftige Entwicklung

Die Luftfeuchtigkeit wird auf $30\text{--}50\text{ } \%$ kontrolliert, um einen Anstieg ($10\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$) zu vermeiden. Argon-Schutz und eine feuchtigkeitsabweisende Beschichtung (z. B. SiO_2 , $< 1\text{ } \%$) verbessern die Stabilität. Zukünftig können dynamische Verschleißtests ($> 1\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$) oder **CTIA**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

Langzeithaltbarkeitstests (> 1000 Stunden) in Kombination mit Plasmaspritzen (Dicke 15 μm) eingeführt werden, um die Anwendungsgebiete in der Luftfahrt und im Energiebereich zu erweitern.

Die Hartmetalloberflächenstruktur wurde mit 5 μm Tiefe, 50–100 μm Abstand, 5 % MoS_2 und 3 % C, 1064-nm-Laser und $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m}$ optimiert, um einen Reibungskoeffizienten $< 0,2$ zu erreichen. Der ASTM G99-Test bestätigt diesen Effekt. Am Beispiel von WC_5MoS_2 C3 ist die Leistung besser als die von WC_{10}Co und kann zukünftig durch Nanotechnologie und Beschichtung weiter verbessert werden.

9.3.2.8 Oberflächentextur und Schmiertechnikanwendung von Hartmetall

Die Oberflächenstruktur von Hartmetall in Kombination mit MoS_2 - und C-Schmierstoffen verbessert die Selbstschmierleistung deutlich und ermöglicht so eine hohe Leistung in einer Vielzahl anspruchsvoller technischer Anwendungen. Die Struktur reduziert den Reibungskoeffizienten ($< 0,2 \pm 0,01$) und die Haftung ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) durch optimierte Ölfilmbildung und Spanaufnahme. Dies verlängert die Lebensdauer von Werkzeugen und Komponenten und erfüllt die Anwendungsanforderungen von Hochgeschwindigkeitszerspanung, Trockenbearbeitung und Präzisionsmaschinen. Im Folgenden wird der technische Anwendungswert anhand spezifischer Anwendungsszenarien, Leistungsvorteilen und Praxisfällen detailliert erläutert und der Beitrag zu industrieller Effizienz und Langlebigkeit analysiert.

(1) Hochgeschwindigkeitswerkzeuge

Bei Hochgeschwindigkeitswerkzeugenanwendungen zeigt WC_5MoS_2 mit seinen hervorragenden selbstschmierenden Eigenschaften eine gute Leistung. Die Texturtiefe ist auf $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ eingestellt, wodurch die Bildung des MoS_2 -Transferfilms (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) optimiert und der Reibungskoeffizient auf $0,12 \pm 0,01$ reduziert wird. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Transferfilmbedeckung $> 90 \% \pm 2 \%$ beträgt, was den direkten Kontakt zwischen den Spänen und der Werkzeugoberfläche reduziert und die Werkzeuglebensdauer um mehr als $5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ verlängert und damit das herkömmliche WC_{10}Co -Werkzeug (Lebensdauer ca. 3000 m) weit übertrifft. Diese Leistung ist besonders bei der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie Titanlegierungen oder Edelstahl) oder bei Hochgeschwindigkeitsbedingungen ($> 500 \text{ m/min}$) von Bedeutung, da sie Schnittkräfte und Verschleißraten reduziert, die Oberflächengüte verbessert und den Kühlmittelverbrauch senkt

(2) Trockener Schimmel

Im Trockenformszenario wird WC_3C aufgrund seiner geringen Haftung und langen Lebensdauer bevorzugt. Der Texturabstand beträgt $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, um eine gleichmäßige Verteilung des Ölfilms zu gewährleisten (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Die sp^2 -Bindungsstruktur von C (Gleitenergie $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) bildet einen stabilen Schmierfilm, und die Haftung wird auf $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$ reduziert. SEM-Beobachtungen zeigen, dass die Textur Verschleißpartikel ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) einfängt, Sekundärverschleiß reduziert und die Lebensdauer der Form das 10^6 -fache $\pm 10^5$ -fache überschreitet und damit die der WC_{10}Co -Form (Lebensdauer ca. 5×10^5 -fache) deutlich übertrifft.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beim Trockenspritzgießen oder Stanzen, beispielsweise bei der Herstellung von Armaturenbrettern in Autos oder Elektronikgehäusen, verringert eine geringe Haftung die Werkstückhaftung und die Reibungswärme wird auf $< 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kontrolliert, was die Produktionseffizienz und Oberflächenqualität verbessert und die Vorteile einer umweltfreundlichen Verarbeitung widerspiegelt.

(3) Lagerkomponenten

Bei Lagerkomponentenanwendungen weist WC5MoS₂ eine hervorragende Haltbarkeit und geringe Reibung auf. Die Oberfläche ist auf $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ poliert, die Haftung des MoS₂-Transferfilms ist verbessert (Bedeckung $> 95\% \pm 2\%$) und der Reibungskoeffizient ist stabil bei $0,15 \pm 0,01$. Die Texturtiefe von $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ optimiert die hydrodynamische Schmierung, und die Ölfilmdicke beträgt etwa $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, wodurch der Verschleiß der Reibpaarung im Lager verringert wird. Das Lager hat eine Lebensdauer von über 10^4 Stunden $\pm 10^3$ Stunden, was besser ist als bei herkömmlichen Stahllagern (Lebensdauer etwa 5000 Stunden). Diese Leistung ist in Flugzeugmotoren, Fahrzeuggetriebesystemen und Industriemaschinen hervorragend, da sie die Wartungshäufigkeit und den Energieverbrauch reduziert, während die NiO-Passivierungsschicht aus Ni (Dicke $\sim 10\text{ nm}$) zusätzlichen Korrosionsschutz in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit bietet und die Zuverlässigkeit erhöht.

(4) Beschichtung von Flugturbinen

Die WC10MoS₂-Strukturbeschichtung eignet sich hervorragend für Flugzeugturbinenkomponenten. Die Strukturtiefe von $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ und der Abstand von $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ reduzieren die Reibung durch Hochgeschwindigkeitsluftströmungen und Partikelabtrag. Der Reibungskoeffizient beträgt $0,12 \pm 0,01$ und die Lebensdauer verlängert sich auf über 6000 Stunden. Die hohe Temperaturbeständigkeit von MoS₂ ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) erhält die Schmierwirkung im Triebwerks Umfeld. Die Reibungswärme liegt unter $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, was die Ermüdungsbeständigkeit der Beschichtung erhöht, die Wartungskosten von Flugzeugkomponenten senkt und sie für Höhenflugbedingungen geeignet macht.

(5) Ölbohrwerkzeuge

WC8MoS₂C-Texturbohrer (MoS₂ 5 %, C 3 %) eignen sich hervorragend für die Ölförderung. Sie zeichnen sich durch eine Texturtiefe von $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ zur Aufnahme von Bohrspänen ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), eine Haftung von $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ und eine um ca. 25 % höhere Lebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Materialien aus. Unter Trockenbohrbedingungen (Reibungswärme $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) reduzieren MoS₂ und C synergetisch den Schnittwiderstand. Die Effizienz wird in schwefelhaltigen oder hochharten Gesteinsformationen verbessert, was die Austauschhäufigkeit und die Betriebskosten reduziert.

(6) Medizinprodukte

WC5MoS₂-Texturskalpelle zeigen Potenzial im medizinischen Bereich. Der Texturabstand von $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ und $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ gewährleisten reibungsarmes Schneiden, einen Reibungskoeffizienten von $0,12 \pm 0,01$, eine Haftung von $0,7\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ und reduzieren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gewebescheiden. Die Lebensdauer beträgt mehr als das 5000-Fache, erfüllt die hohen Präzisionsanforderungen in steriler Umgebung und erhöht die chirurgische Sicherheit und Instrumentenhaltbarkeit.

(7) Umfassende Vorteile und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten

Der synergetische Effekt von Oberflächenstruktur und Schmiermittel verbessert die Leistung von Hartmetall deutlich; Hochgeschwindigkeitswerkzeuge verlängern die Schnittlebensdauer, Trockenformen verbessern die Produktionseffizienz, Lagerkomponenten erhöhen die Haltbarkeit, Beschichtungen für die Luftfahrt senken die Wartungskosten, Ölbohrwerkzeuge optimieren die Betriebseffizienz und medizinische Geräte gewährleisten die Sicherheit. Im Vergleich zu WC10Co (Reibungskoeffizient $0,5 \pm 0,05$, Haftung $> 2 \text{ N}$) ist der Reibungskoeffizient des WCTiCNi-Textursystems um etwa 75 % reduziert und die Haftung um mehr als 50 %, was die Bearbeitungsgenauigkeit und die Werkzeuglebensdauer verbessert. Darüber hinaus unterstützt das Texturdesign neue Anwendungen, wie z. B. verschleißfeste Schichten für Eisenbahnschienen; WC8MoS₂C reduziert die Reibungsverluste von Schienen; tragbare Elektronik; WC3C mit geringer Haftung unterstützt flexible leitfähige Komponenten. Zukünftig kann seine Anwendung in den Bereichen Energie und Luftfahrt durch Nanotexturierung oder Mehrschichtbeschichtungen erweitert werden.

Hartmetalloberflächenstrukturen eignen sich gut für Hochgeschwindigkeitswerkzeuge, Trockenformen, Lagerkomponenten, Flugzeugbeschichtungen, Ölbohrwerkzeuge und medizinische Geräte. Der Reibungskoeffizient von WC5MoS₂ beträgt $0,12 \pm 0,01$ und die Lebensdauer $> 5000 \text{ m}$, die Haftung von WC3C beträgt $0,8 \text{ N}$ und die Lebensdauer $> 10^6$ -mal, und die Lebensdauer von WC5MoS₂ beträgt $> 10^4$ Stunden. Dies bestätigt die selbstschmierende Wirkung der synergistischen Optimierung von Textur und Schmiermittel. Zukünftige Materialinnovationen können ein breiteres Spektrum an Anforderungen abdecken.

9.4 Bionik und intelligentes Hartmetall

Bionisches und intelligentes Hartmetall erreicht Anpassungsfähigkeit (Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) und **hohe Leistung (Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$)** durch innovatives Materialdesign, kombiniert mit **Gradientenstruktur** (Porosität $5 \% - 20 \% \pm 1 \%$), **poröser Struktur (Porengröße $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$)** und reaktionsfähigem Material (Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und erfüllt so die Anforderungen der intelligenten Fertigung (Genauigkeit $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), der Biomedizin (Kompatibilität $> 95 \% \pm 2 \%$) und der Luftfahrt (Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal) und anderer Bereiche. Herkömmlichem Hartmetall fehlt aufgrund seiner gleichmäßigen und dichten Struktur die Anpassungsfähigkeit. Dadurch ist es schwer, mit dynamischen Belastungen, Temperaturschwankungen oder biologischen Umgebungen umzugehen, was seine Anwendung unter komplexen Arbeitsbedingungen einschränkt. Das bionische Design ist inspiriert von der mehrstufigen Struktur und den Anpassungseigenschaften der Natur (wie Muscheln und Bambus), kombiniert mit der Verformungsfähigkeit intelligenter Reaktionsmaterialien (wie NiTi-Legierungen), die Hartmetall intelligentes Potenzial verleihen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dieser Abschnitt beginnt mit dem Konstruktionsprinzip der bionischen Mikrostruktur (gradient und porös), dem Mechanismus und den Anwendungsaussichten intelligent reagierender Materialien und kombiniert bionische Fälle, Materialeigenschaftsanalysen und technische Beispiele, um den Entwicklungspfad von Hartmetall in Richtung Intelligenz zu erkunden. Beispielsweise erreicht die Härte von gradientem WC-Co (Porosität $10\% \pm 1\%$) $HV\ 1450 \pm 30$ und die Verformungsrate beträgt $0,05\% \pm 0,01\%$, wodurch die dynamischen Anpassungsanforderungen intelligenter Formen erfolgreich erfüllt werden.

Bionisches Mikrostrukturdesign

Die bionische Mikrostruktur ist der Kern des intelligenten Hartmetalls, das von der geschichteten Gradientenstruktur von Schalen und der porösen Zähigkeitsanordnung von Bambus inspiriert ist. Die Gradientenstruktur erreicht den Übergang von hoher Oberflächenhärte ($> HV\ 1500$) zu hoher innerer Zähigkeit ($K_{1c} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) durch die allmähliche Verteilung der Porosität von 5% auf $20\% \pm 1\%$. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Poren gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$), was die Widerstandsfähigkeit gegen Rissausbreitung verbessert. Die poröse Struktur ist mit einer Porengröße von $110\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ ausgelegt, was die Durchlässigkeit des Materials erhöht und das Eindringen von Schmiermitteln (wie MoS_2) oder das Wachstum von biologischem Gewebe erleichtert. Bei einer Porosität von $10\% \pm 1\%$ bleibt die Härte bei $HV\ 1450 \pm 30$ und die Verformungsrate $< 0,1\% \pm 0,01\%$. Dies erfüllt die Anforderungen an adaptive Verformung. Die alternierende Struktur aus CaCO_3 -Schichten und organischen Schichten in den Schalen inspirierte die mechanische Optimierung des Gradientendesigns, und die poröse Internodienanordnung des Bambus steuerte die Spannungsverteilung der porösen Struktur. Im Vergleich zur herkömmlichen WC-Co-Einzelstruktur verbesserte das bionische Design die Ermüdungslebensdauer ($> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach).

Smart Response-Materialien

Intelligente Reaktionsmaterialien verleihen Hartmetall Anpassungsfähigkeit. Die NiTi-Verformungslegierung ist ein typisches Beispiel. Ihr Formgedächtniseffekt und ihre Superelastizität (Verformungsrate $< 0,1\% \pm 0,01\%$) passen die Materialverformung innerhalb einer Reaktionszeit von $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$ an dynamische Belastungen oder Temperaturänderungen an. Die Phasenübergangstemperatur von NiTi (ca. $50\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$) wird durch Wärmebehandlung reguliert. Nach der Integration in die WC-Matrix bildet die Ni-Phase (Gehalt $5\text{--}10\% \pm 0,1\%$) in der Gradientenstruktur ein intelligentes Netzwerk. Die SEM-Beobachtung zeigt eine gleichmäßige Verteilung der NiTi-Partikel (Abweichung $< 0,1\%$), wodurch das Dehnungsrückgewinnungsvermögen des Materials verbessert wird ($> 95\% \pm 2\%$). Im Vergleich zu herkömmlichem Hartmetall reduzieren intelligente Reaktionsmaterialien Mikrorisse ($< 0,5\ \mu\text{m}$), die durch Wärmeausdehnung oder mechanische Spannung verursacht werden. Bei Luftfahrtkomponenten erhöht sich die Ermüdungslebensdauer auf das 10^6 -fache $\pm 10^5$ -fache, was besser ist als bei WC10Co (etwa 5×10^5 -fache).

9.4.1 Bionische Mikrostruktur von Hartmetall (gradient und porös)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4.1.1 Prinzip- und Technologieübersicht der Gradienten- und Porenstruktur von Hartmetall

von Hartmetall (Bruchzähigkeit $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) deutlich durch die Kombination einer Gradientenstruktur (Härte HV 1400–1800 ± 30 , Porosität 5–20 % ± 1 %) und einer porösen Struktur (Porengröße 110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m} \pm 0,5$) und Funktionalität (Energieabsorptionsrate $> 50 \text{ \%} \pm 5 \text{ \%}$) und macht es anpassungsfähig und hochbelastbar. Das Design ist von der Natur inspiriert. Die geschichtete Struktur der Schalen (Härtegradient von etwa 1 GPa/mm $\pm 0,1 \text{ GPa/mm}$) erreicht eine ausgezeichnete Schlagzähigkeit durch die Kombination aus hochhartem CaCO_3 in der Außenschicht und der Zähigkeit der inneren organischen Schicht, während die poröse Struktur des Bambus (Porosität von etwa 30 % $\pm 2 \text{ \%}$) die Spannungsverteilung und Energieabsorption durch Internodienverteilung optimiert. Diese natürlichen Prototypen inspirierten das bionische Design von Hartmetall mit dem Ziel, eine Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und eine Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal zu erreichen, um anspruchsvollen Anwendungen wie intelligenter Fertigung, Biomedizin und Luftfahrt gerecht zu werden. Verglichen mit herkömmlichen gleichmäßigen und dichten Hartmetallen (wie WC-Co) verbessert die bionische Mikrostruktur die Zähigkeit und Energieabsorptionsleistung durch Gradient und Porosität und durchbricht so die Beschränkungen einer einzelnen Struktur in einer dynamischen Umgebung.

Der Herstellungsprozess erfolgt mit der Gradienten-Pulverschichtungsmethode unter Verwendung von WC-Feinpulver mit einer Partikelgröße von 0,52 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und Steuerung des Co-Gehalts durch Schichtung, um einen Härtegradienten zu erzielen. Durch Zugabe des Porenbildners PMMA (Partikelgröße 110 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) wird eine poröse Struktur erzeugt. Anschließend erfolgt das Sintern bei 1400 $^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ unter mäßigem Druck (50 MPa $\pm 1 \text{ MPa}$), um Materialdichte und Porengleichmäßigkeit sicherzustellen. Beispielsweise erreicht die Härte von Gradient-WC-Co (Porosität 10 % $\pm 1 \text{ \%}$) HV 1450 ± 30 und K_{1c} beträgt 16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, besser als HV 1500 ± 30 und 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ von gleichmäßigem WC-Co $\pm 0,5$, was den Leistungsvorteil des bionischen Designs bestätigt. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie Gradienten- und poröse Strukturen das technische Anwendungspotenzial von Hartmetall aus Sicht der Mechanismusanalyse, des Herstellungsprozesses und der Optimierungsstrategie verbessern können.

9.4.1.2 Mechanismus und Analyse des Hartmetallgradienten und der porösen Struktur

Die bionische Mikrostruktur von Hartmetall optimiert seine mechanischen Eigenschaften und Funktionalität durch die abgestimmte Gestaltung von Gradientenstruktur und Porenstruktur deutlich und bietet Hochleistungswerkstoffe für intelligente Fertigung, Biomedizin, Luftfahrt und andere Bereiche. Dieser Abschnitt analysiert eingehend den Mechanismus der Gradienten- und Porenstruktur und untersucht deren Einfluss auf Härte, Zähigkeit, Energieabsorptionsrate und Lebensdauer. Mikroskopische Beobachtungen und experimentelle Daten werden kombiniert, um aufzuzeigen, wie Co-Gehaltsgradient, Porenparameter und WC-Korngröße das technische Anwendungspotenzial von Hartmetall steigern können.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Mechanismus der Gradientenstruktur

Die Gradientenstruktur bildet durch die allmähliche Verteilung des Co-Gehalts ($5\% - 15\% \pm 1\%$) einen Härtegradienten ($HV\ 1400-1800 \pm 30$). Der hohe Co-Gehalt an der Oberfläche ($15\% \pm 1\%$) sorgt für eine höhere Zähigkeit, und der niedrige Co-Gehalt im Inneren ($5\% \pm 1\%$) gewährleistet die Härte. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Co-Verteilung kontinuierlich ist (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$), wodurch Phasengrenzdefekte vermieden werden. Dieses Gradientendesign erhöht die Spannungsdispersionsrate auf $> 50\% \pm 5\%$ und puffert Spannungskonzentrationen durch Schichtung. Die Bruchzähigkeit (K_{Ic}) wird im Vergleich zur gleichmäßigen Struktur um etwa $30\% \pm 5\%$ erhöht und erreicht $> 15\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Ermüdungstests (10^6 -fach $\pm 10^5$ -fach) zeigten, dass die Rissausbreitung durch die Gradientenstruktur unterdrückt wurde. Mit einer Länge von $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ war dies besser als bei gleichmäßigem WC-Co (Rissausbreitung $> 0,2\text{ mm}$), da der Co-Gradient die Rissausbreitungsgeschwindigkeit ($< 10^{-6}\text{ m/s}$) verlangsamt.

(2) Mechanismus der porösen Struktur

Die poröse Struktur ist mit einer Porengröße von $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ausgelegt, was die Materialdichte auf $\sim 12\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ reduziert, im Vergleich zu $14,5\text{ g/cm}^3$ für homogenes WC-Co $\pm 0,1\text{ g/cm}^3$, wodurch das Gewicht reduziert und die Energieabsorption um $> 50\% \pm 5\%$ erhöht wird. Eine Porosität von $10\% \pm 1\%$ gleicht Härte und Zähigkeit aus, eine Porenwandfestigkeit von $> 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ wird durch WC-Körner von $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ erreicht, die SEM-Beobachtung zeigt, dass die Porenwand dicht ist (Porositätsabweichung $< 0,5\% \pm 0,1\%$), was die Druckfestigkeit verbessert. Wenn die Porosität jedoch $20\% \pm 1\%$ übersteigt, verringert sich die Härte um etwa $20\% \pm 3\%$, da übermäßige Porosität zu geschwächten Korngrenzen und einer erhöhten Mikrorissdichte ($> 10^4\text{ m}^{-2}$) führt, was die strukturelle Stabilität beeinträchtigt. Die verbesserte Energieabsorptionsrate ergibt sich aus der Zerstreuung der Aufprallenergie durch die poröse Struktur, die für Umgebungen mit dynamischer Belastung geeignet ist.

(3) Mikroanalyse

Mikroskopische Untersuchungen mittels SEM bestätigten, dass die Co-Verteilung des WC-Co-Gradienten kontinuierlich ist, die Porositätsabweichung der porösen Struktur $< 0,5\% \pm 0,1\%$ beträgt und die Porengröße von $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ gleichmäßig verteilt ist, was die Permeabilität und Energieabsorption des Materials verbessert. Die EDS-Detektion bestätigt den Co-Gehaltsgradienten ($5-15\% \pm 1\%$), und die Co-Anreicherung an der Oberfläche ($15\% \pm 1\%$) trägt zur Zähigkeit bei. Die XPS-Analyse zeigt einen niedrigen Sauerstoffgehalt ($O1s\text{-Peak} \sim 532\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$). Dies deutet darauf hin, dass der Sinterprozess bei $1400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ die Oxidation wirksam kontrolliert und die Oberflächenstabilität besser ist als die der nicht optimierten Probe (Sauerstoffgehalt $> 0,5\%$). Die Ergebnisse der Ermüdungstests belegen weiterhin, dass die Rissausdehnung $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, was den synergistischen Verstärkungseffekt des Gradienten und der porösen Struktur bestätigt.

(4) Sintertemperatur und Leistungsregelung

Die Sintertemperatur von $1400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ ist entscheidend für die Kontrolle der Porosität und der mechanischen Eigenschaften. Sie liegt unter der Zersetzungstemperatur von MoS_2 ($> 1200\text{ }^\circ\text{C} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 °C), um die Schmiermittelstabilität zu gewährleisten. Die Argon-Schutzatmosphäre reduziert die Oxidation. Durch die Temperaturkontrolle beträgt die Porositätsabweichung $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$, die Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zeigt eine WC-Kornverfeinerung von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und eine Porenwandfestigkeit von $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$. Im Vergleich zum Hochtemperaturesintern ($> 1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) wird bei $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ der durch Kornwachstum ($> 2 \mu\text{m}$) verursachte Härteabfall ($> 10 \% \pm 2 \%$) vermieden und $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ aufrechterhalten.

(5) Anwendungsüberprüfung und Optimierungsrichtung

Gradientenporöse Struktur eignet sich gut für den Maschinenbau, Gradient WC-Co (Porosität $10 \% \pm 1 \%$) Härte HV 1450 ± 30 , $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach, geeignet für intelligente Formen und Flugzeugteile. Eine Optimierung kann durch Verfeinerung der Porosität auf $5\text{--}10 \% \pm 0,5 \%$, Reduzierung der Porengröße auf $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Einführung von Nano-WC ($< 0,3 \mu\text{m}$) zur Verbesserung der Porenwandfestigkeit ($> 120 \text{ MPa}$), Kombination von 3D-Druck zur Erzielung komplexer Gradienten und Anpassung an hohe Temperaturen ($> 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$) oder hohe Belastungen ($> 200 \text{ N}$) erreicht werden.

Die bionische Mikrostruktur des Hartmetalls erreicht durch einen Co-Gradienten (5–15 %), einen um 30 % erhöhten K_{1c} - Wert, eine poröse Struktur (Porengröße $110 \mu\text{m}$) mit einer Energieabsorptionsrate von $> 50 \%$ und Sintern bei $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Härte von HV 1400–1800. Am Beispiel des Gradienten WC-Co (HV 1450, $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) lässt sich die Haltbarkeit zukünftig durch Nanooptimierung weiter steigern.

9.4.1.3 Analyse der Faktoren, die die bionische Mikrostruktur, den Gradienten und die poröse Struktur von Hartmetall beeinflussen

Die Leistung der bionischen Mikrostruktur, des Gradienten und der porösen Struktur von Hartmetall wird von vielen Faktoren bestimmt, darunter Porosität, Co-Gradient, Porengröße, Sinter Temperatur und Korngröße, die über mikroskopische Mechanismen die Härte, Bruchzähigkeit (K_{1c}), Festigkeit und Energieabsorptionsrate des Materials beeinflussen. Im Folgenden werden die einzelnen Faktoren und ihre theoretischen Grundlagen analysiert. Dabei werden wissenschaftliche Prinzipien wie Bruchmechanik, Verbundgrenzflächentheorie, thermodynamisches Gleichgewicht, mechanisches Modell poröser Materialien, Kornverfestigungsmechanismus und Sinterkinetik herangezogen.

(1) Porosität

Die Porosität wirkt sich direkt auf die Bruchzähigkeit (K_{1c}) und Härte von Hartmetall aus. Bei einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ ist K_{1c} höher ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), da mäßige Poren die Spannung verteilen helfen. Übersteigt die Porosität $20 \% \pm 1 \%$, verringert sich die Härte um etwa $20 \% \pm 3 \%$ (z. B. von HV 1450 ± 30 auf HV 1200 ± 30), da die zunehmende Porosität die Materialkontinuität schwächt. Laut der Griffith-Risstheorie fungieren Poren als anfängliche Rissquelle, und übermäßige Porosität erhöht die Energiefreisetzung bei der Rissausbreitung und verringert die Härte. während gleichmäßig verteilte Poren K_{1c} durch Energiedissipationsmechanismen (wie etwa plastische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Deformation) erhöhen, was mit dem mechanischen Verhalten poröser Materialien im Gibson-Ashby-Modell übereinstimmt.

(2) Co-Gradient

Die Gradientenverteilung von Kobalt (Co) verbessert die Spannungsverteilung. Bei einem Co-Gehalt von $5-15 \% \pm 1 \%$ ist die Spannungsverteilung gut und die Bruchzähigkeit um etwa $10 \% \pm 2 \%$ verbessert. Dies liegt daran, dass der geringere Co-Gradient ein stabiles Bindungsphasennetzwerk bildet, das dem diffusionsgesteuerten Gradientenverteilungsmodell im zweiten Fickschen Gesetz entspricht. Übersteigt der Co-Gehalt $20 \% \pm 1 \%$, nimmt die Entmischung um etwa $10 \% \pm 2 \%$ zu (lokale Abweichung des Co-Gehalts $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), was zu einer Schwächung der Korngrenzen und verstärkten Härteschwankungen führt. Dies folgt der Phasentrennungstheorie (Minimierung der Gibbs-Freien Energie), erhöht die Korngrenzenenergie ($> 1 \text{ J/m}^2$) und verringert die Materialfestigkeit.

(3) Blende

Die Porengröße beeinflusst die Energieabsorptionsrate und die Festigkeit. Bei einer Porengröße von $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ist die Energieabsorptionsrate hoch ($> 90 \% \pm 2 \%$), da die kleine Porengröße die Spannungsverteilung erleichtert. Übersteigt die Porengröße $20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, verringert sich die Festigkeit um etwa $15 \% \pm 3 \%$ (z. B. von 1000 MPa auf $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), da große Poren leicht Spannungskonzentrationen verursachen. Nach der Hashin-Shtrikman-Theorie erhöhen kleine Poren die Energieabsorptionsrate durch Spannungsverteilung, während große Poren zu lokaler Spannungskonzentration führen, was mit der Theorie der maximalen Schubspannung übereinstimmt.

(4) Sintertemperatur

Die Sintertemperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität und Porosität der Mikrostruktur. Bei $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ist die Struktur stabil und die Porositätsabweichung beträgt weniger als $1 \% \pm 0,1 \%$. Dies liegt daran, dass die Temperatur nahe dem Schmelzpunkt von Co ($1495 \text{ }^\circ\text{C}$) liegt, wodurch sich eine gleichmäßige Flüssigphase bildet und die Partikelumlagerung fördert. Dies steht im Einklang mit der Theorie des Festphasensinterns und Flüssigphasensinterns im Kingery-Modell. Übersteigt die Temperatur $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, erhöht sich die Porositätsabweichung um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (lokale Porosität $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), was zu einer Abnahme der Materialgleichmäßigkeit führt, was mit dem exponentiellen Wachstum der Diffusionsrate in der Arrhenius-Gleichung vereinbar ist.

(5) Korngröße

Die Korngröße beeinflusst die Leistungsoptimierung. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Leistung optimal, K_{1c} erreicht $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und die Härte bleibt stabil bei $\text{HV } 1450 \pm 30$. Dies liegt daran, dass feine Körner die Korngrenzendichte erhöhen ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), die Rissausbreitung behindern und der Hall-Petch-Beziehung folgen. Wenn die Korngröße $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ überschreitet, sinkt K_{1c} um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (auf $14,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), was mit dem Orowan-Verstärkungsmechanismus aufgrund der verringerten Korngrenzendichte übereinstimmt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Umfassendes Beispiel

Am Beispiel von WC-Co weist die Probe mit einer Porosität von $25 \% \pm 1 \%$ zu viele Poren auf, sodass die Härte nur $HV 1200 \pm 30$ beträgt und der K_{1c} -Wert auf $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ sinkt; während die Probe mit einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ und einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ eine Härte von $HV 1450 \pm 30$ aufweist und der K_{1c} -Wert bei $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ bleibt und somit hervorragende Gesamteigenschaften aufweist. Die SEM-Analyse bestätigte außerdem, dass die Proben mit einem Co-Gradienten von $10 \% \pm 1 \%$ und einer Sintertemperatur von $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ eine deutlich bessere Entmischungsrate ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und Porengleichmäßigkeit ($> 95 \% \pm 2 \%$) aufwiesen als die unter anderen Bedingungen.

Die Leistung bionischer Mikrostrukturen, Gradienten und poröser Strukturen aus Hartmetall wird durch Faktoren wie Porosität ($10 \% \pm 1 \%$), Co-Gradient ($5\text{--}15 \% \pm 1 \%$), Porengröße ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), Sintertemperatur ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und Korngröße ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) bestimmt. Porosität und Korngröße beeinflussen K_{1c} und Härte, der Co-Gradient optimiert die Spannungsverteilung, die Sintertemperatur gewährleistet die strukturelle Stabilität und die Porengröße beeinflusst Energieabsorption und Festigkeit. Durch die Optimierung dieser Parameter lässt sich die Leistung präzise steuern und so den Anforderungen hochwertiger Anwendungen wie Werkzeugen und Formen gerecht werden.

9.4.1.4 Optimierung der bionischen Mikrostruktur, des Gradienten und der porösen Struktur von Hartmetall

$K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ in bionischen Mikrostrukturen aus Hartmetall $\pm 0,5$, unter Berücksichtigung der Energieabsorptionsrate ($> 50 \% \pm 5 \%$), der Ermüdungslebensdauer ($> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$) und der Stabilität in komplexen Umgebungen. Dies muss durch umfassende Strategien erreicht werden, beispielsweise Strukturdesign, Optimierung des Porenbildners, Anpassung des Sinterprozesses und Kornkontrolle. Diese Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, den Synergieeffekt von Gradientenstruktur und Porenstruktur zu verstärken und die bionischen Prinzipien der Natur (wie den Härtegradienten von Schalen und die Porenfestigkeit von Bambus) voll auszunutzen, um den Anforderungen der intelligenten Fertigung, Biomedizin, Luftfahrt und anderer anspruchsvoller Anwendungen gerecht zu werden und gleichzeitig die Anpassungsfähigkeit und Haltbarkeit des Materials zu erhalten. Im Folgenden wird das Optimierungsschema im Detail unter den Aspekten Strukturparameter, Herstellungsprozess, Mikrokontrolle und Anpassungsfähigkeit an die Umgebung beschrieben, experimentelle Daten und tatsächliche Anwendungseffekte kombiniert, seine Durchführbarkeit vollständig überprüft und der Raum für weitere Verbesserungen erkundet.

(1) Struktur

Die Strukturoptimierung basiert auf einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ und einem Co-Gehaltsgradienten von $5\text{--}15 \% \pm 1 \%$. Eine Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ reduziert die Materialdichte durch die mikroporöse Struktur auf $\text{ca. } 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich zu $14,5 \text{ g/cm}^3$ bei homogenem WC-Co $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$. Dies führt zu einer deutlichen Gewichtsreduzierung und erhöht gleichzeitig die Energieabsorption auf $> 50 \% \pm 5 \%$, dank der effektiven Verteilung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aufprallenergie durch die poröse Struktur. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Poren gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), wodurch ein Härteabfall (ca. $20 \% \pm 3 \%$) und eine Zunahme von Mikrorissen ($> 10^4 \text{ m}^{-2}$) vermieden werden, die durch eine Schwächung der Korngrenzen verursacht werden, wenn die Porosität $> 20 \% \pm 1 \%$ beträgt. Der Gradient des Co-Gehalts steigt von 5 % (innerer Bereich mit hoher Härte) auf 15 % (Oberflächenbereich mit hoher Zähigkeit), wodurch ein Härtegradient von HV 1400–1800 ± 30 entsteht, und K1c steigt um ca. $30 \% \pm 5 \%$ ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), die Spannungsdispersionsrate beträgt $> 50 \% \pm 5 \%$ und die Ermüdungsbeständigkeit wird durch Schichtung zur Pufferung der Spannungskonzentration deutlich verbessert, wobei die Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal erreicht wird. Dieses Gradientendesign eignet sich besonders für Umgebungen mit dynamischer Belastung, wie beispielsweise häufige Deformationen von Smart-Formen oder hochfrequente Vibrationen von Flugzeugkomponenten. Im Vergleich zu gleichmäßigen Strukturen (K1c ca. $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) ist die Zähigkeit deutlich verbessert.

(2) Porenbildner

PMMA wird als Porenbildner verwendet und die Partikelgröße wird genau auf $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ kontrolliert. Die Zugabemenge wird auf $5 \% \pm 0,1 \%$ festgelegt, um durch thermische Zersetzung eine gleichmäßige poröse Struktur zu bilden. PMMA zersetzt sich während des Sinterprozesses bei $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ und erzeugt ein poröses Netzwerk mit einer Porengröße von $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Mittels SEM wird bestätigt, dass die Porositätsabweichung $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ und die Porenwandfestigkeit dank der feinen Unterstützung durch WC-Körner ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ beträgt. Die Zugabemenge von $5 \% \pm 0,1 \%$ gewährleistet ein Gleichgewicht zwischen Porosität und Härte. Ein Anteil unter 5 % kann zu einer unzureichenden Energieabsorption ($< 40 \% \pm 5 \%$) und damit zu einer eingeschränkten Leistung des Materials in einer Aufprallumgebung führen, während ein Anteil über $10 \% \pm 0,1 \%$ zu einer verringerten Härte ($> 10 \% \pm 2 \%$) und einer geschwächten strukturellen Stabilität aufgrund übermäßiger Porosität führen kann. Die Optimierung kann die Porenstruktur durch die Einführung von nanometergroßem PMMA (Partikelgröße $< 50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) verfeinern, wodurch die Zähigkeit weiter erhöht und die Biokompatibilität (z. B. beim Knochengewebewachstum) verbessert wird, insbesondere mit Potenzial für Implantatanwendungen.

(3) Sinterprozess

Der Sinterprozess nutzt Heißpressen bei $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Druck von $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, um eine gleichmäßige Materialdichte und Porosität zu gewährleisten. $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt unter der Zersetzungstemperatur von MoS_2 ($> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und verhindert Oxidation unter Argon-Schutzatmosphäre wirksam. Die REM-Beobachtung zeigt, dass die WC-Körner fein bleiben und die Porositätsabweichung von $10 \% \pm 1 \%$ auf $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ kontrolliert wird. Der Druck von 50 MPa fördert die Gleichmäßigkeit der Co-Gradientenverteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die Verbesserung der Porenwandfestigkeit ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), wobei Kornwachstum ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) oder Härtereduzierung ($> 10 \% \pm 2 \%$) durch Hochtemperatursintern ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) vermieden wird. Eine schrittweise Heizstrategie (Vorwärmen auf $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ und dann Heizen auf $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) wurde verwendet, um die thermische Spannung ($< 50 \text{ MPa}$) weiter zu reduzieren und K1c

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auf $> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ zu erhöhen, während die Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal aufrechterhalten wurde. Zukünftig können die Dichte der Porenwand und die Glätte des Gradientenübergangs durch eine Verlängerung der Haltezeit (2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden) oder die Einführung eines pulsstromunterstützten Sinterns verbessert werden.

(4) Kornkontrolle

Die Korngröße wurde durch Zugabe von Spureninhibitoren (wie VC, 0,5 % - 1 %) und Optimierung der Kugelmahlzeit (40 Stunden ± 1 Stunde) auf $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert. Die feinen Körner erhöhten die Porenwandfestigkeit ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), die SEM-Analyse zeigte, dass die Korngrenzendichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ betrug und die Mikrorissgröße deutlich reduziert war ($< 0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$), was $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und die Ermüdungslebensdauer $> 10^6 \pm 10^5$ -mal unterstützte. Im Vergleich zu Korngrößen $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (Härteabnahme $> 10 \% \pm 2 \%$, und Zähigkeitsabnahme) optimieren $0,51 \mu\text{m}$ große Körner den synergistischen Effekt von Gradient und poröser Struktur, insbesondere in Umgebungen mit hohen Dehnungsraten (wie z. B. Luftfahrtkomponenten). Zukünftig kann die Nanokorntechnologie ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erforscht werden, um die Verschleißfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit durch eine höhere Korngrenzendichte ($> 10^{15} \text{ m}^{-2}$) zur Anpassung an extreme Arbeitsbedingungen weiter zu verbessern.

(5) Umfassender Optimierungseffekt und Anwendungsüberprüfung

Durch die obige Strategie wurde WC-Co mit Gradient (Porosität $10 \% \pm 1 \%$, Co 5–15 % $\pm 1 \%$) bei 1400°C durch Heißpressen gesintert, PMMA 5 % $\pm 0,1 \%$ und $0,51 \mu\text{m}$ Körner, eine Härte von $\text{HV } 1450 \pm 30$ und $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, eine Energieabsorptionsrate von $> 50 \% \pm 5 \%$, eine Ermüdungslebensdauer von $> 10^6$ -mal $\pm 10^5$ -mal erreicht. Bei der intelligenten Fertigung beträgt die Genauigkeit $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, wodurch die Anforderungen an die dynamische Anpassung intelligenter Formen erfüllt werden. In der Biomedizin unterstützt die poröse Struktur das Knochengewebewachstum, Verträglichkeit $> 95 \% \pm 2 \%$, Lebensdauer $> 10^4$ Stunden. In der Luftfahrt beträgt die Lebensdauer von Turbinenschaufeln mehr als 6.000 Stunden. Im Vergleich zu herkömmlichem WC-Co ($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Lebensdauer 5×10^5 -fach) verbessert sich nach der Optimierung die Zähigkeit um etwa 33 % und die Lebensdauer verlängert sich um etwa 100 %, was erhebliche Vorteile bietet.

(6) Umweltkontrolle und künftige Entwicklung

Beim Sinterprozess wird eine Argon-Schutzatmosphäre verwendet, um Oxidation zu vermeiden, und die Umgebungsfeuchtigkeit wird auf 30–50 % kontrolliert, um Leistungseinbußen (Erhöhung des Reibungskoeffizienten $< 5 \% \pm 1 \%$) zu vermeiden. Künftig können durch 3D-Druck komplexere Gradientenstrukturen erreicht werden, Nano-PMMA kann verwendet werden, um die Porengröße auf $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ zu verfeinern, und TiC ($< 2 \%$) oder Cr_3C_2 ($< 1 \%$) kann hinzugefügt werden, um die Porenwand zu verstärken und sie an Umgebungen mit hohen Temperaturen ($> 800^\circ\text{C}$) oder hohen Belastungen ($> 200 \text{ N}$) anzupassen, wie z. B. in der Energieausrüstung und im Schiffsbau. In Kombination mit dynamischen Ermüdungstests ($> 10^7$ -mal $\pm 10^6$ -mal) oder einer Langzeit-Betriebsbewertung ($> 10^5$ Stunden) kann die Zuverlässigkeit unter extremen Bedingungen weiter verifiziert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Herausforderungen und Verbesserungspotenziale

Bei der Optimierung ist auf den Härteabfall ($20\% \pm 3\%$) zu achten, der durch Porosität $> 20\% \pm 1\%$ entsteht und durch Spurenverstärkungsmittel (z. B. TiC) ausgeglichen werden kann. Eine übermäßige PMMA-Zugabe ($> 10\% \pm 0,1\%$) kann zur Versprödung der Porenwände führen und erfordert eine präzise Steuerung. Bei der Massenproduktion müssen die Kosten für die Gradientenherstellung ($> 20\%$) durch Prozessvereinfachung oder -automatisierung gesenkt werden. Zukünftig können selbstheilende poröse Beschichtungen (z. B. Al_2O_3 , Dicke $2\text{ }\mu\text{m}$) entwickelt werden, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern und den Anwendungsbereich zu erweitern.

Die bionische Mikrostruktur des Hartmetalls ist mit einer Porosität von $10\% \pm 1\%$, einem Co-Gradienten von $5\% - 15\%$, PMMA 5% , Sintern bei $1400\text{ }^\circ\text{C}$ und $0,51\text{ }\mu\text{m}$ Körnern optimiert, um eine Härte $> \text{HV } 1400$ und einen K1c-Wert von $> 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ zu erreichen. Am Beispiel von WC-Co mit Gradienten ist die Leistung besser als die von WC-Co mit einheitlichem Gradienten. Zukünftig können Nanotechnologie und verbesserte Beschichtungen das Anwendungspotenzial in komplexen Umgebungen weiter steigern.

9.4.1.5 Technische Anwendungen bionischer Mikrostrukturen, Gradienten- und Porenstrukturen aus Hartmetall

Die bionische Mikrostruktur von Hartmetall verbessert ihre mechanischen Eigenschaften und Funktionalität durch die Kombination von Gradientendesign und poröser Struktur deutlich und bietet hervorragendes Anwendungspotenzial in komplexen technischen Umgebungen. Diese Strukturen sind von der Natur inspiriert (wie beispielsweise dem Härtegradienten von Schalen und der porösen Zähigkeit von Bambus) und erfüllen durch Optimierung von Härte, Zähigkeit und Energieabsorptionsrate die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungsszenarien wie Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt, biomedizinischer Implantate und intelligenter Fertigung. Die Gradientenstruktur verbessert die Ermüdungsbeständigkeit, während die poröse Struktur die Biokompatibilität und Anpassungsfähigkeit steigert. Dies fördert die Entwicklung der Multifunktionalität von Hartmetall. Im Folgenden wird der technische Anwendungswert anhand spezifischer Anwendungsszenarien, Leistungsvorteilen und Praxisfällen detailliert erläutert und sein Beitrag zu industrieller Effizienz, Biokompatibilität und Haltbarkeit analysiert.

(1) Gewichtsreduzierte Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt

Bei gewichtsreduzierenden Teilen in der Luftfahrt zeichnet sich gradientes WC-Co (Porosität $10\% \pm 1\%$) durch seine hervorragenden mechanischen Eigenschaften und sein geringes Gewicht aus. Die Dichte wurde auf $12\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ reduziert, im Vergleich zu $14,5\text{ g/cm}^3$ bei homogenem WC-Co $\pm 0,1\text{ g/cm}^3$. Dank der Einführung einer porösen Struktur (Porengröße $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) wird das Gewicht der Komponente um etwa 17% reduziert. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Porosität $10\% \pm 1\%$ beträgt und gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,5\% \pm 0,1\%$), die Härte bei $\text{HV } 1450 \pm 30$ bleibt und die Lebensdauer das 10^6 -fache $\pm 10^5$ -fache überschreitet, was besser ist als bei herkömmlichem WC10Co (ca. 5×10^5 -fache). Diese Leistung ist besonders wichtig bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Turbinenschaufeln oder Rumpfstrukturteilen von Flugzeugen. Der graduelle Co-Gehalt ($5-15 \% \pm 1 \%$) erzeugt einen Härtegradienten von HV 1400–1800 ± 30 , $K1c > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, eine Spannungsverteilungsrate $> 50 \% \pm 5 \%$. Dadurch wird die durch hochfrequente Vibrationen und thermische Spannungen verursachte Rissausbreitung ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) effektiv verlangsamt. Darüber hinaus senkt das gewichtsreduzierte Design den Treibstoffverbrauch und erfüllt so die Anforderungen der Luftfahrtindustrie an eine umweltfreundliche Entwicklung.

(2) Biomedizinische Implantate aus Hartmetall

In biomedizinischen Implantatanwendungen weist poröses WC-Co (Porengröße $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) eine hervorragende Biokompatibilität und Langzeitbeständigkeit auf. Die Porengröße von $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ fördert das Knochenwachstum und die Durchblutung. SEM-Untersuchungen zeigen eine gleichmäßige Porenwand (Abweichung $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und eine Kompatibilität von $> 95 \% \pm 2 \%$. Damit übertrifft es herkömmliche Implantate aus Titanlegierungen (ca. $90 \% \pm 2 \%$) deutlich. Die poröse Struktur reduziert die Dichte auf $\sim 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, die Energieabsorptionsrate $> 50 \% \pm 5 \%$, passt sich dynamischen Veränderungen biologischer Belastungen an und hat eine Lebensdauer von über 10 Jahren ± 1 Jahr. Geeignet für Hüftgelenke oder Zahnimplantate. WC-Körner von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ gewährleisten die Porenwandfestigkeit ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), verhindern strukturelle Ermüdung bei Langzeitgebrauch und die Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10 \text{ nm}$) der Ni-Phase ($< 10 \% \pm 0,1 \%$) verbessert die Korrosionsbeständigkeit weiter (Gewichtsverlust $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$) und erfüllt die Anforderungen einer sterilen Umgebung.

(3) Intelligente Hartmetallform

Bei intelligenten Formen Anwendungen zeichnet sich abgestufter WC-Co (Co-Gehalt $5-15 \% \pm 1 \%$) durch seine hohe Zähigkeit und sein dynamisches Verhalten aus. Der Härtegradient HV 1400–1800 ± 30 , $K1c$ erreicht $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, was im Vergleich zu gleichmäßigem WC-Co ($K1c$ $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) eine um etwa 33 % höhere Spannungsverteilungsrate von $> 50 \% \pm 5 \%$ und eine Ermüdungslebensdauer von mehr als dem 10^6 -fachen $\pm 10^5$ -fachen entspricht, was für das häufige Formen komplexer geometrischer Formen in der intelligenten Fertigung geeignet ist. Die SEM-Analyse zeigt eine kontinuierliche Co-Gradientenverteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), eine Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ und eine Energieabsorptionsrate von $> 50 \% \pm 5 \%$, was die adaptive Verformung der Form unter hochfrequenten dynamischen Belastungen unterstützt. Die Genauigkeit beträgt $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und eignet sich daher für die Präzisionsbearbeitung von Automobilteilen oder elektronischen Komponenten. Im Vergleich zu herkömmlichen Formen reduziert das Gradientendesign Mikrorisse durch thermische Belastung ($< 50 \text{ MPa}$) und verlängert die Lebensdauer.

(4) Beschichtung von Fluggturbinen

Die poröse WC5MoS₂-Gradientenstruktur eignet sich gut für Flugzeugturbinenbeschichtungen. Mit einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ und MoS₂-Schmiermittel ($5 \% \pm 0,1 \%$) reduziert sich der Reibungskoeffizient auf $0,12 \pm 0,01$, die Lebensdauer beträgt $> 10^6 \pm 10^5$ und die Betriebsdauer über 6000 Stunden. Die Porengröße von $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ verbessert die Schmiermittelpenetration, reduziert Hochgeschwindigkeitsluftströmungen und Partikelabtrag, ist für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturumgebungen ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) geeignet und verbessert die Ermüdungs- und Verschleißfestigkeit der Beschichtung.

(5) Ölbohrwerkzeuge

Poröses WC8MoS₂C (Porosität $15\% \pm 1\%$) eignet sich gut für Ölbohrungen. Die Porengröße beträgt $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, um Bohrspäne ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) aufzunehmen. Die Schmiermittelpenetration reduziert die Haftung auf $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ und die Lebensdauer erhöht sich im Vergleich zu herkömmlichen Bohrern um etwa 25 %. Die Energieabsorptionsrate von $> 50\% \pm 5\%$ passt sich dem Aufprall auf hartes Gestein an und reduziert die Austauschhäufigkeit.

(6) Medizinprodukte

Poröses WC-NiTi (Porengröße $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) hat breite Anwendungsaussichten in medizinischen Geräten, und Gradient Co 5 % – 15 % $\pm 1\%$ bietet $K1c > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, NiTi-Verformungsrate $< 0,1\% \pm 0,01\%$ als Reaktion auf dynamische Belastung, Lebensdauer > 5000 -mal, geeignet für orthopädische Skalpelle, verbessert Schnittgenauigkeit und Haltbarkeit.

(7) Umfassende Vorteile und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten

Bionische Mikrostrukturen verbessern die Vielseitigkeit von Hartmetall deutlich, reduzieren das Gewicht und verlängern die Lebensdauer gewichtsreduzierter Bauteile in der Luftfahrt, verbessern die Kompatibilität und Lebensdauer biomedizinischer Implantate, steigern die Verarbeitungsgenauigkeit und Haltbarkeit intelligenter Formen, optimieren die Effizienz von Beschichtungen für die Luftfahrt und Ölbohrwerkzeugen und erhöhen die Sicherheit medizinischer Geräte. Im Vergleich zu gleichmäßigem WC-Co erhöht eine poröse Gradientenstruktur die Ermüdungsfestigkeit um etwa 100 %, und die Kompatibilität wird um $> 5\% \pm 2\%$ verbessert. Zukünftige Anwendungen können auf verschleißfeste Schichten im Schienenverkehr ausgeweitet werden: Poröses WC-NiTi reduziert den Verschleiß der Schienenoberfläche; intelligente Sensoren und Gradientenstrukturen unterstützen die Dehnungsüberwachung; bei Schiffsausrüstung erhöht die poröse Struktur die Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust $< 0,05\text{ mg/cm}^2$).

Bionische Mikrostrukturen aus Hartmetall zeigen hervorragende Leistung in gewichtsreduzierten Komponenten der Luftfahrt (Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -fach), biomedizinischen Implantaten (Kompatibilität $> 95\%$, Lebensdauer > 10 Jahre) und intelligenten Formen ($K1c > 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, Lebensdauer $> 10^6$ -fach), was die Verbesserung der Multifunktionalität von Gradienten- und Porenstrukturen belegt. Zukünftige Materialinnovationen können ein breiteres Spektrum an Anforderungen abdecken.

9.4.2 Perspektiven für intelligentes Hartmetall

9.4.2.1 Übersicht über das Smart Response Carbide-Prinzip

Smart Response Hartmetall erreicht Materialanpassungsfähigkeit durch die Einführung der NiTi-Verformungslegierung und Nanosensoren, was seine Leistung in dynamischen Umgebungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

signifikant verbessert. Dieses Design erreicht eine Spannungsanpassungsrate $> 50 \% \pm 5 \%$ durch den Formgedächtniseffekt und die Superelastizität von NiTi (Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und Echtzeitüberwachung von Nanosensoren (Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), mit dem Ziel einer Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und einer Reaktionsgenauigkeit $> 95 \% \pm 2 \%$. Die Phasenübergangstemperatur von NiTi liegt bei etwa $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, wodurch das Material die Fähigkeit erhält, auf Wärme oder Mechanik zu reagieren, und der Nanosensor bietet präzises Feedback durch Überwachung der Dehnung (Genauigkeit $\pm 0,001 \%$), um das Verhalten des Materials unter komplexen Arbeitsbedingungen zu optimieren. Im Vergleich zu herkömmlichem Hartmetall durchbricht das Smart-Response-Design die Einschränkungen der statischen Leistung und eignet sich für Szenarien wie die adaptive Schnittkraft intelligenter Werkzeuge ($< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) und die Hochgeschwindigkeitsreaktion von Roboterkomponenten ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$).

Der Herstellungsprozess umfasst NiTi-Dotierung ($1\text{--}5 \% \pm 0,1 \%$) zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit, Sintern bei $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ zur Gewährleistung der Materialstabilität und Integration von Nanosensoren (Größe $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) zur Echtzeitüberwachung. Beispielsweise erreichte die Härte der WC3NiTi-Probe $\text{HV } 1450 \pm 30$, die Verformungsrate betrug $0,05 \% \pm 0,01 \%$ und die Reaktionszeit $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, was die Machbarkeit von Smart Response bestätigt. In diesem Abschnitt werden die Prinzipien von Smart-Response-Hartmetall und sein Potenzial in der modernen Industrie aus Sicht der Mechanismusanalyse, der Anwendungsaussichten und technischer Beispiele untersucht.

9.4.2.2 Analyse des intelligenten Reaktionsmechanismus von Hartmetall

Smart-Response-Hartmetall erreicht adaptive Materialeigenschaften durch den synergistischen Effekt der NiTi-Deformationslegierung und der WC-Matrix, kombiniert mit der Echtzeitüberwachung von Nanosensoren. Dieser Abschnitt analysiert eingehend den Mechanismus der martensitischen Phasenumwandlung von NiTi, die unterstützende Rolle der WC-Matrix, die Dehnungserkennungsfunktion von Nanosensoren und die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Komponenten. Durch die Kombination mikroskopischer Beobachtungen und experimenteller Daten werden Optimierungsmechanismen für Spannungsregulierung, Härte und Zähigkeit aufgezeigt und die theoretische Grundlage für Anwendungen wie intelligente Werkzeuge und Roboterkomponenten geschaffen.

(1) NiTi-Martensitumwandlungsmechanismus

Die intelligente Reaktionsfähigkeit von NiTi wird hauptsächlich durch seine martensitische Phasenumwandlung bestimmt. Die Phasenumwandlungstemperatur (A_f) beträgt etwa $100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, die Verformungsrate wird auf $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ kontrolliert und die Spannungsanpassungsrate beträgt $> 50 \% \pm 5 \%$, was durch die reversible Umwandlung von Austenit und Martensit erreicht wird. Während der Phasenumwandlung absorbiert und gibt NiTi Dehnungsenergie ab. Die SEM-Analyse zeigt, dass NiTi-Partikel (Größe $1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), mit einer Bindungsstärke von $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, wodurch die Stabilität der Verformungsübertragung sichergestellt wird. Ein NiTi-Gehalt von $3 \% \pm 0,1 \%$ bietet

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

das beste Gleichgewicht zwischen Reaktionsfähigkeit und Härte. Wenn der Gehalt $5 \% \pm 0,1 \%$ übersteigt, verringert sich die Bruchzähigkeit (K_{1c}) um etwa $10 \% \pm 2 \%$. Der Grund hierfür liegt darin, dass zu viel NiTi zu einer Schwächung der Korngrenzen und einer erhöhten Mikrorissdichte ($> 10^3 \text{ m}^{-2}$) führt.

(2) Unterstützende Rolle der WC-Matrix

Die WC-Matrix dient als Skelett des Hartmetalls und sorgt für Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$ sowie strukturelle Stabilität, während die Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ für hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) sorgt. Die Einbettung von NiTi-Partikeln erhöht die Zähigkeit von WC $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, die Ermüdungslebensdauer um das $> 10^6 \pm 10^5$ -fache. SEM-Beobachtungen zeigen, dass die Phasengrenzen von NiTi und WC nahe beieinander liegen (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), und EDS-Tests bestätigen, dass das Ni:Ti-Verhältnis ungefähr $1:1 \pm 0,1$ beträgt, was die chemische Homogenität von NiTi bestätigt und die dynamische Reaktion der Spannungsregulierung unterstützt.

(3) Dehnungsüberwachung durch Nanosensoren

Der Nanosensor überwacht die Dehnung in Echtzeit durch Widerstandsänderungen ($> 1 \% \pm 0,1 \%$) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001 \%$. Er hat eine Größe von $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und ist auf der Oberfläche oder im Inneren des Materials integriert. Der Sensor basiert auf dem piezoresistiven Effekt mit einer Reaktionszeit von $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ und einem Reaktionstest von $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$, der eine stabile Verformungsrate (Abweichung $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) zeigt und so die Genauigkeit der adaptiven Regelung gewährleistet. Die SEM-Analyse zeigt, dass der Sensor gut mit dem Substrat verbunden ist (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$), und XPS bestätigt die Stabilität der NiTi-Oberfläche (Ni 2p-Peak $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), wodurch Oxidationsstörungen vermieden werden (O 1s-Peak $< 0,5 \%$).

(4) Sintertemperatur und Leistungsregelung

Die Sintertemperatur von $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ist niedriger als die Zersetzungstemperatur von NiTi ($> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Unter Argon-Schutzatmosphäre wird der thermische Abbau von NiTi wirksam verhindert. Die SEM-Beobachtung zeigt, dass WC-Körner $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ groß bleiben und die NiTi-Partikel gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). 1400°C gewährleisten eine Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, wodurch Kornwachstum ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) oder Verzerrungen durch die NiTi-Phasentransformation ($> 5 \% \pm 1 \%$) im Vergleich zum Hochtemperatursintern ($> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) vermieden werden und eine Reaktionsgenauigkeit von $> 95 \% \pm 2 \%$ aufrechterhalten wird.

(5) Anwendungsüberprüfung und Optimierungsrichtung

WC3NiTi eignet sich gut für intelligente Werkzeuge mit einer Härte von $\text{HV } 1450 \pm 30$, einer Schnittkraft von $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, einer Deformationsrate von $0,05 \% \pm 0,01 \%$, einer Reaktionszeit von $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ und einer Lebensdauer von $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$. Bei Roboterteilen ist die Reaktionszeit von $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ für Hochgeschwindigkeitsbewegungen geeignet und die Lebensdauer beträgt $> 10^4$ -mal $\pm 10^3$ -mal. Eine Optimierung kann erreicht werden, indem der NiTi-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gehalt auf 2–4 % $\pm$ 0,1 % angepasst wird, um K1c zu erhöhen, der Nanosensor auf 50 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ reduziert wird, um die Genauigkeit zu verbessern ($\pm 0,0005$ %), und komplexere Sensornetzwerke in Kombination mit 3D-Druck integriert werden, um eine Anpassung an hohe Temperaturen ($> 400^\circ\text{C}$) oder hohe Belastungen ($> 200 \text{ N}$) zu ermöglichen.

Intelligentes Hartmetall mit martensitischer NiTi-Umwandlung ($A_f \sim 100^\circ\text{C}$) und Deformation $< 0,1$ %, WC-Matrixhärte $> \text{HV } 1400$, Nanosensorgenauigkeit $\pm 0,001$ % für Spannungsregulierung > 50 %. Am Beispiel von WC₃NiTi mit Härte HV 1450 und Reaktionszeit 0,8 ms kann die Leistung in extremen Umgebungen durch zukünftige Optimierungen weiter verbessert werden.

9.4.2.3 Analyse der Faktoren, die die intelligente Reaktion von Hartmetall beeinflussen

Die Leistung von Smart-Response-Hartmetall wird durch eine Kombination von Schlüsselfaktoren beeinflusst. Diese bestimmen Anpassungsfähigkeit, Härte und Zähigkeit in Anwendungen wie intelligenten Werkzeugen und Roboterkomponenten durch die Anpassung von NiTi-Gehalt, Sensorgröße, Sinter Temperatur, Korngröße und Umgebungsbedingungen. Eine sinnvolle Optimierung dieser Parameter kann eine Spannungsanpassungsrate von $> 50\% \pm 5\%$, eine Härte von $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und eine Reaktionsgenauigkeit von $> 95\% \pm 2\%$ gewährleisten. Im Folgenden wird der Einfluss der einzelnen Einflussfaktoren auf die Smart-Response-Leistung anhand ihres Mechanismus, experimenteller Daten und Anwendungsfälle detailliert analysiert und Verbesserungsvorschläge unterbreitet.

(1) NiTi-Gehalt

Der NiTi-Gehalt beeinflusst sowohl die Verformungsrate als auch die Härte. Der empfohlene Gehalt beträgt $3\% \pm 0,1\%$. Die Verformungsrate liegt dann bei $< 0,1\% \pm 0,01\%$, die Spannungsanpassungsrate bei $> 50\% \pm 5\%$, die Härte bleibt bei $\text{HV } 1450 \pm 30$ und der K1c-Wert bei $> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Am Beispiel von WC₃NiTi zeigt die SEM-Analyse, dass die NiTi-Partikel ($1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und die Bindungsfestigkeit $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ beträgt, was die Anpassungsfähigkeit optimiert. Wenn der NiTi-Gehalt jedoch $5\% \pm 0,1\%$ übersteigt, verringert sich die Härte um etwa $10\% \pm 2\%$ (z. B. beträgt die Härte von WC₅NiTi nur $\text{HV } 1300 \pm 30$). Der Grund dafür ist, dass zu viel NiTi zu einer Schwächung der Korngrenzen, einer erhöhten Mikrorissdichte ($> 10^3 \text{ m}^{-2}$) und einem verringerten K1c-Wert ($> 10\% \pm 2\%$) führt. Der Optimierungsvorschlag besteht darin, den NiTi-Gehalt auf $2\text{--}4\% \pm 0,1\%$ zu begrenzen und die Zähigkeit durch Regulierung der Phasenumwandlungstemperatur ($\sim 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) mittels Wärmebehandlung zu verbessern.

(2) Sensorgröße

Die Sensorgröße beeinflusst direkt die Reaktionszeit und Genauigkeit. Die empfohlene Größe beträgt $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001$ %, einer Reaktionszeit von $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ und einer Widerstandsänderung von $> 1\% \pm 0,1\%$, was den Anforderungen der Echtzeitüberwachung entspricht. Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zeigt, dass der $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ große Sensor gut mit dem WC-Substrat verbunden ist (Kontaktfläche $> 95\% \pm 2\%$). Der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reaktionstest bei einer Frequenz von $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ zeigt eine Abweichung der Verformungsrate von $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$. Wenn die Sensorgröße $20 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ überschreitet, erhöht sich die Reaktionszeit um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ($> 1,1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), da die größere Größe die Effizienz der Signalübertragung einschränkt und die Genauigkeit auf $\pm 0,002 \%$ sinkt. Die Optimierung kann durch Verkleinern des Sensors auf $50 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ erreicht werden, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit ($< 0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) und Genauigkeit ($\pm 0,0005 \%$) verbessert werden, um die Anpassung an Hochfrequenzanwendungen zu ermöglichen.

(3) Sintertemperatur

Die Sintertemperatur ist entscheidend für die Stabilität und die Materialeigenschaften von NiTi. $1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ werden empfohlen, um sicherzustellen, dass sich NiTi nicht zersetzt (Zersetzungstemperatur $> 1500 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$), Härte $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Unter Argon-Schutzatmosphäre zeigt die SEM-Analyse, dass WC-Körner $0,51 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ groß bleiben, NiTi gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und XPS die Oberflächenstabilität bestätigt (Ni2p-Peak $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, Sauerstoffgehalt $< 0,5 \%$). Bei Temperaturen über $1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht sich die NiTi-Zersetzung um etwa $5 \% \pm 1 \%$, was zu einer instabilen Verformungsrate ($> 0,15 \% \pm 0,01 \%$) und einer verringerten Härte ($> 5 \% \pm 1 \%$) führt. Die thermische Spannung ($< 50 \text{ MPa}$) muss durch stufenweises Erhitzen (Vorwärmen bei $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) kontrolliert werden. Der Optimierungsvorschlag besteht darin, die Temperatur bei $1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ zu halten und die Haltezeit ($2 \text{ Stunden} \pm 0,1 \text{ Stunden}$) zu verlängern, um die Dichte zu verbessern.

(4) Korngröße

Die Korngröße hat einen erheblichen Einfluss auf Zähigkeit und Härte. Die empfohlene WC-Korngröße beträgt $0,51 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ und kann durch Zugabe von Inhibitoren (z. B. VC, $0,5\text{--}1 \%$) und Kugelmahlen ($40 \pm 1 \text{ Std.}$) erreicht werden. Feine Körner erhöhen die Porenwandfestigkeit ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), die Korngrenzendichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und die Ermüdungslebensdauer $> 10^6 \pm 10^5$ -fach. SEM-Untersuchungen zeigen, dass die Korngrenzen dicht und die Mikrorisse $< 0,1 \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ sind. Wenn die Korngröße $2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ überschreitet, verringert sich K1c um etwa $10 \% \pm 2 \%$ und die Härte nimmt aufgrund der Spannungskonzentration durch die Verringerung der Korngrenzen ab ($> 5 \% \pm 1 \%$). Zur Optimierung können Nanokörner ($< 0,3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) zu verbessern.

(5) Umwelt

Die Umgebungstemperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die Verformungsrate. Übersteigt die Temperatur $100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, wird der NiTi-Phasenübergang aktiviert, die Verformungsrate steigt um ca. $20 \% \pm 3 \%$ ($> 0,12 \% \pm 0,01 \%$) und die Spannungsanpassungsrate auf $> 60 \% \pm 5 \%$, die Härte kann jedoch abnehmen ($< 5 \% \pm 1 \%$). Eine Luftfeuchtigkeit von $> 50 \% \pm 5 \%$ führt zu einer Oxidation der NiTi-Oberfläche (die O1s-Spitzenposition steigt um $0,1 \% \pm 0,01 \%$) und die Reaktionsgenauigkeit nimmt ab ($< 90 \% \pm 2 \%$). Bei $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $30\text{--}50 \%$ ist die Verformungsrate stabil ($< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und die Genauigkeit beträgt $> 95 \% \pm 2 \%$. Zur Erhöhung der Feuchtigkeitsbeständigkeit empfiehlt sich die Verwendung einer NiO-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Passivierungsschicht (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) oder einer SiO_2 -Beschichtung ($< 1 \%$).

(6) Umfassende Fälle und Optimierungsrichtungen

Nehmen wir WC3NiTi als Beispiel: NiTi $3 \% \pm 0,1 \%$, Sensor $110 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, gesintert bei $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, Korngröße $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$, $\text{K1c }_{16} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Reaktionszeit $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. Im Vergleich zu WC5NiTi (Härte $\text{HV } 1300 \pm 30$, $\text{K1c }_{\text{um}} 10 \% \pm 2 \%$ verringert) ist die Leistung nach der Optimierung deutlich verbessert. In einer Umgebung von $120 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt die Verformungsrate auf $0,12 \% \pm 0,01 \%$, kann aber durch Temperaturkontrolle auf $0,08 \% \pm 0,01 \%$ wiederhergestellt werden. Zukünftige Optimierungen können darin bestehen, NiTi auf $2,5\text{--}3,5 \% \pm 0,1 \%$ einzustellen, den Sensor auf $50 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ zu reduzieren, die Sintertemperatur auf $1390 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ fein einzustellen, die Körnung auf $0,3 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ zu verfeinern und es für hohe Temperaturen ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) oder hohe Frequenzen ($> 10 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$) geeignet zu machen.

Die Reaktionsfähigkeit von Hartmetall mit intelligenter Reaktion wird durch den NiTi-Gehalt (3%), die Sensorgröße ($110 \text{ } \mu\text{m}$), die Sintertemperatur ($1400 \text{ }^\circ\text{C}$), die Korngröße ($0,51 \text{ } \mu\text{m}$) und die Umgebung ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) beeinflusst. Die Härte von WC3NiTi beträgt $\text{HV } 1450$ und ist damit besser als die von WC5NiTi ($\text{HV } 1300$). Zukünftig kann seine Leistung unter extremen Bedingungen durch Parameteroptimierung verbessert werden.

9.4.2.4 Intelligent Response-Optimierungsstrategie für Hartmetall

Um bei intelligent reagierendem Hartmetall eine Härte von $> \text{HV } 1400 \pm 30$ und eine Deformationsrate von $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ zu erreichen und gleichzeitig eine Spannungsanpassungsrate von $> 50 \% \pm 5 \%$, eine Reaktionsgenauigkeit von $> 95 \% \pm 2 \%$ und eine Ermüdungslebensdauer von $> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach sicherzustellen, ist eine umfassende Strategie aus Zusammensetzungsoptimierung, Verbesserung des Sinterprozesses, Sensorintegration, Oberflächenbehandlung und Testspezifikationen erforderlich. Diese Optimierungsmaßnahmen nutzen den Formgedächtniseffekt von NiTi und die Echtzeitüberwachungsfähigkeit von Nanosensoren voll aus, um die hohen dynamischen Leistungsanforderungen intelligenter Werkzeuge, Roboterkomponenten usw. zu erfüllen. Im Folgenden wird das Optimierungsschema hinsichtlich Materialzusammensetzung, Herstellungsprozess, Integrationstechnologie, Oberflächenbehandlung und Teststandards detailliert beschrieben, seine Wirkung anhand experimenteller Daten verifiziert und Spielraum für weitere Verbesserungen ausgelotet.

(1) Zutatenoptimierung

Die Optimierung der Zusammensetzung konzentriert sich auf einen NiTi-Gehalt von $3 \% \pm 0,1 \%$ und eine WC-Korngröße von $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$. Ein NiTi-Gehalt von $3 \% \pm 0,1 \%$ bietet die beste Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, eine Spannungsanpassungsrate $> 50 \% \pm 5 \%$, eine martensitische Umwandlungstemperatur ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) gewährleistet eine thermische/mechanische Reaktionsstabilität, eine SEM-Analyse zeigt eine gleichmäßige Verteilung der NiTi-Partikel ($1,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und eine Bindungsstärke $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$. WC-Körner $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, erreicht durch Zugabe von Inhibitoren (z. B.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

VC, 0,5 % – 1 %) und Kugelmahlen (40 h $\pm$ 1 h), Härte $> HV\ 1400 \pm 30$, $K1c > 15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$, Korngrenzendichte $> 10^{14}\ m^{-2}$ Reduzierte Mikrorisse ($< 0,1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$). 3 % $\pm$ 0,1 % Ausgewogene Reaktionsfähigkeit und Festigkeit im Vergleich zu NiTi $> 5\ % \pm 0,1\ %$ (10 % $\pm$ 2 % Härtereduzierung).

(2) Sinterprozess

Beim Sinterprozess wird Heißpressen bei $1400\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$ und einem Druck von $50\ MPa \pm 1\ MPa$ verwendet, um die Materialleistung und NiTi-Stabilität sicherzustellen. $1400\ ^\circ C$ ist niedriger als die Zersetzungstemperatur von NiTi ($> 1500\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$), eine Argon-Schutzatmosphäre verhindert eine Oxidation, die SEM-Beobachtung zeigt, dass die WC-Körner $0,51\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ groß bleiben, NiTi gleichmäßig verteilt ist (Abweichung $< 0,1\ % \pm 0,02\ %$) und die Härte $> HV\ 1400 \pm 30$ ist. Ein Druck von 50 MPa fördert die Bindung von NiTi und WC (Bindungsstärke $> 100\ MPa \pm 10\ MPa$) und verhindert ein Kornwachstum ($> 2\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$) oder eine Härtereduzierung ($> 5\ % \pm 1\ %$) durch eine hohe Temperatur ($> 1450\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$). Durch schrittweises Erhitzen (Vorwärmen bei $1200\ ^\circ C$) wird die thermische Spannung verringert ($< 50\ MPa$) und der $K1c$ -Wert sowie die Ermüdungslebensdauer verbessert ($> 10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach).

(3) Sensorintegration

Die Sensorintegrationsgröße beträgt $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, die Genauigkeit $\pm 0,001\ %$, die Widerstandsänderung $> 1\ % \pm 0,1\ %$ und die Reaktionszeit $< 1\ ms \pm 0,1\ ms$. Die SEM-Analyse zeigt, dass der Sensor gut in das Substrat integriert ist (Kontaktfläche $> 95\ % \pm 2\ %$), und der Dehnungstest bei einer Frequenz von $1\ Hz \pm 0,01\ Hz$ bestätigt, dass die Abweichung der Verformungsrate $< 0,01\ % \pm 0,001\ %$ beträgt. Die Größe von $110\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ gleicht Genauigkeit und Integrationsschwierigkeiten aus und optimiert die Echtzeitüberwachung im Vergleich zu $> 20\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ (Ansprechzeit um 10 % $\pm$ 2 % erhöht). In Zukunft kann er auf $50\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$ reduziert werden, wodurch die Genauigkeit auf $\pm 0,0005\ %$ und die Reaktionsgeschwindigkeit ($< 0,8\ ms \pm 0,1\ ms$) verbessert wird.

(4) Oberflächenbehandlung

Die Oberflächenbehandlung erfolgt durch Polieren auf $Ra < 0,05\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ und Entfernen von Defekten mittels Diamantpolieren oder chemisch-mechanisch Polieren (CMP). Die flache Oberfläche verbessert die Gleichmäßigkeit der NiTi-Verformung (Abweichung $< 0,01\ % \pm 0,001\ %$), reduziert Spannungskonzentrationen, Härte $> HV\ 1400 \pm 30$, Reaktionsgenauigkeit $> 95\ % \pm 2\ %$. SEM bestätigt gleichmäßige Oberflächenrauheit (Abweichung $< 0,1\ % \pm 0,02\ %$), Ultraschallreinigung entfernt Rückstände und verhindert durch Feuchtigkeit verursachte Oxidation ($> 50\ % \pm 5\ %$) ($O1s$ -Anstieg $< 0,1\ % \pm 0,01\ %$). Nach dem Polieren kann eine NiO-Passivierungsschicht (Dicke $10\ nm \pm 1\ nm$) aufgebracht werden, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern (Gewichtsverlust $< 0,06\ mg/cm^2$).

(5) Prüfvorschriften

Die Prüfvorschrift verwendet Dehnungsprüfungen mit einer Frequenz von $1\ Hz \pm 0,01\ Hz$, um niederfrequente dynamische Belastungen zu simulieren und Verformungsrate sowie Reaktionszeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

zu messen. Die Umgebungstemperatur beträgt $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Luftfeuchtigkeit 30–50 %, und der Durchschnittswert wird nach drei Wiederholungen ermittelt. Die angestrebte Reaktionszeit beträgt $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$. Am Beispiel von WC3NiTi beträgt die Verformungsrate nach dem Sintern bei $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$, die Reaktionszeit $0,8\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$, die Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$ und $\text{K1c } 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, was besser ist als bei Proben mit NiTi $> 5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$ (Härte $\text{HV } 1300 \pm 30$). Durch die Kombination von SEM und EDS zur Analyse der NiTi-Verteilung und der Sensorleistung kann dies künftig auf Hochfrequenztests ($> 10\text{ Hz} \pm 0,1\text{ Hz}$) oder Hochtemperaturumgebungen ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) ausgeweitet werden.

(6) Umfassender Optimierungseffekt und Anwendungsüberprüfung

WC3NiTi gesintert bei $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$, $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ Sensor, $\text{Ra} < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$, Verformung $0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$, Reaktionszeit $0,8\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$, $\text{K1c } 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Ermüdungslebensdauer $> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$. In intelligenten Werkzeugen, Schnittkraft $< 10\text{ N} \pm 1\text{ N}$, Lebensdauer $> 5000\text{ m} \pm 500\text{ m}$; in Roboterteilen, Reaktionszeit $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$, Lebensdauer $> 10^4\text{-mal} \pm 10^3\text{-mal}$. Im Vergleich zu NiTi-Proben mit $5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$ (Härteabnahme um $10\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$) ist die Leistung nach der Optimierung deutlich verbessert.

(7) Umweltkontrolle und künftige Entwicklung

Beim Sintern wird Argon verwendet, um Oxidation zu vermeiden. Die Temperatur liegt bei $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, um die Erhöhung der Verformungsrate ($< 20\text{ \%} \pm 3\text{ \%}$) zu kontrollieren. Zukünftig kann der 3D-Druck zur Integration komplexer Sensornetzwerke eingesetzt werden. NiTi wird auf $2,5\text{--}3,5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$ eingestellt, um K1c zu erhöhen. Der Sensor wird auf $50\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ reduziert, um ihn an hohe Temperaturen ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) oder hohe Belastungen ($> 200\text{ N}$) anzupassen, wie etwa bei Flugzeugturbinen und Energieanlagen.

Smart Response Hartmetall mit NiTi $3\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$, WC $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, gesintert bei $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $110\text{ }\mu\text{m}$ Sensor und $\text{Ra} < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ optimierte Härte $> \text{HV } 1400$, Verformungsrate $< 0,1\text{ \%}$. WC3NiTi-Verformungsrate $0,05\text{ \%}$, Reaktionszeit $0,8\text{ ms}$, die zukünftig durch Nanotechnologie weiter verbessert werden kann.

9.4.2.5 Intelligent Response Hartmetall-Engineering-Anwendung

Smart Response Hartmetall kombiniert den Formgedächtniseffekt der NiTi-Deformationslegierung (Phasenübergangstemperatur $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) mit der Echtzeit-Dehnungsüberwachung von Nanosensoren (Genauigkeit $\pm 0,001\text{ \%}$), um eine Spannungsanpassungsrate von $> 50\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ und eine Reaktionszeit von $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$ zu erreichen. Dies verbessert die Anpassungsfähigkeit und Vielseitigkeit deutlich. Dieses innovative Design durchbricht die Grenzen der statischen Leistung von herkömmlichem Hartmetall und erfüllt die Anforderungen moderner Ingenieurstechnologie an hohe Präzision, Langlebigkeit und Umweltanpassungsfähigkeit durch dynamische Reaktionsfähigkeit. Die Entwicklung intelligenter Werkstoffe wie WC3NiTi optimiert nicht nur Härte ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), Zähigkeit ($\text{K1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Lebensdauer ($> 10^6 \pm 10^5\text{-fach}$), sondern hat auch ihre Anwendungsgebiete auf intelligente Fertigung, Robotik, Luft- und Raumfahrt,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Medizintechnik, Energieanlagen, Verkehrsinfrastruktur und neue Technologiefelder ausgeweitet. Im Folgenden wird ihr technischer Anwendungswert im Detail aus der Perspektive spezifischer Anwendungsszenarien, Leistungsvorteile, praktischer Fälle und potenzieller Erweiterungsrichtungen erörtert, ihr Beitrag zu industrieller Effizienz, Biokompatibilität, Haltbarkeit und nachhaltiger Entwicklung analysiert und ein Ausblick auf ihr künftiges Entwicklungspotenzial gegeben.

(1) Intelligente Hartmetallwerkzeuge

Bei der Anwendung intelligenter Hartmetallwerkzeuge zeigt WC₃NiTi (Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) eine hervorragende adaptive Schneidleistung. Der NiTi-Gehalt von $3 \% \pm 0,1 \%$ bewirkt eine Verformungsrate von $0,05 \% \pm 0,01 \%$ und passt die Schnittkraft durch martensitische Phasenumwandlung in Echtzeit auf $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ an, wodurch die Reibungswärme zwischen Werkzeug und Werkstück ($< 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und die Verschleißrate ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) deutlich reduziert werden. Die SEM-Analyse zeigt, dass die NiTi-Partikel ($1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) gleichmäßig in die WC-Matrix eingebettet sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), mit einer Bindungsstärke von $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, wodurch die Stabilität der Deformationsübertragung gewährleistet wird. Körner von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ bieten eine Härte von $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, die Standzeit beträgt mehr als $5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$ und übertrifft damit herkömmliches WC₁₀Co (ca. 3000 m) bei weitem. Diese Leistung ist besonders ausgeprägt bei der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie Titanlegierungen, Edelstahl) oder bei Hochgeschwindigkeitsbedingungen ($> 500 \text{ m/min}$). Der Nanosensor ($110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) überwacht die Schnittbelastung in Echtzeit (Genauigkeit $\pm 0,001 \%$), passt den Werkzeugwinkel dynamisch an, optimiert die Oberflächengüte ($\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und reduziert den Kühlmittelverbrauch, was dem Trend zur umweltfreundlichen Fertigung entspricht.

(2) Hartmetall-Roboterteile

Bei der Anwendung von Hartmetall-Roboterteilen hat WC₃NiTi (Sensor $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) aufgrund seiner hohen Reaktionsgeschwindigkeit und Genauigkeit große Aufmerksamkeit erregt. Die Sensorgröße beträgt $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und ist in die Materialoberfläche integriert. Die Genauigkeit liegt bei $> 95 \% \pm 2 \%$, die Widerstandsänderung bei $> 1 \% \pm 0,1 \%$, die Reaktionszeit bei $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, und der Dehnungstest bei einer Frequenz von $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ zeigt eine Abweichung der Verformungsrate von $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$. Die NiTi-Verformungsrate beträgt $0,05 \% \pm 0,01 \%$, was für die schnelle dynamische Bewegung von Robotergelenken, Greifern oder Manipulatoren geeignet ist. Die Lebensdauer beträgt $> 10^4 \pm 10^3$. Rasterelektronenmikroskopie zeigt, dass der Sensor gut in das Substrat integriert ist (Kontaktfläche $> 95 \% \pm 2 \%$). Im Vergleich zu herkömmlichen Stahl- oder WC-Co-Einheiten verbessert das intelligente Reaktionsdesign die flexiblen Einsatzmöglichkeiten deutlich und reduziert mechanische Belastungsschäden ($< 50 \text{ MPa}$). Dadurch eignet sich der Sensor für Produktionslinien in der industriellen Automatisierung, medizinisch-chirurgische Roboter und Haushaltsroboter. Zukünftig kann durch die Optimierung des Sensornetzwerks ($< 50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) eine mehrpunktige Dehnungsüberwachung erreicht werden, um die Koordination komplexer Bewegungen zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Luftfahrtsensor aus Hartlegierung

Bei der Anwendung in Hartmetall-Luftfahrtsensoren zeigt WC3NiTi hervorragende Haltbarkeit und Stabilität. Die Härte erreicht HV 1450 $\pm$ 30, WC-Körner 0,5 μm $\pm$ 0,01 μm sorgen für hohe Festigkeit, NiTi 3 % $\pm$ 0,1 % gewährleistet eine Verformungsrate $< 0,1\%$ $\pm$ 0,01 %, eine Spannungsanpassungsrate $> 50\%$ $\pm$ 5 %, die Ermüdungslebensdauer übersteigt das 10^6 -fache $\pm$ 10^5 -fache und ist damit besser als bei einheitlichem WC-Co (ca. 5×10^5 -fache). Nanosensoren (110 μm $\pm$ 0,1 μm) überwachen die Dehnung (Genauigkeit $\pm$ 0,001 %), haben eine Reaktionszeit von $< 1\text{ ms}$ $\pm$ 0,1 ms, sind an hohe Temperaturen ($> 400^\circ\text{C}$) und hochfrequente Vibrationen angepasst und haben eine Lebensdauer von über 6000 Stunden. XPS-Analysen zeigen, dass die NiTi-Oberfläche stabil ist (Ni 2p-Spitze $\sim 854\text{ eV}$ $\pm$ 0,1 eV, Sauerstoffgehalt $< 0,5\%$). Dies ermöglicht die Echtzeit-Spannungsüberwachung von Turbinenschaufeln, Rumpfstrukturen oder Flugsteuerungssystemen, reduziert den Wartungsaufwand und verbessert die Flugsicherheit. Darüber hinaus senkt das gewichtsreduzierte Design (Dichte $\sim 12\text{ g/cm}^3$ $\pm$ 0,1 g/cm^3) den Treibstoffverbrauch und erfüllt die Nachhaltigkeitsziele der Luftfahrtindustrie.

(4) Intelligentes Schneidsystem

WC3NiTi eignet sich gut für intelligente Schneidsysteme mit einer Verformungsrate von 0,05 % $\pm$ 0,01 %. Dynamische Anpassung der Schneidparameter, Schneidkraft $< 10\text{ N}$ $\pm$ 1 N, Lebensdauer $> 5000\text{ m}$ $\pm$ 500 m, geeignet für komplexe gekrümmte Oberflächen oder die Bearbeitung von Mikrokomponenten. Nanosensor-Feedback optimiert die Werkzeughaltung und reduziert den Verschleiß ($< 0,04\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ $\pm$ 0,01 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), verbessert die Bearbeitungsgenauigkeit ($< 1\text{ }\mu\text{m}$ $\pm$ 0,1 μm) und wird häufig bei der Herstellung von Flugzeugtriebwerksschaufeln und Automobilteilen eingesetzt. Im Vergleich zum herkömmlichen Schneiden reduziert die intelligente Reaktion die Bearbeitungszeit um 20 % $\pm$ 2 % und den Energieverbrauch um 15 % $\pm$ 2 %.

(5) Medizinische Roboterteile

Die poröse Struktur von WC3NiTi (Porengröße 5 μm $\pm$ 0,1 μm) bietet breite Anwendungsmöglichkeiten in der Medizinrobotertechnik. Die NiTi-Verformungsrate $< 0,1\%$ $\pm$ 0,01 % passt sich chirurgischen Eingriffen oder dynamischen Belastungen von Rehabilitationsgeräten an, die Reaktionszeit beträgt 0,8 ms $\pm$ 0,1 ms, die Lebensdauer $> 10^4$ -fach $\pm$ 10^3 -fach, die Kompatibilität $> 95\%$ $\pm$ 2 % und unterstützt minimalinvasive chirurgische Instrumente sowie die Prothesenkontrolle. Die SEM-Analyse zeigt eine Porenwandstärke von $> 100\text{ MPa}$ $\pm$ 10 MPa, eine gleichmäßige NiTi-Verteilung (Abweichung $< 0,1\%$ $\pm$ 0,02 %), reduziert Gewebeschäden und erfüllt die Anforderungen einer sterilen Umgebung. Zukünftig können Biosensoren integriert werden, um den Implantatstatus in Echtzeit zu überwachen.

(6) Sensoren für Energieanlagen

WC3NiTi wird in Hochtemperatursensoren in Energieanlagen eingesetzt und weist eine Härte von HV 1450 $\pm$ 30, eine Ermüdungsfestigkeit von $> 10^6 \pm 10^5$ und eine Sensorgenauigkeit von $\pm 0,001\%$ auf. Es überwacht die Belastung in Rohrleitungen, Windkraftanlagen und Kernreaktoren, passt sich Umgebungen über 400°C an und verlängert die Lebensdauer auf über 5000 Stunden. Die NiTi-Verformungsrate $< 0,1\%$ $\pm$ 0,01 % trägt zur Wärmeausdehnung bei. XPS bestätigt die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust $< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) und unterstützt so die Zuverlässigkeit von Anlagen für erneuerbare Energien und fossile Brennstoffe.

(7) Intelligente Verkehrsinfrastruktur

WC3NiTi wird in Brücken- oder Gleissensoren im intelligenten Transportwesen verwendet und weist eine Härte von $\text{HV } 1450 \pm 30$, eine Ermüdungslebensdauer von $> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$, Sensoren zur Dehnungsüberwachung (Genauigkeit $\pm 0,001 \%$), eine Reaktionszeit von $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ und Anpassungsfähigkeit an Fahrzeuglasten ($> 200 \text{ N}$) auf. Die poröse Struktur (Porosität $10 \% \pm 1 \%$) reduziert das Gewicht auf $12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, die Energieabsorptionsrate $> 50 \% \pm 5 \%$, die Verringerung von Ermüdungsrissen ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die Verlängerung der Lebensdauer auf 20 Jahre ± 2 Jahre auf.

(8) Schiffstechnische Ausrüstung

WC3NiTi wird für korrosionsbeständige Teile im Schiffsbau verwendet. Die NiTi-Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ passt sich den Einflüssen der Meeresströmung an. Sensoren überwachen die Korrosionsbelastung (Genauigkeit $\pm 0,001 \%$) und die Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. Die CrN-Beschichtung (Dicke $2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) verbessert die Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust $< 0,03 \text{ mg/cm}^2$) und die Lebensdauer $> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$ und eignet sich für Tiefseebohrungen oder Unterwasserpipelines.

(9) Tragbare Technologie und Unterhaltungselektronik

WC3NiTi wird in tragbaren Geräten und Unterhaltungselektronik verwendet. Es passt sich mit einer Verformungsrate von $0,05 \% \pm 0,01 \%$ an menschliche Bewegungen an, verfügt über eine Sensorgenauigkeit von $> 95 \% \pm 2 \%$ zur Überwachung von Gesundheitsdaten (wie Herzfrequenz, Schrittzahl) und hat eine Lebensdauer von $> 10^3\text{-mal} \pm 10^2\text{-mal}$. Die Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$ sorgt für Kratzfestigkeit, und eine Reaktionszeit von $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ unterstützt Touch-Feedback. Es eignet sich für Smartwatches und Fitness-Tracker.

(10) Nationale Verteidigungs- und Sicherheitsausrüstung

WC3NiTi wird im Verteidigungssektor für Panzerungs- oder Waffenkomponenten verwendet. Härte $\text{HV } 1450 \pm 30$, $\text{K1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, Ermüdungslebensdauer $> 10^6\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$, NiTi-Verformungsrate $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$. Absorbiert Aufprallenergie ($> 50 \% \pm 5 \%$). Sensor überwacht Spannung in Echtzeit (Genauigkeit $\pm 0,001 \%$), Reaktionszeit $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, verbessert die Explosionsfestigkeit der Panzerung, Lebensdauer > 10 Jahre ± 1 Jahr.

(11) Umfassende Vorteile und erweiterte Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendungsmöglichkeiten von Hartmetall mit intelligenter Reaktionsfähigkeit haben sich deutlich erweitert. Intelligente Werkzeuge verbessern die Schneidleistung, Roboterkomponenten erhöhen die Flexibilität, Luftfahrtsensoren verbessern die Haltbarkeit, Schneidsysteme optimieren die Genauigkeit, medizinische Komponenten erhöhen die Sicherheit, Energiesensoren erhöhen die Zuverlässigkeit, die Lebensdauer der Transportinfrastruktur verlängert sich, Schiffsausrüstung verbessert ihre Korrosionsbeständigkeit, tragbare Geräte unterstützen die Gesundheitsüberwachung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Verteidigungsausrüstung verbessert den Schutz. Im Vergleich zu einheitlichem WC-Co erhöht sich die Lebensdauer um etwa 100 %, die Reaktionsgenauigkeit um $> 5 \% \pm 2 \%$ und das Gewicht um $> 15 \% \pm 2 \%$. Zukünftige Anwendungen können auf die Weltraumforschung (Vakuumbeständigkeit $> 10^{-6}$ Pa), die Agrarautomatisierung (Verschleißfestigkeit $> 10^4$ Stunden) und Stützstrukturen für Quantencomputer (geringe Wärmeausdehnung $< 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) ausgeweitet werden.

Smart-Response-Hartmetall eignet sich gut für intelligente Werkzeuge (Verformungsrate 0,05 %, Lebensdauer > 5000 m), Roboterkomponenten (Reaktionszeit 0,8 ms, Genauigkeit $> 95 \%$) und Luftfahrtsensoren (Härte HV 1450, Lebensdauer $> 10^6$ -fach) und wird bereits in den Bereichen Medizin, Energie, Transport, Meerestechnik, Wearables und Verteidigung eingesetzt, was die Vielseitigkeit intelligenter Materialien unterstreicht. Durch Nanooptimierung und Multi-Field-Integration kann es künftig ein breiteres Spektrum an Anforderungen abdecken.

Verweise

- ASTM G6516. (2016). Standardprüfverfahren zur Messung des Abriebs mit dem Trockensand-/Gummiradgerät. ASTM International. ASTM G6516. (2016).
- ASTM G9917. (2017). Standardprüfverfahren für Verschleißprüfungen mit einem Pinondisk-Gerät. ASTM International. ASTM G9917. (2017).
- Zhang, Y., & Li, J. (2023). Multifunktionale Hartmetalle: Design und Anwendungen. *Journal of Materials Science*, 58 (12), 45674589.
- Wang , H., & Chen, X. (2024). Fortschritte bei selbstschmierenden Hartmetallen für die Trockenbearbeitung. *Tribology International*, 190 , 108912 .
- Liu, Z., & Zhao, Q. (2022). Studie zur Leitfähigkeit und magnetischen Regulierung von Hartmetallen . *Journal of Materials Science and Engineering*, 40 (5), 789796 .

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

Zusammenfassung der multifunktionalen technischen Anwendung von Hartmetall

Funktion Merkmal	Unterklassen Nicht	Materialsystem	Schlüsselparameter	Leistungsindikatoren	Technische Anwendung
Leitfähigkeits- und Magnetismuskontrolle	Leitfähigkeitskontrolle	WC10Ni, WC10Co	Ni/Co-Gehalt: 8 % 10 % ± 0,1 % / 10 % ± 1 %, Korngröße: 0,51 μm ± 0,01 μm, Sintertemperatur: 1450 °C ± 10 °C, Oberflächenrauheit: Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Spezifischer Widerstand: 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm Kontaktwiderstand: <0,1 mΩ±0,01 mΩ, Leitfähigkeit: 10,5 MS/m±0,1 MS/m, Lebensdauer: >10 ⁶ mal±10 ⁵ mal	Elektronischer Kontakt: WC10Ni- Widerstand 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm, Kontaktwiderstand <0,1 mΩ, Lebensdauer >10 ⁶ -fach. EDM-Elektrode: WC10Co-Leitfähigkeit 10,5 MS/m, Wirkungsgrad >95 %±2 %, Formgenauigkeit <1 μm. Leitfähiges Beschichtungssubstrat: WC8Ni-Haftung >50 MPa, Lebensdauer >2 Jahre.
	magnetisch Erkennung	WC10Co, WC8Ni	Co-Gehalt: 10 % ± 1 %, Ni-Gehalt: 8 % 10 % ± 0,1 %, Korngröße: 0,51 μm ± 0,01 μm, Abweichung des Kohlenstoffgehalts: 0,1 % ± 0,01 %	Magnetisierung: 8 emu/g±0,5 emu/g (WC10Co), 4 emu/g±0,5 emu/g (WC8Ni), Koerzitivkraft: 100120 Oe±10 Oe, μm, Lebensdauer >10 ⁴ Stunden. Formenbau: Erkennungsgenauigkeit: >98 % ± 1 %	Werkzeugqualitätskontrolle: WC10Co- Koerzitivfeldstärke 120 Oe, Risserkennung <0,1 mm, qualifizierte Rate >99 %. Luftfahrtteile: WC8Ni-Porenerkennung <0,1 mm, Lebensdauer >10 ⁴ Stunden. Formenbau: WC10Co-Kohlenstoffabweichung <0,1 %, Genauigkeit >98 %.
Verschleißfeste, korrosionsbeständige und leitfähige Verbundeigenschaften	WCTiCNi- Verbundwerkstoffe	WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	TiC-Gehalt: 5 % 10 % ± 0,1 %, Ni-Gehalt: 8 % 12 % ± 1 %, Korngröße: 0,51 μm ± 0,01 μm, Sintertemperatur: 1450 °C ± 10 °C	Härte: >HV 1600±30, Verschleißrate: 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Gewichtsverlust durch Korrosion: 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Spezifischer Widerstand: 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm	Elektronikform: WC10TiC10Ni, Härte HV 1650, Verschleißrate 0,05 mm ³ /N·m, Lebensdauer > 10 ⁶ -fach. Schiffsausrüstung: WC8TiC10Ni, Gewichtsverlust 0,06 mg/cm ² , Lebensdauer > 5 Jahre. Leitfähiger Kontakt: WC10TiC10Ni, Kontaktwiderstand < 0,1 mΩ, Lebensdauer > 10 ⁶ -fach.
	Leistung prüfen	WC10TiC10Ni	TiC-Gehalt: 10 % ± 0,1 %, Ni-Gehalt: 10 % ± 1 %, Belastung: 130 N ± 1 N, Oberflächenrauheit: Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Härte: HV 1650±30, Verschleißrate: 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Gewichtsverlust durch Korrosion: 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Spezifischer Widerstand: 11 μΩ·cm±0,1 μΩ·cm	Elektronische Form: Härte HV 1650, Verschleißrate 0,05 mm ³ /N·m, Lebensdauer > 10 ⁶ -mal. Marineventil: Gewichtsverlust 0,06 mg/cm ² , NaCl- Beständigkeit, Lebensdauer > 5 Jahre. Leitfähiger Kontakt: spezifischer Widerstand 11 μΩ·cm, Kontaktwiderstand < 0,1 mΩ, stabiles Signal.
Selbstschmierend und antihafbeschichtet	Schmier- Agent eingeben	WC5MoS ₂ , WC3C	MoS ₂ /C-Gehalt: 5 % ± 0,1 % / 3 % ± 0,1 %, (MoS ₂), Korngröße: 0,51 μm ± 0,01 μm, Sintertemperatur:	Reibungskoeffizient: 0,15±0,01 (MoS ₂), 0,18±0,01 (C), Adhäsion: <0,8 N±0,1 N, Härte: >HV 1500±30, Verschleißrate: <0,06 mm ³ /N·m ±	Hochgeschwindigkeitsschneiden: WC5MoS ₂ -Reibungskoeffizient 0,15, Standzeit >5000 m. Trockenbearbeitung: WC3C-Haftung 0,8 N, Reibungswärme

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

Funktion	Unterklassen	Materialsystem	Schlüsselparameter	Leistungsindikatoren	Technische Anwendung
Merkmal	Nicht				
			1400 °C ± 10 °C, Oberflächenrauheit: Ra < 0,05 µm ± 0,01 µm	0,01 mm³/N·m	<100 °C. Formgebung: WC5MoS₂- Entformungskraft <10 N, Standzeit >10⁶- fach.
	Oberfläche		Texturtiefe: 5 µm±0,1 µm , Pitch: 50100 µm±1 µm ,	Reibungskoeffizient: 0,12±0,01	Hochgeschwindigkeitswerkzeuge: WC5MoS₂-Texturtiefe 5 µm, Reibungskoeffizient 0,12, Lebensdauer >
	Textur	WC5MoS₂,	MoS₂ / C-Gehalt:	<0,8 N±0,1 N, Verschleißrate: 0,05	5000 m. Trockenform: WC3C-Abstand 50
	Yurun	WC3C	5%±0,1% / 3%±0,1%,	mm³ /N·m ± 0,01 mm³ / N·m,	µm, Haftung 0,8 N, Lebensdauer> 10⁶-fach.
	Beleg		Laserleistung: 10 W±0,1 W	Lebensdauer: >10⁴ Stunden ±10³ Stunden	Lagerkomponenten: WC5MoS₂- Reibungskoeffizient 0,15, Betrieb > 10⁴ Stunden.
Bionik und Smart Carbide	Bionik	Gradient	Porosität: 10 % ± 1 %, Co- Gradient: 5 % 15 % ± 1 %, 16	Härte: HV 1450±30, Zähigkeit: K _{1c} ± 0,5,	Gewichtsreduzierte Teile für die Luftfahrt: Gradient WCCo, Dichte 12 g/cm³, Lebensdauer >10⁶-fach. Biomedizinische
	Mikroknoten	WCCo, Poröses	Porengröße: 110 µm ± 0,1	Energieabsorptionsrate: >50%±5%,	Implantate: Poröses WCCo, Porengröße 5
	Struktur	WCCo	µm, Sintertemperatur: 1400 °C ± 10 °C	Ermüdungslebensdauer: >10 ⁶ mal±10 ⁵ mal	µm, Kompatibilität >95 %, Lebensdauer >10 Jahre. Intelligente Form: Gradient WCCo, K _{1c} 16 MPa·m ^{1/2} , Lebensdauer >10⁶-fach.
	intelligent		NiTi-Gehalt: 3 % ± 0,1 %, 0,51 µm ±	Härte: HV 1450±30,	Intelligentes Werkzeug: WC3NiTi- Verformungsrate 0,05 %, Schnittkraft <10 N,
	Antwort	WC3NiTi	0,01 µm, Sensorgröße: 110	Verformungsrate: 0,05 %±0,01 %,	Lebensdauer >5000 m.
	Material		µm ± 0,1 µm, Sintertemperatur: 1400 °C ± 10 °C	Reaktionszeit: 0,8 ms±0,1 ms, Genauigkeit: >95 %±2 %	Roboterkomponenten: Reaktionszeit 0,8 ms, Genauigkeit >95 %. Luftfahrtsensor: Härte HV 1450, Dauerfestigkeit >10⁶-fach.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Eine kurze Geschichte der Entwicklung von Gradientenhartmetall

Funktional abgestufte Hartmetalle (FGHMs) sind innovative Hartmetallwerkstoffe, die durch die Entwicklung einer funktionalen Gradientenstruktur die Leistung optimieren. Ihre Entwicklungsgeschichte spiegelt die kontinuierliche Weiterentwicklung der Materialwissenschaft und der Ingenieurstechnologie wider. Gradientes Hartmetall verbessert die Werkzeugstandzeit, die thermische Ermüdungsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften durch sanfte Phasen- oder Zusammensetzungsänderungen deutlich.

1. Konzeptionelle Entwicklung und theoretische Grundlagen (1970er-1980er Jahre)

Die Ursprünge von Gradientenhartmetall reichen bis in die 1970er Jahre zurück, als das Konzept der Funktionsgradientenwerkstoffe (FGMs) erstmals in der akademischen Forschung in Japan und Deutschland auftauchte. In dieser Zeit konzentrierte sich die theoretische Forschung zu FGMs vor allem auf die Lösung des Problems der Grenzflächenspannung, das durch Unterschiede im Wärmeausdehnungskoeffizienten oder in den mechanischen Eigenschaften herkömmlicher Verbundwerkstoffe verursacht wurde, insbesondere auf die Stabilität der Werkstoffe bei hohen Temperaturen. Als Verbundwerkstoff aus Carbiden (wie Wolframcarbid WC) und metallischen Bindungsphasen (wie Kobalt Co) hat sich Hartmetall aufgrund seiner breiten Anwendung in Schneidwerkzeugen, Formen und verschleißfesten Teilen zu einem der Forschungsschwerpunkte entwickelt. Die frühe Forschung konzentrierte sich jedoch auf Hartmetall mit gleichmäßiger Struktur, und die praktische Anwendung des Gradientendesigns steht noch aus. Es befindet sich eher im Stadium der grundlegenden theoretischen Erforschung der Materialwissenschaft.

Wichtige Ereignisse

In den 1970er Jahren begann die japanische Raumfahrtforschungs- und Entwicklungsagentur (NASDA, heute JAXA), die Möglichkeiten funktionaler Gradientenmaterialien in der Weltraumforschung zu untersuchen, insbesondere in Wärmeschutzsystemen für Raumfahrzeuge (TPS). Ziel war die Entwicklung von Wärmedämmmaterialien, die Oberflächentemperaturen bis zu 2000 K und einem Temperaturunterschied von 1000 K bei einer Dicke von 10 mm standhalten. Diese Forschung lieferte eine wichtige theoretische Grundlage für das spätere Gradientenhartmetall und weckte das Interesse an Gradientenstrukturen zur Verbesserung der Materialeigenschaften.

Im Jahr 1978 startete die japanische Wissenschafts- und Technologieagentur (STA) das Projekt „Space Planar Materials“, das die konzeptionelle Forschung zu FGMs weiter vorantrieb.

Im Jahr 1984 veröffentlichte der japanische Wissenschaftler Toshio Hirai einen Artikel im Journal of Materials Science, in dem er den Begriff „Funktional Gradiente Materialien“ offiziell einführte und das Potenzial der Reduzierung thermischer Spannungsrisse in Keramik-Metall-Verbundwerkstoffen durch Zusammensetzungsgradienten experimentell überprüfte. Dies markierte einen Wendepunkt in der Forschung zu FGMs von der Theorie zur Anwendung.

In den 1980er Jahren begann auch das Max-Planck-Institut in Deutschland, die Machbarkeit des Gradientendesigns in der Forschung zu Metallmatrix-Verbundwerkstoffen zu untersuchen und legte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

damit den Grundstein für die transnationale Zusammenarbeit bei der späteren Gradientenentwicklung von Hartmetallen.

Kennzahlen

Der Japaner Toshio Hirai war auf diesem Gebiet ein Pionier. In den 1980er Jahren verifizierte er durch systematische Experimente die Wirkung von Zusammensetzungsgradienten auf den Wärmespannungsabbau, insbesondere bei der Anwendung von $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ -Verbundwerkstoffen, was als Inspiration für das Gradientendesign von Hartmetall diente. Koichi Masuda, ein Vertreter der japanischen Forschung zu Wärmedämmstoffen, schlug das ursprüngliche Konzept vor, durch die Verwendung von Gradientenstrukturen die Leistung in Hochtemperaturumgebungen zu optimieren. Obwohl sein Hauptbeitrag auf dem Gebiet der Keramik liegt, dient er indirekt auch der Hartmetallforschung als Inspiration. Der Deutsche Hans-Joachim Dudek forscht am Max-Planck-Institut für Metallmatrix-Verbundwerkstoffe und untersucht den Einfluss von Gradientenstrukturen auf die mechanischen Eigenschaften, was die theoretische Grundlage für das spätere Gradientendesign von Hartmetall bildet.

2. Technologische Durchbrüche und Einführung funktionaler Gradienten (1990er Jahre)

In den 1990er Jahren, mit den deutlichen Fortschritten in der Materialverarbeitungstechnologie, insbesondere der Innovation in der Pulvermetallurgie und der Wärmebehandlungstechnologie, wurde die Anwendung von Gradientenhartmetall von der Theorie in die Praxis umgesetzt. In dieser Zeit verlagerte sich der Forschungsschwerpunkt auf die Einführung funktionaler Gradienten im oberflächennahen Bereich von Hartmetall, um die Verschleißfestigkeit, die Beständigkeit gegen thermische Risse und die Lebensdauer von Schneidwerkzeugen zu verbessern. Forschungseinrichtungen in Europa (z. B. Deutschland) und Nordamerika (z. B. den USA) erzielten Durchbrüche bei Sinterverfahren (z. B. Sinter-HIP, d. h. der Sintertechnologie durch heißisostatisches Pressen) und ermöglichten so die erste Industrialisierung von Gradientenstrukturen, was den Grundstein für die kommerzielle Anwendung von Gradientenhartmetall legte. Gleichzeitig wurde die Kombination von Beschichtungstechnologie und Gradientenstrukturen in dieser Zeit zu einem Forschungsschwerpunkt und trug zur allgemeinen Leistungssteigerung von Hartmetall bei.

Wichtige Ereignisse

1992 startete die deutsche Widia (ein Tochterunternehmen des Krupp-Konzerns, das später in Sandvik aufging) in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt zu Gradientenhartmetall. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bildung einer Schicht mit Co-Gehaltsgradient auf der Oberfläche von WC-Co-Hartmetall durch reaktives Sinterverfahren. Durch die Steuerung des Kohlenstoffpotenzials und des Temperaturgradienten während des Sinterprozesses wurde mit dieser Technologie eine Gradientenverteilung des Co-Gehalts an der Oberfläche von 10 % bis 5 % erreicht. Dies verbesserte die Verschleißfestigkeit des Werkzeugs deutlich und wurde zu einem wichtigen Ausgangspunkt für die Entwicklung von Gradientenhartmetall.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1995 brachte Widia offiziell die ersten Schneideinsätze aus funktional gradiertem Hartmetall auf den Markt. Durch den Einsatz der reaktiven Atmosphärensinterertechnologie konnte die Standzeit im Vergleich zu herkömmlichem homogenem Hartmetall um etwa 30 % erhöht werden. Diese Leistung wurde auf der Europäischen Konferenz für Hartstoffe 1996 umfassend gewürdigt.

Im Jahr 1998 fand in Dresden das 5. Internationale Symposium zu funktionell gradienten Werkstoffen statt. Mehr als 200 Experten aus über 20 Ländern und Regionen der ganzen Welt kamen zusammen, um über die Mikrostrukturgestaltung, den Herstellungsprozess und die potenziellen Anwendungsaussichten von Gradientenhartmetall zu diskutieren und so die internationale Zusammenarbeit und den technischen Austausch weiter zu fördern.

Kennzahlen

Der Deutsche Walter Lengauer arbeitete in den 1990er Jahren eng mit Widia zusammen und trieb die Entwicklung der Sinterertechnologie in reaktiver Atmosphäre voran. Durch Anpassung der Sinterparameter (wie Temperatur 1400 °C und Druck 50 MPa) erreichte er eine Gradientenverteilung von Co und Ti (C, N). Diese Technologie fand später breite Anwendung in der industriellen Produktion und legte den Grundstein für die Industrialisierung von Gradientenhartmetall. Der amerikanische Wissenschaftler Zhigang Zak Fang begann Ende der 1990er Jahre, sich mit dem Gradientendesign des WC-Co-Systems zu befassen und schlug eine vorläufige Idee zur Realisierung eines Co-Gradienten durch Wärmebehandlung und Aufkohlung vor. Er richtete eine entsprechende Forschungsplattform an der University of Utah ein, die wichtige Unterstützung für spätere Forschungen leistete. Darüber hinaus lieferte der Japaner Yoshinari Miyamoto in seiner Forschung auf dem Gebiet der funktionalen Gradientenmaterialien interdisziplinäre theoretische Unterstützung für das Gradientenstrukturdesign von Hartmetall.

Schlüsselprodukte

In den 1990er Jahren führte Widia beschichtete, funktional gradierte Hartmetall-Schneidplatten (z. B. die Widia TN-Serie) ein, die CVD-Beschichtungen (z. B. TiN, Ti(C,N)) in Kombination mit gradierten Substraten verwendeten und breite Anwendung in der Stahl- und Gusseisenbearbeitung fanden. Die Oberflächenhärte dieser Platten erreichte HV 1600±50, und die Verschleißfestigkeit war im Vergleich zu herkömmlichem Hartmetall um etwa 25 % verbessert. Daher wurden sie zu einem repräsentativen Produkt für industrielle Anwendungen.

3. Industrielle Anwendung und Prozessoptimierung (2000er Jahre)

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich die industrielle Anwendung von Gradientenhartmetall rasant ausgeweitet, insbesondere in den Bereichen Metallschneiden, Verschleißteile und Formenbau. In den 2000er Jahren gelang es Forschern, durch die Verbesserung von Pulvermetallurgieprozessen, Wärmebehandlungstechnologien und Ultrafeinkornertechnologie eine präzisere Gradientensteuerung zu erreichen. Die Entwicklung von Ultrafeinkorn-Gradientenhartmetall war in dieser Zeit ein wichtiger Durchbruch. Die Kombination aus Ultrafeinkornertechnologie (Korngröße unter 1 µm) und Gradientendesign verbessert nicht nur Härte und Festigkeit des Hartmetalls, sondern erhöht auch seine Splitterfestigkeit und erfüllt so die dringenden Anforderungen des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochgeschwindigkeitsschneidens und der Verarbeitung schwer zu bearbeitender Materialien.

Wichtige Ereignisse

Im Jahr 2002 veröffentlichten Walter Lengauer und Klaus Dreyer im International Journal of Refractory Metals and Hard Materials einen Übersichtsartikel mit dem Titel „Gradientensintern von Hartmetallen: Verarbeitung und Eigenschaften“. Darin wurde die Anwendung der reaktiven Atmosphärensinterstechnologie bei Gradientenhartmetall systematisch zusammengefasst und der Optimierungseffekt des Co-Gehaltsgradienten auf Härte (HV 1400–1800) und Zähigkeit (K_{1c} 10–15 MPa·m²) analysiert. Diese Studie liefert wertvolle Prozesshinweise für die Industrie und markiert den Wendepunkt in der Gradientenhartmetallforschung vom Labor zur Großserienproduktion.

Im Jahr 2005 entwickelte Sandvik in Zusammenarbeit mit der Königlich Technischen Hochschule (KTH) in Schweden ultrafeinkörniges Gradientenhartmetall. Die Korngröße wurde auf 0,5 µm reduziert, die Härte auf HV 1900 ± 50 erhöht und die Beständigkeit gegen thermische Rissbildung um etwa 20 % verbessert. Das Hartmetall wird häufig zum Schneiden von Titanlegierungen in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

Im Jahr 2009 nutzte die US-amerikanische Kennametal Corporation die Laser-Pulver-Auftragstechnologie (LPD), um Gradienten-Hartmetallwerkzeuge für die Herstellung von Warmschmiedegesenken herzustellen. Die Standzeit der Werkzeuge erhöhte sich im Vergleich zu herkömmlichen Materialien um etwa 15 bis 20 %. Diese Technologie hat in der nordamerikanischen Industrie große Aufmerksamkeit erregt.

Kennzahlen

Zhigang Zak Fang entwickelte in den 2000er Jahren am Powder Research Laboratory der University of Utah ein Aufkohlungs-Wärmebehandlungsverfahren, mit dem eine Gradientenverteilung des Co-Gehalts in WC-Co erreicht und die Härte von HV 1400 auf HV 1600 erhöht wurde. Die Technologie wurde von Kennametal übernommen und in der Produktion eingesetzt. Sein Forschungsschwerpunkt lag auf der Kontrolle der Dicke der Gradientenschicht (0,1–0,5 mm) während des Aufkohlungsprozesses, was er mit Daten unterstützte, die anschließende Optimierung ermöglichen. Hans van den Berg (Widia) aus Deutschland leistete wichtige Beiträge zur Optimierung der Abstimmung von Gradientensubstraten und -beschichtungen. Durch Anpassung der Dicke der CVD-Beschichtung (5–10 µm) und der Grenzflächenbindungskraft der Gradientenschicht konnte die Gesamtleistung des Werkzeugs deutlich verbessert werden. Håkan Engström (Sandvik) aus Schweden leitete die Entwicklung von ultrafeinkörnigem Gradientenhartmetall, optimierte das Pulvermisch- und Sinterverfahren und förderte die industrielle Anwendung dieser Technologie.

Schlüsselprodukte

In den 2000er Jahren führte Sandvik Gradienten-Hartmetall-Schneideinsätze mit Ti(C,N) (z. B. die Serie GC4215) ein, die eine Korngröße von etwa 0,8 µm und eine Härte von HV 1800±50 aufweisen. Sie weisen eine bessere Verschleißfestigkeit und Wärmerissbeständigkeit als herkömmliche homogene Hartmetalle auf und werden häufig beim Schneiden von Schnellarbeitsstahl und rostfreiem Stahl eingesetzt. Kennametal führte Gradienten-Hartmetallwerkzeuge mit Co-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

angereicherten Oberflächenschichten (z. B. die Serie KC7310) ein, bei denen der Co-Gehalt der Oberfläche schrittweise von 10 % auf 5 % variiert, was die Bruchzähigkeit verbessert (K_{Ic} etwa $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und sich für intermittierendes Schneiden und die Verarbeitung schwerer Lasten eignet.

4. Additive Fertigung und moderne Innovation (2010er Jahre bis heute)

Seit den 2010er Jahren hat der Aufstieg der Additiven Fertigung (AM) revolutionäre Veränderungen im Bereich Gradientenhartmetall mit sich gebracht. Fortschrittliche Verfahren wie Laserabscheidung (LD) und selektives Laserschmelzen (SLM) ermöglichen die Herstellung von Zusammensetzungsgradienten durch Mehrfachpulverzufuhr in einem einzigen Fertigungszyklus und überwinden damit die Grenzen der traditionellen Pulvermetallurgie. In dieser Zeit beschränkte sich die Forschung zu Gradientenhartmetall nicht nur auf Schneidwerkzeuge, sondern wurde auch auf die Luft- und Raumfahrt (z. B. Turbinenschaufelformen), medizinische Implantate (z. B. Hüftprothesen) und militärische Bereiche (z. B. Panzerungsmaterialien) ausgeweitet, was sein multifunktionales Potenzial unter Beweis stellt.

Wichtige Ereignisse

Im Jahr 2012 veröffentlichten Zhigang Zak Fang und sein Team einen Artikel in Acta Materialia (Band 75, Seiten 135–144), in dem sie den kinetischen Mechanismus der Herstellung von WC-Co-Gradientenhartmetall durch Aufkohlungswärmebehandlung beschrieben. Die Oberflächenhärte stieg von HV 1052 auf HV 1344, eine Steigerung von etwa 28 %. Der sanfte Übergang der Co-Gradientenschicht (Dicke etwa 0,2 mm) wurde mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) beobachtet. Diese Studie liefert wichtige Daten zur Unterstützung der Industrialisierung von Gradientenhartmetall. Im Jahr 2015 verwendete das Fraunhofer-Institut (Abteilung IKTS) in Deutschland die SLM-Technologie zur Herstellung von WC-Co-Gradiententeilen und zeigte die räumliche Verteilung der Gradientenhärte, die von HV 1400 auf HV 1600 anstieg. Obwohl es Probleme mit Mikrorissen gab, wurde damit der Grundstein für die anschließende Prozessoptimierung gelegt.

Im Jahr 2018 entwickelte das Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in den USA in Zusammenarbeit mit Kennametal einen Prototypen aus Gradientenhartmetall auf Basis des Laser-Pulverbettsschmelzens (LPBF) für den Einsatz in Turbinenschaufelformen für die Luftfahrt. Dadurch konnte die Werkzeuglebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Materialien um etwa 40 % erhöht werden (unter Testbedingungen etwa 5.000 Schlagzyklen). Im Jahr 2020 wurde durch die Untersuchung von Gradienten-Nanostrukturmetallen in Kombination mit Hochentropielegierungen (wie etwa FeCoCrNiMo) eine synergetische Verbesserung von Festigkeit und Duktilität erreicht. Das Experiment wurde in Nature Materials (Band 19, Seiten 1123–1130) veröffentlicht und zeigte, dass die Druckfestigkeit bei 600 °C 504 MPa und die Dehnung 82 % erreichte, was neue Ideen für die Anwendung von Gradientenhartmetall in extremen Umgebungen lieferte.

Im Jahr 2023 brachte China das Gradienten-Hartmetallschneidwerkzeug YG20C auf den Markt, das mithilfe der Laserabscheidungstechnologie die Härte von HV 1500 auf HV 1700 erhöht und die Schneideffizienz um etwa 20 % verbessert (basierend auf Tests nach ISO 3685).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kennzahlen

Igor Konyashin leitete die Optimierungsforschung zu funktionalem Gradientenhartmetall an der Russischen Nationalen Technischen Forschungsuniversität (MISiS), entwickelte die Produktreihe Master Grades® (Härte HV 1700±50) und sein Team optimierte die WC-Co-Gradientenstruktur mittels SLM-Technologie. José L. Garcia untersuchte den Entstehungsmechanismus von Gradientenhartmetall mittels thermodynamischer Modellierung am Spanischen Institut für Nanotechnologie (INA) und schlug ein Optimierungsschema für das Gradientendesign auf Grundlage der CALPHAD-Methode vor. Zhigang Zak Fang förderte weiterhin die Aufkohlungswärmebehandlungstechnologie, die von Sandvik und Kennametal übernommen und in der Produktion eingesetzt wurde. Li Zhang aus China untersuchte an der Tsinghua-Universität Hartmetall mit hohem Entropiegradienten und einer Härte von HV 1900 (basierend auf experimentellen Daten).

Schlüsselprodukte

In den 2010er Jahren brachte Sandvik mehrschichtige Gradienten-Hartmetallbohrer (wie die Coromant-Serie) für die Ölförderung auf den Markt, die eine um etwa 30 % längere Lebensdauer als herkömmliche Bohrer haben (basierend auf API-Standardtests). Im Jahr 2015 brachte Kennametal die Gradienten-Hartmetallwerkzeuge der KCMS-Serie für die Bearbeitung von Flugzeugtriebwerksschaufeln mit einer Härte von HV 1800 auf den Markt. Im Jahr 2023 wurde das Gradienten-Hartmetallschneidwerkzeug YG20C von ZCC in der Automobilindustrie eingesetzt und erhöhte die Schnittgeschwindigkeit um etwa 20 %.

5. Aktueller Stand und Zukunftsaussichten (Ausblick 2025)

Gradientenhartmetall nimmt seit dem 13. Juni 2025 eine wichtige Stellung in der Luft- und Raumfahrt, im Automobilbau, bei medizinischen Implantaten und im Militär ein. Die weit verbreitete Anwendung additiver Fertigungstechnologien hat die Entwicklung maßgeschneiderter Gradientendesigns beschleunigt, und die Erforschung von thermischer Stabilität und Mikromechanismen (wie Versetzungsentwicklung und Phasenwechselverhalten) ist zu den wichtigsten Themen in Wissenschaft und Industrie geworden. Gleichzeitig eröffnet der rasante Fortschritt der künstlichen Intelligenz (KI) neue Chancen und Herausforderungen für die Forschung, Entwicklung und Anwendung von Gradientenhartmetall, insbesondere in der chinesischen Wolframindustrie. Die zukünftige Entwicklung von Gradientenhartmetall zeigt einen Trend zu mehr Diversifizierung und Intelligenz.

KI-gesteuertes Materialdesign

KI-Algorithmen wie maschinelle Lernmodelle und Generative Adversarial Networks (GANs) werden häufig verwendet, um die Beziehung zwischen der Mikrostruktur und der Leistung von Gradientenhartmetallen vorherzusagen. Durch die Analyse zahlreicher experimenteller Daten und Ergebnisse von Finite-Elemente-Simulationen kann KI die Verteilung von Komponenten wie Co und Ti (C, N) optimieren und das beste Gradientenschema für Härte (Zielwert HV 1800±50) und Bruchzähigkeit ($K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) genau vorhersagen, wodurch der traditionelle experimentelle

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zyklus deutlich verkürzt und die F&E-Zeit voraussichtlich um mehr als 50 % gesenkt werden kann. Diese Methode wurde zunächst in den F&E-Prozessen von Unternehmen wie Sandvik und Kennametal erprobt und zeigte eine hohe Effizienz und Zuverlässigkeit. Sandvik beispielsweise verwendete ein KI-Modell, um das Verhältnis der WC-Co-Ti (C, N)-Gradientenstruktur zu optimieren und die Abweichung der Härtegleichmäßigkeit auf weniger als 0,01 mm zu reduzieren.

Intelligente Fertigungsintegration

In Kombination mit dem industriellen Internet der Dinge (IIoT) und der digitalen Zwillingstechnologie wird KI-Technologie in den additiven Fertigungsprozess integriert, um die Pulverzufuhr, die Laserleistung und die Temperaturparameter in Echtzeit zu überwachen und so die Gleichmäßigkeit und Konsistenz der Gradientenschicht sicherzustellen. Das KI-System kann die Parameter im SLM-Prozess basierend auf Echtzeitdaten anpassen, um die geometrische Abweichung der Gradientenschicht auf 0,01 mm genau zu kontrollieren und so die Ausbeute um etwa 10 % zu steigern. Sandvik hat in seiner Smart Factory im schwedischen Sandviken eine ähnliche KI-optimierte Produktionslinie implementiert, um die automatisierte Produktion von Gradienten-Hartmetallwerkzeugen zu erreichen und so die Produktionseffizienz und Produktqualität deutlich zu verbessern. Darüber hinaus entwickelt Kennametal ein KI-basiertes Closed-Loop-Fertigungssystem, das Echtzeit-Feedback zur Schmelzbadtemperatur ($<300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) und zu Spannungsdaten liefert, um die Mikrostruktur der Gradientenschicht zu optimieren.

Adaptive Leistungsoptimierung

KI erfasst während des Schneidvorgangs über eingebettete Sensoren Temperatur- ($<300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), Spannungs- ($<500\text{ MPa}$) und Verschleißdaten und passt die Wärmebehandlungsparameter der Gradientenstruktur dynamisch an (z. B. Glühtemperatur $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Haltezeit 2 Stunden). Diese Anpassungsfähigkeit ermöglicht es Gradientenhartmetall, über einen weiten Temperaturbereich von $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine ausgezeichnete Leistungsstabilität aufrechtzuerhalten, und eignet sich besonders für Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohen Spannungen wie Flugzeugtriebwerksschaufeln, Automobilturbinenkomponenten und Tiefseeausrüstung. Kennametal entwickelt entsprechende Technologien und plant, bis Ende 2025 einen Prototyp eines Gradientenhartmetallwerkzeugs mit adaptiver Leistung auf den Markt zu bringen, mit dem Ziel, bei $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Härte von $\text{HV } 1700 \pm 50$ aufrechtzuerhalten.

Nachhaltigkeit und Umweltschutz

KI optimiert die Nutzungseffizienz von Rohstoffen und reduziert den Einsatz von Edelmetallen wie Co durch Simulationsberechnungen, wodurch der Materialverbrauch voraussichtlich um mehr als 5 % sinken wird. Gleichzeitig erfüllen KI-gesteuerte Produktionsprozesse für Gradientenhartmetall in Kombination mit recycelbaren Materialien (wie recyceltem Wolframpulver) und kohlenstoffarmen Herstellungsverfahren (wie einer Reduzierung des Sinterenergieverbrauchs um 10 %) die globalen grünen Fertigungsstandards bis 2025 (wie die Ökodesign-Richtlinie der EU und den Carbon Peak Action Plan Chinas), reduzieren den CO₂-Fußabdruck und steigern das Potenzial der Branche für nachhaltige Entwicklung. ZCC hat beispielsweise mit einem KI-Pilotprojekt begonnen, um die Produktion von Gradientenhartmetall aus recyceltem Wolframpulver zu optimieren, und es wird erwartet, dass dadurch im Jahr 2025 eine jährliche CO₂-Reduktion von 500

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tonnen erreicht wird.

Chinas Wolframindustrie

Am 3. Januar 2025 veröffentlichte der offizielle WeChat-Account von China Tungsten Online einen Artikel, in dem 2025 offiziell als das erste Jahr der KI für Chinas Wolframindustrie bezeichnet wurde. Diese Initiative markiert einen wichtigen Meilenstein in der intelligenten Transformation der chinesischen Wolframindustrie. China Tungsten Online wies darauf hin, dass KI-Technologie die Hartmetallindustrie durch datengesteuertes Materialdesign und Prozessoptimierung neu gestalten und die Forschung und Entwicklung von Gradientenhartmetallen technisch stark unterstützen wird. KI wurde beispielsweise bereits zur Analyse der Wolframressourcenverteilung und der Verarbeitungsparameter sowie zur Optimierung der Leistung von Gradientenstrukturen eingesetzt und dürfte Chinas Wettbewerbsfähigkeit auf dem globalen Hartmetallmarkt stärken. Darüber hinaus betonte China Tungsten Online, dass das erste Jahr der KI die digitale Integration der vor- und nachgelagerten Bereiche der Wolframindustriekette fördern wird, beispielsweise durch die Echtzeitüberwachung des Sinterprozesses von Gradientenhartmetall durch intelligente Sensoren, wodurch die Fehlerrate um $5\% \pm 1\%$ gesenkt wird.

Fortschrittliches Konzept der intelligenten Fertigung von China Tungsten

Als führendes Unternehmen der chinesischen Wolframindustrie hat China Tungsten Intelligent Manufacturing zwei neue fortschrittliche Konzepte für Hartmetall vorgeschlagen und bereichert damit die Entwicklungsideen im sozialen und technologischen Umfeld der KI weiter. Erstens werden beim Hochentropiekonzept von Hartmetall hochentropische Legierungselemente (wie etwa FeCoCrNiMo) in Gradientenhartmetall eingebracht, um eine mehrphasige Gradientenstruktur zu bilden. Diese Struktur verbessert die thermische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit des Materials durch Erhöhung des Entropiewerts ($>1,5 R$). Versuchsdaten zeigen, dass die Härte HV 1900 ± 50 erreichen kann und die Bruchzähigkeit um etwa $20 \pm 3\%$ verbessert wird, was sich insbesondere für extreme Umgebungen wie die Luft- und Raumfahrt und Tiefseeausrüstung eignet. China Tungsten Intelligent Manufacturing hat versucht, Hartmetall mit einem Hochentropiegradienten zu entwickeln. Zweitens ermöglicht das Konzept der Hartmetall-Chargenherstellung die Leistungsverfolgung und kundenspezifische Produktion jeder einzelnen Hartmetallcharge durch ein KI-gesteuertes digitales Managementsystem. Jede Charge Gradientenhartmetall ist mit einer eindeutigen digitalen Kennung versehen. Das KI-System gewährleistet durch Big-Data-Analyse eine Leistungsabweichung von maximal 0,005 mm und erfüllt so die Anforderungen der High-End-Fertigung an Konsistenz und Rückverfolgbarkeit. Diese Konzepte spiegeln nicht nur Chinas technologische Innovation im Bereich Hartmetall wider, sondern setzen auch neue Maßstäbe für die globale Gradientenhartmetallindustrie.

Die Entwicklungsgeschichte von Gradientenhartmetall hat den Sprung von der theoretischen Erforschung zur industriellen Anwendung miterlebt. Der Fortschritt beruht auf dem koordinierten Vorantreiben von Materialwissenschaft, Verarbeitungstechnologie und Anwendungsanforderungen. Mit Unterstützung des KI-Technologieumfelds, kombiniert mit der AI Year One-Initiative der chinesischen Wolframindustrie und dem innovativen Konzept der intelligenten Wolframfertigung

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

in China, wird erwartet, dass Gradientenhartmetall eine intelligente, maßgeschneiderte und nachhaltige Entwicklung weiter vorantreibt und sich in Zukunft zur Kerntechnologie im Bereich der Werkzeug- und Strukturmaterialien entwickelt. Dadurch wird die effiziente und grüne Transformation der globalen Fertigungsindustrie maßgeblich unterstützt.

Anhang:

Hartmetallkugel

Hartmetallkugeln sind sphärische Hochleistungswerkstoffe mit Hartmetall (z. B. Wolframkarbid WC, Titankarbid TiC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Aufgrund ihrer hervorragenden Härte, Verschleißfestigkeit und Schlagzähigkeit finden Hartmetallkugeln breite Anwendung in der Industrie, im Militär und in der Präzisionsfertigung. Die folgende Einführung basiert auf materialwissenschaftlichen und technischen Grundlagen und behandelt Eigenschaften, Anwendungsszenarien, Materialvergleiche, Herstellungsverfahren und Größenangaben.

1. Eigenschaften von Hartmetallkugeln

Hartmetallkugeln bestehen üblicherweise aus dem WC-Co-System und haben eine Dichte von 14 – 15 g/cm³, eine Härte von HV 1400 – 1800 und eine Bruchzähigkeit (K_{1c}) von 10 – 20 MPa·m^{1/2}, womit sie herkömmliche Stahlkugeln (Dichte 7,75 – 8,05 g/cm³, Härte HV 200 – 400) bei weitem übertreffen. Ihre sphärische Bauweise optimiert Oberflächenkontakt und Spannungsverteilung, ihre Druckfestigkeit kann 3000 – 4000 MPa erreichen und ihre Verschleißfestigkeit ist besser als die von Keramikugeln (<0,01 mm³/m). Durch Präzisionssintern (1400 °C ± 10 °C) oder additive Fertigungstechnologie kann die Korngröße auf 0,5 – 1 µm eingestellt werden, und die Oberflächenrauheit (Ra) beträgt nur 0,01 µm, wodurch hohe Präzisionsanforderungen erfüllt werden. Durch spezielle Formeln (wie WC-TiC-Ni) kann die Dichte auf 12–13 g/cm³ eingestellt werden, wobei sowohl das geringe Gewicht als auch die Leistung berücksichtigt werden.

2. Leistung von Hartmetallkugeln

Hohe Härte und Verschleißfestigkeit

Hartmetallkugeln haben eine extrem hohe Härte (HV 1400–1800), wodurch sie auch bei hoher Reibung (> 10⁴ U/min) oder Dauerbelastung (> 2000 N) eine gute Leistung erbringen. Die Verschleißrate beträgt nur 0,02 mm³/m und ist damit deutlich besser als bei herkömmlichen Stahlkugeln (> 0,1 mm³/m). Sie eignen sich für den Langzeiteinsatz in abrasiven oder schneidenden Umgebungen und widerstehen Oberflächenverschleiß und Materialabplatzungen effektiv.

Ausgezeichnete Schlagfestigkeit

Die Bruchzähigkeit (K_{1c}) liegt zwischen 10 und 20 MPa·m^{1/2}, die Dauerfestigkeit liegt über dem 10⁶-fachen. Es weist eine ausgezeichnete Risswachstumsbeständigkeit auf und hält Stoßbelastungen von bis zu 4000 MPa stand. Es eignet sich besonders für Hochspannungsanwendungen in militärischen Submunitionen oder beim Kugelstrahlen.

Ausgezeichnete thermische Stabilität

Die Leistung ist über einen weiten Temperaturbereich (-50 °C bis 500 °C ± 10 °C) stabil, und der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt nur 6 × 10⁻⁶ /°C und ist damit deutlich niedriger als der von Stahl (12 × 10⁻⁶ /°C). Dies gewährleistet die Konsistenz von Größe und Leistung in Umgebungen mit extrem hohen oder niedrigen Temperaturen und eignet sich daher für raue Bedingungen wie Flugzeugtriebwerke oder Chemiepumpen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hervorragende Gleichmäßigkeit und Präzision

Der Fehler der Kugelsymmetrie wird auf 0,001 mm begrenzt und die Oberflächenrauheit kann 0,01 μm erreichen. Dadurch wird eine extrem hohe geometrische Genauigkeit und Rollkonsistenz erreicht und die Anforderungen von Präzisionsinstrumenten (wie Kugelumlaufspindeln) oder optischen Geräten an Toleranzen im Mikrometerbereich erfüllt.

Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit

Durch eine spezielle Beschichtung (wie TiN) oder Formulierung (wie WC-TiC-Ni) ist es beständig gegen Säure- und Alkalikorrosion (pH 1–14) und die Oberflächenoxidaionsrate beträgt weniger als 0,1 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$, was die Lebensdauer in chemischer Umgebung verlängert und es besonders für Chemiepumpen oder Schiffsausrüstung geeignet macht.

Effiziente Energieübertragung

Das kugelförmige Design optimiert die Spannungsverteilung und weist eine hohe Energieübertragungseffizienz ($> 90 \% \pm 2 \%$) auf. Bei Hochgeschwindigkeitsprojektionen (z. B. 800–1000 m/s) oder beim Aufprall konzentriert es die Energiefreisetzung, um die Durchdringung oder den Verstärkungseffekt zu verbessern.

4. Anwendungsszenarien von Hartmetallkugeln

Lager und Ventile

Hartmetallkugeln mit einem Durchmesser von 0,5–10 mm werden für Hochgeschwindigkeitslager ($> 10^4 \text{ U}/\text{min}$) verwendet, mit einer Verschleißfestigkeit von $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$ und einer Lebensdauer von $> 10^5$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden, geeignet für Flugzeugtriebwerke.

Schleifmittel und Kugelstrahlen

Zum Kugelstrahlen werden Kugeln mit einem Durchmesser von 1–5 mm (Druck 0,2–0,5 MPa) verwendet. Die Oberflächenhärtungsschicht besteht aus 0,1–0,2 mm, wodurch die Lebensdauer von Stahlteilen um $20 \% \pm 3 \%$ verlängert wird.

Präzisionsinstrumente

Für Kugelumlaufspindeln in optischen Instrumenten werden Kugeln mit einem Durchmesser von 0,1–1 mm verwendet, mit einer Toleranz von $< 0,001 \text{ mm}$ und einer Stabilität von $> 99,9 \%$, geeignet für Halbleitergeräte.

Militärische Nutzung

10–50 mm große Kugeln als Submunition oder Splitter (Anfangsgeschwindigkeit 800–1000 m/s), durchdringen leichte Panzerung ($< 50 \text{ mm}$), geeignet für Loitering Munition oder Granaten.

Chemiepumpen

Korrosionsbeständige Hartmetallkugel (WC-TiC-Ni), säure- und laugenbeständig (pH 1–14), Durchflussstabilität $> 95\% \pm 2\%$.

5. Vergleich zwischen Hartmetallkugeln und herkömmlichen Materialien

Material	Dichte (g/cm^3)	Härte (HV)	K _{1c} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Vorteile	Einschränkungen
Hartmetallkugel	14–15	1400–	10–20	Hohe Penetration,	Hohe Kosten und hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Material	Dichte (g/cm³)	Härte (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	Vorteile	Einschränkungen
		1800		Verschleißfestigkeit	Dichte
Stahlkugel	7,75-8,05	200-400	50-100	Geringe Kosten und einfache Verarbeitung	Schwache Penetration
Keramikkugeln (Si ₃ N ₄)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	Leicht und hochtemperaturbeständig	Hohe Sprödigkeit
Glaskugel	2,5-2,6	500-600	0,5-1	niedrige Kosten	Geringe Verschleißfestigkeit

Hartmetallkugeln sind Stahl- und Glaskugeln in Härte und Verschleißfestigkeit überlegen und kommen Keramikkugeln nahe, haben jedoch eine bessere Zähigkeit und eine höhere Dichte als andere Kugeln.

6. Abmessungen und Spezifikationen

Im Folgenden sind gängige Abmessungen von Hartmetallkugeln aufgeführt, die für verschiedene Anwendungsszenarien geeignet sind. Die Daten basieren auf Industriestandards (wie ISO 3290) und dem tatsächlichen Produktionsbedarf:

Durchmesser (mm)	Gewicht (g)	Toleranz (±mm)	Oberflächenrauheit (Ra, µm)	Härte (HV)	Empfohlene Anwendungen
0,1	0,0007	0,0005	0,005	1400-1500	Miniaturlager, Instrumente
0,5	0,0087	0,001	0,01	1450–1550	Präzisions-Kugelumlaufspindel
1.0	0,069	0,001	0,01	1500-1600	Ventile, Kugelstrahlen
5,0	1,72	0,002	0,01	1550–1650	Schleifmittel, Hochgeschwindigkeitslager
10,0	13.8	0,002	0,01	1600-1700	Chemiepumpen, militärische Submunition
20,0	110	0,005	0,015	1650–1750	Splittergefechtskopf, Aufprallteile
50,0	1720	0,01	0,02	1700-1800	Militärische kinetische Projektile, schweres Gerät

Hinweis: Das Gewicht basiert auf einer Dichte von 14,5 g/cm³. Toleranzen und Rauheit können kundenspezifisch angepasst werden (±0,0001 mm). Sonderspezifikationen (z. B. Durchmesser 0,05 mm oder 100 mm) erfordern eine Sonderanfertigung.

7. Herstellungsprozess

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulvermetallurgie

WC-Co-Pulver (90:10) wurde bei 1400 ± 10 °C im Vakuum (10^{-3} Pa) gesintert, Kugeldurchmesser 0,1-50 mm, Härte HV 1500 $\pm$ 30.

Additive Fertigung

Mit der SLM-Technologie können komplexe Kugelformen mit einer Schichtdicke von $50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ und einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm gedruckt werden, was für die individuelle Fertigung kleiner Chargen geeignet ist.

Oberflächenbehandlung

Diamantpoliert auf $Ra < 0,01 \mu\text{m}$, PVD-beschichtetes TiN (5-10 μm), Korrosionsbeständigkeit $< 0,1 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$.

Qualitätskontrolle

Durch Laserscanning werden sphärische Fehler ($< 0,001$ mm) erkannt, und durch Ultraschallprüfungen werden innere Defekte ($< 0,05$ mm) erkannt.

Dank ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften und ihrer breiten Anwendbarkeit sind Hartmetallkugeln zu Schlüsselkomponenten in Industrie und Militär geworden. Ihre vielfältigen Spezifikationen und Herstellungsverfahren bilden eine solide Grundlage für den Einsatz in hochpräzisen und langlebigen Anwendungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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:**Smart Response Carbide**

Smart-Response-Hartmetall ist ein neuartiger Werkstoff, der die Vorteile von hoher Härte, Verschleißfestigkeit und Bruchzähigkeit (K_{1c}) herkömmlicher Hartmetalle vereint und sich gleichzeitig selbst anpasst bzw. auf äußere Einflüsse (wie Temperatur, Druck, Magnetfelder oder chemische Umgebung) reagiert. Kernstück ist der Ersatz von herkömmlichem Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) durch eine intelligente Bindungsphase (wie die Formgedächtnislegierung NiTi, thermosensitive Polymere oder eingebettete reaktionsfähige Nanopartikel), um eine dynamische Leistungsanpassung und Selbstheilungsfunktion zu erreichen. Im Folgenden finden Sie eine umfassende Erläuterung basierend auf Materialwissenschaft, intelligenter Materialtechnologie und technischen Anwendungen, die Eigenschaften, Einflussfaktoren, theoretische Grundlagen, Anwendungsszenarien, Materialvergleiche, Herstellungsverfahren und die zukünftige Entwicklungsrichtung behandelt.

1. Merkmale von Intelligent Response Carbide

Smart-Response-Hartmetall basiert auf Wolframkarbid (WC), Titankarbid (TiC) oder Borkarbid (B_4C) als Hartphase und ist mit einer intelligenten Bindungsphase (wie NiTi, CuAlNi oder graphen-dotierten Nanokompositen) aufgebaut. Der Dichtebereich beträgt $10\text{--}14\text{ g/cm}^3$, kann aber durch poröses Design (Porosität $5\text{--}15\%$) oder leichte Zusatzstoffe (wie Al_2O_3 , SiC) auf $9\text{--}12\text{ g/cm}^3$ optimiert werden. Zu den Smart-Response-Eigenschaften gehören: Selbstanpassung der Härte bei Temperaturschwankungen ($HV\ 1200\text{--}1600$), Verringerung des Reibungskoeffizienten in einem Magnetfeld ($10\% \pm 2\%$) oder Selbstheilung bei Rissen (Erholungsrate $80\% \pm 5\%$). Diese Eigenschaften ermöglichen eine gute Leistung bei dynamischer Belastung und in extremen Umgebungen.

2. Leistungsvorteile**Anpassungsfähigkeit**

Im Temperaturbereich von $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird die Härte basierend auf der Martensit-Austenit-Phasenumwandlung dynamisch angepasst und die Stoßenergieabsorption erreicht $90\% \pm 3\%$, was für Hochtemperaturumgebungen geeignet ist.

Selbstheilung

Eingebettet in SiC- oder Polymer-Mikrokapseln wird der Klebstoff bei Rissausbreitung freigegeben, mit einer K_{1c} -Rückgewinnungsrate von $80\% \pm 5\%$, was die Lebensdauer verlängert.

Vielseitige Reaktion

Unter Magnetfeldern ($>1\text{ T}$) oder pH-Änderungen (4-7) können Oberflächeneigenschaften (wie Schmierfähigkeit oder Korrosionsbeständigkeit) angepasst werden, um sich an komplexe Arbeitsbedingungen anzupassen.

Haltbarkeit

Im Vergleich zu herkömmlichem Hartmetall wird die Verschleißrate aufgrund der dynamischen Pufferwirkung der Smart-Phase um $15\% \pm 2\%$ ($< 0,04\text{ mm}^3/\text{m}$) reduziert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Einflussfaktoren und theoretische Diskussion

Zusammensetzung der Bindungsphase

Bei einem NiTi-Gehalt von $5-15 \% \pm 1 \%$ ist der Formgedächtniseffekt signifikant und $K1c$ steigt um $15 \% \pm 2 \%$ (auf $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Bei einem NiTi-Gehalt von $>20 \% \pm 1 \%$ sinkt die Härte um $10 \% \pm 3 \%$ (auf $\text{HV } 1200 \pm 30$). Die Theorie der martensitischen Umwandlung besagt, dass ein niedriger NiTi-Gehalt die Dehnung optimiert ($<5 \%$), während ein hoher Gehalt zu Korngrenzeninstabilität führt (Korngrenzenenergie $>1 \text{ J/m}^2$).

Porosität

Bei einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ ist die Energieabsorptionsrate hoch ($> 90 \% \pm 2 \%$) und die Selbstreparatureffizienz liegt bei $85 \% \pm 3 \%$. Bei einer Porosität von $> 20 \% \pm 1 \%$ sinkt die Festigkeit um $15 \% \pm 3 \%$ (auf $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). Das Gibson-Ashby-Modell zeigt, dass moderate Porosität Speicherkapazität bietet, während übermäßige Porosität die Tragfähigkeit schwächt, gemäß der Griffith-Risstheorie.

Sintertemperatur

Bei $1300 \text{ }^{\circ}\text{C}-1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die Mikrostruktur stabil und die Reaktionsempfindlichkeit liegt bei $>95 \% \pm 2 \%$; bei $>1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ agglomerieren die Nanopartikel und die Leistung nimmt um $5 \% \pm 1 \%$ ab. Die Kingery-Sintertheorie besagt, dass moderate Temperaturen die Bindung von Phasengrenzflächen fördern, während zu hohe Temperaturen die Diffusion außer Kontrolle geraten lassen (Arrhenius-Gleichung).

Körnung

Der Durchmesser beträgt $0,5-1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, die Reaktionsgeschwindigkeit ist schnell ($<1 \text{ s}$) und $K1c$ erreicht $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$; bei einem Durchmesser von $>2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ verzögert sich die Reaktion um $10 \% \pm 2 \%$. Die Hall-Petch-Beziehung zeigt, dass feine Körner die Grenzflächenreaktion verstärken, während grobe Körner die dynamische Leistung verringern (Orowan-Mechanismus).

Externe Reizintensität

Bei einer Magnetfeldstärke von $1-2 \text{ T}$ oder einer Temperatur von $150 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die Antwortamplitude am größten (Härteänderung $> 200 \text{ HV}$) und basierend auf der Maxwell-Boltzmann-Verteilung ist die Reizintensität exponentiell mit der Phasenänderungsrate verbunden.

4. Anwendungsszenarien

Intelligentes Waffensystem

Die Laufauskleidung verwendet eine NiTi-Bindungsphase, die sich bei hohen Temperaturen ($>200^{\circ}\text{C}$) adaptiv ausdehnt, den Verschleiß reduziert und die Lebensdauer auf $>10^4$ Schuss $\pm 10^3$ Schuss verlängert, geeignet für Maschinengewehre oder Panzerkanonen.

Luft- und Raumfahrttausrüstung

Das Gelenk des Satellitenroboterarms verwendet eine auf Magnetfelder reagierende Struktur mit einer Korngröße von $0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, die $\text{HV } 1500 \pm 30$ und eine Gewichtsreduzierung von 10% bietet und die Schmierfähigkeit unter Vakuum (10^{-6} Pa) aufrechterhält.

Medizinische Geräte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Selbstreparierende Implantate (z. B. Hüftprothesen) mit einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ setzen bei 37°C eine biokompatible Beschichtung frei und weisen eine K1c- Wiederherstellung von $80 \% \pm 5 \%$ auf, wodurch postoperative Komplikationen reduziert werden.

Industrielle Schneidwerkzeuge

Dynamische Härteeinstellung (HV 1200-1600), selbstanpassend bei Schnittlaständerungen, Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$, geeignet für hochpräzise Bearbeitung.

Intelligente Rüstung

Die poröse Struktur ($10 \% \pm 1 \%$) repariert sich bei Stößen selbst und passt ihre Härte an magnetische Felder an, um vor 9-mm-Pistolengeschossen zu schützen. Sie ist 15% leichter als Stahlplatten und kann in kugelsicheren Westen oder Fahrzeugseitenschutzvorrichtungen verwendet werden.

5. Vergleich verschiedener Materialien

Materialtyp	Dichte (g/cm^3)	Härte (HV)	K _{1c} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Intelligente Funktionen	Einschränkung
Smart Response Carbide	10-12	1200-1600	10-20	Adaptiv und selbstheilend	Hohe Dichte, hohe Kosten
Traditionelles Hartmetall	14-15	1400-1800	10-20	keiner	Reagiert nicht und ist schwer
Formgedächtnislegierung (NiTi)	6,4-6,5	300-400	20-40	Formgedächtnis	Geringe Härte, schlechte Verschleißfestigkeit
Intelligente Polymere	1,0-1,5	50-100	1-5	Stresserkennung, Selbstheilung	Schlechte Schutzleistung
Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Thermische Reaktion	Hohe Sprödigkeit, schwierig zu verarbeiten
Intelligentes Metallglas	6,0-7,0	500-1000	30-50	Spannungsmagnetische Reaktion	Schwer zu formen

Hartmetall mit intelligenter Reaktion ist Formgedächtnislegierungen und intelligenten Polymeren in Härte und Zähigkeit überlegen, kommt herkömmlichem Hartmetall nahe, verfügt über Anpassungsfähigkeit, ist Keramik in der Sprödigkeit überlegen und hat das dynamische Reaktionspotenzial von metallischem Glas.

6. Herstellungsprozess

Pulvermetallurgie

WC-Pulver wurde mit NiTi-Pulver (Massenverhältnis 85:15) gemischt und bei $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ im Vakuum (10^{-3} Pa) gesintert, um eine gleichmäßige Mikrostruktur zu bilden.

Additive Fertigung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Um eine komplexe Gradientenstruktur zu erreichen, wurde selektives Laserschmelzen (SLM) mit einer Schichtdicke von $50\ \mu\text{m} \pm 5\ \mu\text{m}$ und einer kontrollierten Porosität von $10\ \% \pm 1\ \%$ verwendet.

Nanokomposit

SiC-Nanopartikel ($<1\ \%$) werden durch mechanisches Legieren eingebettet, um die Selbstheilungsfunktion zu verbessern. Zur Aktivierung ist ein Glühen bei hohen Temperaturen ($1200\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) erforderlich.

7. Entwicklungsrichtung

Multi-Stimulus-Reaktion

Entwicklung von dreifach temperatur-magnetisch-chemisch reagierenden Materialien mit einer auf $8\text{-}10\ \text{g}/\text{cm}^3$ reduzierten Dichte und einem auf über $20\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ erhöhten K_{1c} -Wert auf der Grundlage der Mehrfeldkopplungstheorie.

Nano-Verbesserung

Die Zugabe von Kohlenstoffnanoröhren (CNTs, $<2\ \%$) verbessert die Leitfähigkeit und Zähigkeit bei einer Reaktionsgeschwindigkeit von $<0,5\ \text{s}$, was mit dem quantenmechanischen Schnittstelleneffekt übereinstimmt.

Intelligentes Design

Kombiniert mit KI zur Optimierung der Mikrostruktur, Vorhersage des Phasenwechselpunkts ($\pm 5\ ^\circ\text{C}$) und Anpassung der Sinterparameter durch maschinelles Lernen, wodurch die Kosten um $20\ \% \pm 5\ \%$ gesenkt werden.

Anpassungsfähigkeit an die Umwelt

Untersuchen Sie die Korrosionsbeständigkeitsreaktion (z. B. pH 3–9) und erweitern Sie sie auf Schiffsausrüstung mit einer Lebensdauerverlängerung auf $>10^5$ Stunden $\pm 10^4$ Stunden.

8. Herausforderungen und Perspektiven

Zu den Herausforderungen zählen die hohen Kosten (Produktionskosten $>$ doppelt so hoch wie bei herkömmlichen Legierungen), die Langzeitstabilität (> 5 Jahre Alterungstest) und die Fähigkeit zur Massenproduktion. Die Perspektiven liegen in der integrierten Anwendung von intelligenten Panzerungen, medizinischen Implantaten und industriellen Werkzeugen. Die theoretischen Grundlagen umfassen Phasenwechseldynamik (Langer-Modell), Mikrostrukturoptimierung (Zener-Pinning) und Mehrfeldreaktion (Maxwell-Gleichung), was die praktische Anwendung intelligenter Materialtechnologie fördert.

Intelligentes, reaktionsfähiges Hartmetall mit seinen adaptiven und selbstheilenden Eigenschaften hat neue Anwendungsgebiete in der Waffen-, Luft- und Raumfahrt, Medizin und Industrie erschlossen. Seine Vielseitigkeit und sein theoretischer Innovationsgeist ergänzen sich, und es wird erwartet, dass es sich in Zukunft zum Mainstream intelligenter technischer Werkstoffe entwickeln wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Karbidpanzerung mit geringer Dichte

Die Forschung und Anwendung von Hartmetall mit geringer Dichte als Panzerungsmaterial hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Ziel ist es, die Dichte durch Optimierung der Mikrostruktur von herkömmlichem Hartmetall zu reduzieren und gleichzeitig die hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Schutzleistung zu erhalten, um das Leichtgewicht der Panzerung zu erhöhen. Im Folgenden finden Sie einen Optimierungsüberblick basierend auf vorhandenem Wissen und relevantem technischen Hintergrund, mit neuen theoretischen Diskussionen, Vergleichen verschiedener Panzerungsmaterialien und Anwendungsszenarien für Hartmetallpanzerung mit geringer Dichte.

1. Eigenschaften von Hartmetall mit geringer Dichte

Hartmetall mit geringer Dichte basiert auf Wolframkarbid (WC). Durch die Einführung poröser Strukturen, Gradientendesigns oder die Anpassung des Gehalts an Bindephasen (wie Kobalt Co oder Nickel Ni) wird die Mikrostruktur optimiert, um die Dichte zu reduzieren. Die Dichte von herkömmlichem Hartmetall (wie WC-Co) beträgt etwa 14–15 g/cm³ und ist damit höher als die von Stahl (7,75–8,05 g/cm³). Durch Verfahrensverbesserungen (wie die Erhöhung der Porosität um 10–20 % oder die Zugabe von Leichtzusätzen wie Titan Ti oder Titankarbid TiC) kann die Dichte auf 10–12 g/cm³ gesenkt werden, was deutlich besser ist als bei herkömmlichem Hartmetall, aber immer noch etwas höher als bei Stahl. Das Design mit geringer Dichte zielt darauf ab, das Gewicht pro Flächeneinheit (Flächendichte) zu reduzieren und die Mobilität des Panzersystems zu verbessern, wie etwa die Beschleunigungsleistung und die Geländegängigkeit des Fahrzeugs.

2. Leistungsvorteile

Schutzleistung

K1c 10–20 MPa·m²) panzerbrechenden (AP) und Splitterangriffen wirksam. Die bionische Mikrostruktur (z. B. Porosität 10 % ± 1 %) verbessert die Schlagfestigkeit durch Spannungsverteilung.

Gewichtsoptimierung

Im Vergleich zu herkömmlichem Hartmetall ist die Dichte um etwa 20–30 % reduziert (z. B. von 14 g/cm³ auf 10–12 g/cm³) und dennoch etwas schwerer als Stahl (7,75–8,05 g/cm³). Durch die poröse Konstruktion kann das Flächengewicht jedoch um 15–25 % reduziert werden, was indirekt die Reaktionsgeschwindigkeit auf dem Schlachtfeld verbessert.

Verarbeitbarkeit

µm) durch den Sinterprozess (z. B. 1400 °C ± 10 °C) können komplexe Panzerungskonfigurationen erreicht werden, um unterschiedliche Schutzanforderungen zu erfüllen.

3. Einflussfaktoren und theoretische Diskussion

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosität

Bei einem K_{1c} von $10 \% \pm 1 \%$ ist der K_{1c} hoch ($> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), und die Härte bleibt bei HV 1450 ± 30 ; bei einem K_{1c} von $> 20 \% \pm 1 \%$ sinkt die Härte um $20 \% \pm 3 \%$ (auf HV 1200 ± 30). Nach der Griffith-Risstheorie verteilen mäßige Poren Spannungen und erhöhen

Starke Zähigkeit

Eine zu hohe Porosität erhöht die Rissausbreitungsenergie und verringert die Härte, was mit dem mechanischen Verhalten poröser Materialien im Gibson-Ashby-Modell übereinstimmt.

Co-Gradient

Bei einem Co-Gradienten von $5-15 \% \pm 1 \%$ ist die Spannungsverteilung gut und der K_{1c} -Wert steigt um $10 \% \pm 2 \%$. Bei einem Co-Gradienten von $> 20 \% \pm 1 \%$ steigt die Entmischung um $10 \% \pm 2 \%$. Nach dem zweiten Fickschen Gesetz bildet ein niedriger Co-Gradient ein stabiles Bindungsphasennetzwerk. Ist er zu hoch, verringert sich die Gibbs-Energie, was zur Phasentrennung und einer Erhöhung der Korngrenzenenergie ($> 1 \text{ J/m}^2$) führt.

Öffnung

Bei $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ ist die Energieabsorptionsrate hoch ($> 90 \% \pm 2 \%$); bei einem Durchmesser von $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ verringert sich die Festigkeit um $15 \% \pm 3 \%$ (auf $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). Die Hashin-Shtrikman-Theorie zeigt, dass kleine Poren Spannungen verteilen, während große Poren zu Spannungskonzentrationen führen, was mit der Theorie der maximalen Scherspannung übereinstimmt.

Sintertemperatur

Bei $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ist die Struktur stabil und die Porositätsabweichung beträgt $< 1 \% \pm 0,1 \%$; bei $> 1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ erhöht sich die Abweichung um $5 \% \pm 1 \%$. Das Kingery-Modell zeigt, dass sich bei 1400°C nahe dem Schmelzpunkt von Co eine gleichmäßige Flüssigphase bildet; über 1450°C steigt die Diffusionsrate exponentiell an (Arrhenius-Gleichung) und führt zum Porenkollaps.

Körnung

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, K_{1c} erreicht $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und die Härte beträgt HV 1450 ± 30 ; bei einem Durchmesser von $> 2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ sinkt K_{1c} um $10\% \pm 2\%$. Die Hall-Petch-Beziehung zeigt, dass feine Körner die Korngrenzendichte ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$) erhöhen und so Risse verhindern, während grobe Körner die Barriere verringern (Orowan-Mechanismus).

4. Vergleich verschiedener Panzerungsmaterialien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialtyp	Dichte (g/cm ³)	Härte (HV)	Bruchzähigkeit (K1c, MPa·m ^{1/2})	Gewichtsvorteil	Schutzleistung	Einschränkung
Hartmetall mit geringer Dichte	10-12	1200-1800	10-20	20-30 % leichter als herkömmliches Hartmetall	Hohe Widerstandsfähigkeit gegen panzerbrechende Kugeln und Splitter	Die Dichte ist immer noch höher als bei Stahl und die Kosten sind hoch
Stahl (RHA)	7,75-8,05	200-400	50-100	Basisgewicht	Gut, weit verbreitet	Geringe Härte, leicht zu verformen
Aluminiumlegierung (5083)	2,6-2,8	100-150	20-30	70 % leichter als Stahl	Niedriger, schlechter Schutz gegen panzerbrechende Geschosse	Erfordert Verbundbewehrung
Keramik (B4C)	2,5-2,7	2000-3000	3-5	70 % leichter als Stahl	Extrem hohe Härte, panzerbrechend	Hohe Sprödigkeit, erfordert Stützschiicht
Verbundwerkstoffe (Kevlar)	1,4-1,6	50-100	20-40	80 % leichter als Stahl	Anti-Fragmentierung, gute Flexibilität	Geringe Härte, begrenzte Widerstandsfähigkeit gegen Panzerdurchdringung

Hartmetall mit geringer Dichte ist Stahl und Aluminiumlegierungen in Härte und Zähigkeit überlegen und kommt Keramik nahe, hat aber eine höhere Dichte und muss zur Gewichtoptimierung mit porösen Konstruktionen oder Verbundstrukturen kombiniert werden. Stahl ist kostengünstig, bietet aber nur eingeschränkten Schutz. Aluminiumlegierungen und Keramik eignen sich für leichte Anwendungen, benötigen aber Zusatzmaterialien. Verbundwerkstoffe eignen sich besser für flexiblen Schutz.

5. Anwendungsszenarien

Leicht gepanzerte Fahrzeuge

Beispielsweise kann Hartmetall mit geringer Dichte und einer Dichte von 10–12 g/cm³ in Aufklärungsfahrzeugen oder unbemannten Kampffahrzeugen eine höhere Härte als Stahl bieten (HV 1200 vs. HV 400), das Flächengewicht um 15–25 % reduzieren, die Geschwindigkeit (> 50 km/h) und Geländegängigkeit verbessern und ist für schnelle Einsatzmissionen geeignet.

Lufttransportierbare Ausrüstung

Beispielsweise können die von Hubschraubern getragenen Schutzplatten in Kombination mit einer porösen Struktur (Porosität 10 % ± 1 %) und Gradient Co (5 % – 15 %) das Gewicht um 20 % reduzieren und so die Gewichtsbeschränkung für den Lufttransport (< 5 Tonnen) einhalten, während sie gleichzeitig vor 7,62-mm-AP-Geschossen schützen.

Persönliche Schutzausrüstung

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

Es kann zu einem leichten Brustpanzer verarbeitet werden. Die Struktur mit einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ bietet HV 1450 ± 30 , schützt vor 9-mm-Pistolengeschossen und ist 15 % leichter als Stahlplatten, wodurch es sich für Spezialeinheiten eignet.

Schiffshilfspanzerung

Wird für Seitenschutzvorrichtungen kleiner Schnellboote verwendet. Die stabile Struktur mit einer Sintertemperatur von $1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ widersteht Splintern. Die optimierte Dichte reduziert das Gewicht um 20 % und erhöht die Geschwindigkeit (> 40 Knoten).

6. Einschränkungen und Entwicklungsrichtungen

Obwohl die Dichte ($10\text{--}12 \text{ g/cm}^3$) noch immer höher ist als die von Stahl ($7,75\text{--}8,05 \text{ g/cm}^3$), bietet Hartmetall mit geringer Dichte keinen ausreichenden Schutz gegen panzerbrechende Projektile mit hoher Durchschlagskraft (wie etwa 0,50 Kaliber AP) und muss mit Keramik oder Verbundwerkstoffen kombiniert werden. Der Verarbeitungsaufwand (wie etwa die Kontrolle der Porosität) und die hohen Kosten schränken eine Anwendung im großen Maßstab ein. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt liegt auf TiC-Co-Systemen oder Hochentropielegierungen, mit denen die Dichte auf $8\text{--}10 \text{ g/cm}^3$ und die Härte auf über HV 1000 reduziert werden kann. Additive Fertigungstechniken (wie etwa SLM) ermöglichen eine präzise Steuerung der Mikrostruktur und durch einen Mehrschichtaufbau (Hartmetall + Leichtbauschicht) wird eine höhere Gesamtleistung erwartet.

Hartmetallpanzerung mit geringer Dichte strebt ein Gleichgewicht zwischen hoher Härte und geringem Gewicht an. Ihre theoretischen Grundlagen umfassen Bruchmechanik und Sinterdynamik. Durch Strukturoptimierung und Verbunddesign zeigt sie Potenzial für Leichtbaufahrzeuge, Luftfahrttausrüstung und Personenschutz.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Intelligente Werkzeuge

Intelligente Schneidwerkzeuge sind das innovative Ergebnis der engen Integration moderner Fertigung mit Materialwissenschaft, Sensortechnologie und intelligenter Steuerungstechnik. Es handelt sich um fortschrittliche Schneidwerkzeuge auf Basis von intelligent reagierendem Hartmetall, Keramikmatrix-Verbundwerkstoffen oder Hochleistungsbeschichtungen, die adaptive Schneidleistung, Echtzeitüberwachung und Selbstreparaturfunktionen integrieren. Der Kern besteht in der dynamischen Optimierung, Verschleißerkennung und Schadensbehebung im Schneidprozess durch die Einbettung von Mikrosensoren (wie Dehnungsmessstreifen, Temperatursensoren und Beschleunigungsmessern), reagierenden Beschichtungen (wie thermisch, magnetisch oder chemisch empfindliche Materialien) und intelligenten Bindungsphasen (wie Formgedächtnislegierung NiTi oder Nanokomposite). Diese Art von Werkzeug verfügt nicht nur über die hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Bruchzähigkeit (K_{1c}) von herkömmlichem Hartmetall, sondern kann auch adaptiv auf äußere Bedingungen (wie Schnittlast, Temperatur, Magnetfeld) reagieren, sich nahtlos in CNC-Systeme (CNC) oder Industrie 4.0-Plattformen integrieren und die Bearbeitungseffizienz, Präzision und Werkzeuglebensdauer deutlich verbessern. Es folgt eine umfassende Diskussion auf Grundlage der Materialwissenschaft, intelligenter Fertigungstechnologie und des technischen Anwendungshintergrunds, die Eigenschaften, Einflussfaktoren, theoretische Grundlagen, Anwendungsszenarien, Materialvergleich, Herstellungsprozess, Entwicklungsrichtung sowie Herausforderungen und Perspektiven abdeckt.

1. Funktionen intelligenter Tools

Intelligente Werkzeuge basieren auf Hartmetall (wie WC-NiTi oder WC-TiC-NiTi-Verbundwerkstoffen) oder Keramikverbundwerkstoffen (wie Al_2O_3 -TiC) mit einer Dichte von 10–14 g/cm³. Durch die Einführung poröser Strukturen (Porosität 5–15 %) oder leichter Additive (wie TiC, Al_2O_3) kann die Dichte unter Berücksichtigung von Leichtigkeit und Festigkeit auf 9–12 g/cm³ optimiert werden. Zu den intelligenten Funktionen gehören:

Adaptives Schneiden

Bei Schnittgeschwindigkeiten von 500–2000 m/min wird die Härte dynamisch angepasst (HV 1200–1800), Vibrationen durch Phasenänderung oder Beschichtungsreaktion reduziert (<0,05 mm) und die Oberflächenrauheit optimiert (R_a <0,02 μ m).

Echtzeitüberwachung

Eingebaute Mikrosensoren erfassen Temperatur (<300 °C $\pm$ 5 °C), Spannung (<500 MPa $\pm$ 10 MPa), Vibration (<0,1 g) und Verschleißtiefe ($\pm$ 0,01 mm) in Echtzeit und die Daten werden per Funkübertragung (Verzögerung <0,1 s) an das CNC-System zurückgemeldet.

Selbstheilung

Eingebettete SiC-Nanopartikel oder mikroverkapselte Polymere lösen den Klebstoff bei der Entstehung von Mikrorissen (<0,1 mm) mit einer K_{1c} -Rückgewinnungsrate von 80 % $\pm$ 5 %, wodurch die Lebensdauer deutlich verlängert wird.

Vielseitigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unter Magnetfeldern ($> 1 \text{ T}$) oder pH-Änderungen (4–7) verringert sich der Oberflächenreibungskoeffizient um $10\% \pm 2\%$ bzw. die Korrosionsbeständigkeit erhöht sich um $15\% \pm 3\%$, wodurch eine Anpassung an unterschiedliche Verarbeitungsumgebungen möglich wird. Diese Eigenschaften ermöglichen es intelligenten Werkzeugen, unter extremen Arbeitsbedingungen mit hoher Präzision und Effizienz hervorragende Leistungen zu erbringen und sie sind besonders geeignet für die Anforderungen der modernen Fertigungsindustrie an Intelligenz und Nachhaltigkeit.

2. Leistungsvorteile

Adaptives Schneiden

Durch Phasenumwandlung der Bindungsphase (wie etwa Martensit-Austenit-Umwandlung von NiTi) oder Anpassung der Wärmeausdehnung der Beschichtung optimiert das Werkzeug die Schnittparameter selbst, wenn sich die Schnittlast ändert, reduziert die dynamische Spannung zwischen Werkzeug und Werkstück ($< 100 \text{ MPa}$), verbessert die Schnitteffizienz um $15\% \pm 2\%$ und verbessert die Oberflächenqualität um $20\% \pm 3\%$ (R_a sinkt von $0,1 \mu\text{m}$ auf $0,02 \mu\text{m}$).

Echtzeitüberwachung

Das Sensornetzwerk bietet mehrdimensionale Datenunterstützung, Temperaturüberwachung zur Vermeidung thermischer Schäden (Warnung bei $> 300^\circ\text{C}$), Spannungsüberwachung zur Optimierung der Vorschubgeschwindigkeit ($< 0,1 \text{ mm/U}$), Verschleißüberwachung zur Vorhersage der Lebensdauer (Fehler $< 5\%$) und zur Erzielung einer vorausschauenden Wartung.

Selbstheilung

Nanofüllstoffe (z. B. SiC, Partikelgröße $< 50 \text{ nm}$) oder Mikrokapseln ($5\text{--}10 \mu\text{m}$ Durchmesser) werden bei Rissausbreitung aktiviert und setzen Epoxid- oder Metallkleber frei, was zu einer Reparaturrate von $80\% \pm 5\%$ und einer Lebensdauerverlängerung von $20\% \pm 3\%$ ($> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) führt.

Haltbarkeit

Im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugen ist die Verschleißrate um $20\% \pm 2\%$ ($< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m}$) reduziert und die Oxidationsbeständigkeit um $10\% \pm 2\%$ ($< 0,1 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$) verbessert, was für hohe Belastungen (wie z. B. das Schneiden von Titanlegierungen in der Luftfahrt) und Hochtemperaturumgebungen geeignet ist.

3. Einflussfaktoren

Zusammensetzung der Bindungsphase

Bei einem NiTi-Gehalt von $5\text{--}15\% \pm 1\%$ ist die Schneidfähigkeit hoch, der K_{1c} -Wert steigt um $15\% \pm 2\%$ (auf $18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^2 \pm 0,5$) und die Härte ist stabil bei $\text{HV } 1500 \pm 30$; bei einem NiTi-Gehalt von $> 20\% \pm 1\%$ sinkt die Härte um $10\% \pm 3\%$ (auf $\text{HV } 1200 \pm 30$), und die Korngrenze ist instabil. Die Theorie der martensitischen Phasenumwandlung zeigt, dass ein niedriger NiTi-Gehalt die Dehnung optimiert ($< 5\%$), während ein hoher Gehalt die Korngrenzenenergie erhöht ($> 1 \text{ J/m}^2$), gemäß dem Prinzip der Minimierung der Gibbs-Freien Energie.

Porosität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei einer Porosität von $10 \% \pm 1 \%$ ist die Energieabsorptionsrate hoch ($> 90 \% \pm 2 \%$), die Selbstreparatureffizienz liegt bei $85 \% \pm 3 \%$ und die Schnittstabilität ist verbessert. Bei einer Porosität von $> 20 \% \pm 1 \%$ sinkt die Festigkeit um $15 \% \pm 3 \%$ (auf $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). Das Gibson-Ashby-Modell zeigt, dass moderate Porosität Spannungen verteilt, während übermäßige Porosität die Struktur schwächt. Die Griffith-Risstheorie unterstützt die Erhöhung der Rissausbreitungsenergie.

Sintertemperatur

Bei $1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die Mikrostruktur stabil, die Ansprechempfindlichkeit liegt bei $>95 \% \pm 2 \%$ und die Beschichtungshaftung bei $>50 \text{ N/mm}^2$; bei $>1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sinkt die Leistung um $5 \% \pm 1 \%$. Die Kingery-Sintertheorie zeigt, dass moderate Temperaturen die Phasengrenzflächenbindung fördern, und die Arrhenius-Gleichung erklärt die unkontrollierte Diffusion bei zu hohen Temperaturen.

Körnung

Der Durchmesser beträgt $0,5\text{--}1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$, die Schnittgenauigkeit ist hoch (Toleranz $< 0,005 \text{ mm}$), K_{1C} erreicht $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ und die Verschleißrate beträgt $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{m}$; bei einem Durchmesser von $> 2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ erhöht sich die Verschleißrate um $10 \% \pm 2 \%$. Die Hall-Petch-Beziehung zeigt, dass feine Körner die Verschleißfestigkeit erhöhen, und der Orowan-Mechanismus erklärt die Leistungsminderung grober Körner.

Schichtdicke

Bei einer Dicke von $5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt die thermische Reaktionseffizienz $> 90 \% \pm 2 \%$, und der Reibungskoeffizient verringert sich um $10 \% \pm 2 \%$. Bei einer Dicke von $> 15 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ verringert sich die Haftung um $10 \% \pm 2 \%$. Die Adhäsionstheorie besagt, dass eine mittlere Dicke die Grenzflächenhaftung optimiert, während eine übermäßige Dicke zur Ansammlung von Eigenspannungen ($> 200 \text{ MPa}$) führt.

Sensorempfindlichkeit

Dehnungsempfindlichkeit $> 100 \text{ }\mu\epsilon$, Temperaturauflösung $< 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, basierend auf dem piezoelektrischen Effekt und dem thermoelektrischen Effekt, wodurch Datengenauigkeit gewährleistet wird.

4. Anwendungsszenarien

Luftfahrtfertigung

Verarbeitung von Turbinenschaufeln aus Titanlegierungen (wie Ti-6Al-4V), Selbsteinstellung der Härte ($\text{HV } 1500 \pm 30$), Temperaturüberwachung $< 250^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}$, Reduzierung der Ausschussrate um $10 \% \pm 2 \%$, geeignet für die komplexe Oberflächenbearbeitung.

Automobilindustrie

Schneiden von Aluminium-Karosserieteilen (6061) mit integriertem Dehnungssensor zur Erkennung von Belastungen $< 400 \text{ MPa}$, dynamische Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit ($0,05\text{--}0,2 \text{ mm/U}$), Verbesserung der Effizienz um $15 \% \pm 2 \%$, Erfüllung der Anforderungen der Massenproduktion.

Formenbau

Durch die Verarbeitung von hochhartem Stahl (H13, $\text{HV } 500 \pm 20$) werden Mikrorisse ($< 0,05 \text{ mm}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch die selbstreparierende Beschichtung repariert, die Lebensdauer beträgt bis zu 10^4 Stunden $\pm 10^3$ Stunden, wodurch die Austauschhäufigkeit um 20 ± 3 % reduziert und die Wartungskosten gesenkt werden.

Elektronikindustrie

Präzisionsbearbeitung von Silizium-Wafern (Dicke $< 0,5$ mm), Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, glatte Schnittoberfläche ($R_a < 0,02 \mu\text{m}$), Echtzeit-Datenfeedback zur Prozessoptimierung, geeignet für mikroelektronische Komponenten und Chipherstellung.

Energieausrüstung

Stanzen von Windturbinenblättern, hohe Temperaturbeständigkeit (< 300 °C), adaptive Härte, reduziertes Risiko thermischer Risse ($< 0,1$ mm), geeignet für extreme Umgebungen und Anforderungen an eine lange Lebensdauer.

Schiffbauindustrie

Propeller aus verarbeitetem Edelstahl, die Reaktion auf magnetische Felder verringert die Reibung ($< 0,1$), die Korrosionsbeständigkeit ist um 15 ± 3 % verbessert und ist für Meeresumgebungen mit hohem Salzgehalt geeignet.

5. Vergleich verschiedener Materialien

Materialtyp	Dichte (g/cm ³)	Härte (HV)	K1c K _{1c} K1c (MPa·m ^{1/2})	Intelligente Funktionen	Einschränkung
Smart Response Carbide	10-12	1200-1800	10-20	Selbstanpassung, Überwachung und Selbstreparatur	Hohe Dichte, hohe Kosten
Traditionelles Hartmetall	14-15	1400-1800	10-20	keiner	Nicht reagierend, begrenzte Lebensdauer
Keramikbeschichtete Schneidwerkzeuge	2,5-3,0	2000-3000	3-5	Thermische Reaktion	Hohe Sprödigkeit, leicht zu brechen
Hartmetallbeschichtung (PVD)	6,0-7,0	1500-2500	5-10	Verschleißfest	Keine Anpassungsfähigkeit, kurze Lebensdauer
Intelligente Polymerverbundstoffe	1,0-1,5	50-100	1-5	Stresssensorik	Geringe Härte, nicht beständig gegen hohe Temperaturen
Nanobeschichtete Schneidwerkzeuge	5,0-6,0	1000-1500	10-15	Selbstschmierend	Schlechte Hochtemperaturbeständigkeit

Smart Response-Hartmetall ist Keramikbeschichtungen und Polymerverbundstoffen in Härte und Zähigkeit überlegen, kommt herkömmlichem Hartmetall nahe, verfügt über adaptive und überwachende Funktionen, übertrifft die Lebensdauer von Hartmetallbeschichtungen und hat das Schmierpotenzial von Nanobeschichtungen.

6. Herstellungsprozess

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

Pulvermetallurgie

WC-Pulver und NiTi-Pulver (85:15) wurden gemischt und bei 1400 ± 10 °C im Vakuum (10^{-3} Pa) gesintert, wobei die Porosität auf 10 ± 1 % kontrolliert wurde, um eine gleichmäßige Mikrostruktur mit einer Härte von HV 1500 ± 30 zu bilden.

Additive Fertigung

Selektives Laserschmelzen (SLM) mit Schichtdicken von $50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$, eingebettete Sensoren ($< 1 \text{ mm}^3$), Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mm}$, geeignet für komplexe Geometrien.

Oberflächenbehandlung

PVD-abgeschiedene TiAlN- oder CrN-Beschichtung ($5\text{--}10 \mu\text{m}$), Hochtemperaturglühen (1000 °C ± 10 °C) aktiviert die Reaktionsfähigkeit, die Haftung $> 50 \text{ N/mm}^2$ und die Verschleißfestigkeit wird um 20 ± 2 % verbessert.

Sensorintegration

Miniatur-Dehnungsmessstreifen (Empfindlichkeit $> 100 \mu\epsilon$) und Thermoelemente (Auflösung $< 1^\circ\text{C}$) werden durch Laserschweißen eingebettet, mit einer Signalübertragungsrate von $> 100 \text{ Hz}$, kompatibel mit dem industriellen Internet der Dinge.

Nachbearbeitung

Durch Plasmapolieren werden Oberflächendefekte ($R_a < 0,01 \mu\text{m}$) entfernt und die Festigkeit der Grenzflächenbindung zwischen Beschichtung und Substrat ($> 60 \text{ N/mm}^2$) erhöht.

7. Entwicklungsrichtung

Multisensorfusion

Integrieren Sie Temperatur-, Vibrations-, Verschleiß- und Schallemissionssensoren, um ein digitales Zwillingmodell zu erstellen, die Lebensdauer vorherzusagen (Fehler < 3 %), die Schnittparameter basierend auf Deep Learning zu optimieren und den Energieverbrauch um 10 ± 2 % zu senken.

Adaptive Beschichtung

Es wurde eine dreifach temperatur-magnetisch-chemisch reagierende Beschichtung mit einem auf HV $1000\text{--}2000$ erweiterten Härtebereich und einer Reaktionszeit von $< 0,5 \text{ s}$ entwickelt, die der Maxwell-Boltzmann-Verteilung und der elektrochemischen Reaktionskinetik entspricht.

Nano-Verbesserung

Durch die Zugabe von Kohlenstoffnanoröhren (CNTs, < 2 %) oder Graphen (< 1 %) werden die Wärmeleitfähigkeit ($> 200 \text{ W/mK}$) und die Zähigkeit verbessert, wobei sich K_{IC} auf $20 \text{ MPam}^{1/2} \pm 0,5$ erhöht, basierend auf Quantengrenzflächeneffekten und der Theorie der Nanokomposit-Verstärkung.

Intelligente Steuerung

Durch die Integration von 5G und Edge Computing kann es Echtzeit-Feedback zu Schnittdaten liefern (Verzögerung $< 0,05 \text{ s}$), sich an die flexible Fertigung anpassen und Verarbeitungsfehler auf $\pm 0,005 \text{ mm}$ reduzieren.

Nachhaltiges Design

Entwickeln Sie recycelbare Beschichtungen, um den Materialabfall im Einklang mit den Standards

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

für umweltfreundliche Fertigung um $10\% \pm 2\%$ zu reduzieren.

8. Herausforderungen und Perspektiven

Zu den Herausforderungen zählen die hohen Produktionskosten ($> 3\text{--}4$ Mal so hoch wie bei herkömmlichen Werkzeugen), die Zuverlässigkeit der Sensoren bei hohen Temperaturen ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) ($> 10^5$ Zyklen) und die Langzeitstabilität unter komplexen Betriebsbedingungen (> 5 Jahre). Die Zukunft liegt in der umfassenden Anwendung intelligenter Fertigungsverfahren, deren theoretische Grundlagen Phasenwechseldynamik (Langer-Modell), Mikrostrukturoptimierung (Zener-Pinning), Sensortechnologie (Piezoelektrischer Effekt), Mehrfeldkopplung (Maxwell-Gleichungen) und Nanokomposit-Materialtheorie (Halpin-Tsai-Modell) umfassen. Intelligente Werkzeuge werden die Entwicklung der Luftfahrt-, Automobil-, Elektronik- und Energieverarbeitung hin zu effizienter, präziser und nachhaltiger Entwicklung vorantreiben und zu einem Kernbestandteil der Industrie 4.0 werden.

Intelligente Werkzeuge haben die moderne Verarbeitungstechnologie mit ihren adaptiven Schneid-, Echtzeitüberwachungs- und Selbstheilungsfunktionen revolutioniert. Ihre Vielseitigkeit und ihre theoretische Innovation ergänzen sich gegenseitig und werden voraussichtlich in Zukunft die globale Fertigungsindustrie dominieren.

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

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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:

Hartmetall-EDM-Elektrode

Hartmetall-Elektroden für die Funkenerosion (EDM) bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85–92 Gew.-%), kombiniert mit Co (610 Gew.-%) oder Ni (612 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie zeichnen sich durch hohe Härte (1600–2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), hohe Temperaturbeständigkeit ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig), hohe Leitfähigkeit ($>90 \text{ } \%$ IACS, IEC 6051221) und Lichtbogenerosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$, IEC 60850) aus. Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (wie TiN, ZrN, $13 \text{ } \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,2$) oder einer Funktionsbeschichtung (Cu, Ag, $0,52 \text{ } \mu\text{m}$, Leitfähigkeit $>95 \text{ } \%$ IACS) versehen, um die Lichtbogenerosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und elektrischen Eigenschaften zu verbessern. Die Elektroden werden für die Präzisions-EDM-Bearbeitung (wie Turbinenschaufeln, Mikroporen, komplexe Hohlräume) in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Formenbau, Automobil und Medizin sowie für die Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie Titanlegierungen, Formstähle, $400 - 600 \text{ HV}$) verwendet und bieten hohe Präzision (Abweichung $<\pm 0,005 \text{ mm}$), geringen Elektrodenverlust ($<0,5 \text{ } \%$) und hohe Oberflächenqualität ($\text{Ra } 0,10,3 \text{ } \mu\text{m}$).

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60850, ISO 9001) bietet dieser Artikel Technologie, Leistung, Anwendung und Optimierungsvorschläge für Hartmetall-EDM-Elektroden.

Eigenschaften von Hartmetall-EDM-Elektroden

1.1 Zusammensetzung von Hartmetall-EDM-Elektrodenmaterialien

Matrix

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($\text{D}_{50} 0,1 - 0,4 \text{ } \mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), Lichtbogenerosionsbeständigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 6 – 12 Gew. % (optional), Korrosionsbeständigkeit (Elektrolyt $<0,01 \text{ mm/a}$), Leitfähigkeit um 5 % erhöht.

Zusatzstoffe: TaC (0,10,3 Gew.-%), antioxidative Kapazität um 10 % erhöht; ZrC (0,20,5 Gew.-%), Verschleißfestigkeit um 5 % erhöht.

Beschichtung

TiN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 800°C , Lichtbogenerosionsbeständigkeit.

ZrN (PVD): Härte 2200 – 2600 HV, korrosionsbeständig, Antihaftwirkung um 15 % erhöht.

Cu/Ag (PVD): Leitfähigkeit $>95 \%$ IACS, Temperaturbeständigkeit 600°C , Lichtbogenstabilität um 20% erhöht.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gew. %), 20 % höhere Verschleißfestigkeit, 15 % höhere Rissbeständigkeit.

1.2 Leistungsparameter von Hartmetall-EDM-Elektroden

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 10 - 15 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: Elektrolyt (pH 410), <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >1000°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).

Lichtbogenabbrandfestigkeit: Verlust <0,01 mm³/min (IEC 60850).

Elektrische Leitfähigkeit: >90 % IACS (Cu/Ag-Beschichtung, IEC 6051221).

Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 µm, Bearbeitungsgenauigkeit um 15 % erhöht.

Elektrodenverlust: <0,5 % (Verarbeitung von Formstahl, Pulsbreite 50100 µs).

1.3 Vorteile von Hartmetall-EDM-Elektroden

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, Verlust <0,5 %, 35-fach verlängerte Lebensdauer.

Lichtbogenabbrandfestigkeit: TiN/ZrN-Beschichtung, Abbrandrate <0,01 mm³/min, besser als Kupferelektroden.

Hohe Leitfähigkeit: Cu/Ag-Beschichtung, Leitfähigkeit > 95 % IACS, Verarbeitungseffizienz um 20 % erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-Basis + ZrN, beständig gegen Elektrolytkorrosion, geeignet für die Langzeitverarbeitung.

Hohe Präzision: geringer Verlust + Präzisionsbearbeitung, Abweichung <±0,005 mm, Oberfläche Ra 0,1 – 0,3 µm.

2. EDM-Herstellungsprozess für Hartmetallelektroden

2.1 Herstellung von Hartmetall-EDM-Pulver

Rohstoffe: WC (D50 0,1 - 0,4 µm, Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 µm), TaC / ZrC (D50 0,51 µm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,03 µm, Gleichmäßigkeit >99 %.

2.2 Herstellung von Hartmetallelektroden durch Funkenerosion

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkokille (Abweichung < ± 0,02 mm), Knüppeldichte 8.510,0 g/cm³.

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

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,03$ mm, Rissrate $< 0,3$ %.

2.3 Sintern von Hartmetall-EDM-Elektroden

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Ergebnisse: Dichte 14,8 – 15,0 g/cm³, Porosität $< 0,0003$ %, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung von Hartmetall-EDM-Elektroden

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,05 – 0,2 µm .

EDM: Elektrofunkensbearbeitung, Mikrorille/-loch (Ø 0,1–0,5 mm), Abweichung $\leq \pm 0,003$ mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 µm), 1200 U/min, Ra $< 0,05$ µm, Lichtbogenstabilität um 10 % erhöht.

2.5 Hartmetall-Elektrodenbeschichtung für EDM

Methode: PVD/CVD (Ti/Zr/Cu/Ag-Target, $> 99,99$ %).

Parameter: TiN / ZrN /Cu/Ag (13 µm), 10^{-5} Pa, 200 – 400 °C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,51 µm /h.

Ergebnisse: Haftung > 80 N, Reibungskoeffizient $< 0,2$, Leitfähigkeit > 95 % IACS.

2.6 Prüfung von Hartmetall-EDM-Elektroden

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korn grenzenspannung $< 2\%$).

Leistung: Härteabweichung $\leq \pm 30$ HV (ISO 6508), Verschleiß $< 0,02$ mm³ / h, Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/a).

Geometrie: KMG (Abweichung $\leq \pm 0,003$ mm), Laserscanning (Schlitzabweichung $\leq \pm 0,002$ mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte $< 0,005$ mm), Ultraschall (Risse $< 0,003$ mm).

Elektrische Eigenschaften: Leitfähigkeit $> 90\%$ IACS, Lichtbogenerosionsrate $< 0,01$ mm³/min (IEC 60850).

Verarbeitungstest: Elektrodenverlust $< 0,5$ %, Verarbeitungsabweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Oberfläche Ra 0,10,3 µm.

Anwendungsszenarien von Hartmetall-EDM-Elektroden

Hartmetall-EDM-Elektroden liefern Prozess-, Prüf- und Auswahlvorschläge für hohe Präzision, hohe Effizienz und komplexe Bearbeitungsanforderungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Bearbeitung von Turbinenschaufeln für die Luftfahrt

Arbeitsbedingungen: Formstahl (H13, 500 HV), Elektrolyt (pH 7), Pulsbreite 50 μ s, Stromstärke 20 A.

Design

Typ: Komplex gebogene Elektrode (50×30×10 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, TaC 0,3 Gew. %), Härte 1900 HV.

Beschichtung: TiN (2 μ m, PVD, Härte 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 800°C).

Geometrie: Oberflächenabweichung $<\pm 0,003$ mm, Ra $<0,1$ μ m.

Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiN (300 °C).

Parameter: Bearbeitungstiefe 5 mm, Pulsbreite 50 μ s, Strom 20 A, Bearbeitungszeit 2 Stunden.

prüfen:

Elektrodenverlust: $<0,4$ % (Kupferelektrode 2 %, 5-fache Reduzierung).

Bearbeitungsgenauigkeit: Abweichung $<\pm 0,005$ mm, Ra 0,2 μ m.

Anti-Lichtbogenerosion: Verlust $<0,01$ mm³/min, Lebenserwartung um das 4-fache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: 100 Stunden im Elektrolyt, $<0,01$ mm/Jahr.

Auswahl: WCCo+TiN, geeignet für komplexe Oberflächen mit hoher Härte, regelmäßiges Polieren.

Vorteile: geringer Verlust, hohe Präzision, um 20 % gesteigerte Verarbeitungseffizienz.

3.2 Mikrolochbearbeitung in der Form

Arbeitsbedingungen: Titanlegierung (Ti6Al4V, 350 HV), Elektrolyt (pH 6), Pulsbreite 30 μ s, Stromstärke 10 A.

Design

Typ: Mikroporenelektrode ($\varnothing$ 0,5 mm, Länge 10 mm).

Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μ m, ZrC 0,5 Gew. %), Härte 1700 HV.

Beschichtung: ZrN (1,5 μ m, PVD, Härte 2600 HV, antihafbeschichtet).

Geometrie: Blendenabweichung $<\pm 0,002$ mm, Ra $<0,05$ μ m.

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), EDM-Finish, PVD ZrN (250 °C).

Parameter: Lochtiefe 5 mm, Pulsbreite 30 μ s, Strom 10 A, Bearbeitungszeit 1 Stunde.

prüfen:

Elektrodenverlust: $<0,3$ % (1,5 % bei Kupferelektrode, 5-mal niedriger).

Bearbeitungsgenauigkeit: Abweichung $<\pm 0,003$ mm, Ra 0,1 μ m.

Anti-Lichtbogenerosion: Verlust $<0,008$ mm³/min, Lebensdauer um das Fünffache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: 200 Stunden im Elektrolyt, $<0,01$ mm/Jahr.

Auswahl: WCNi+ZrN, geeignet für die Mikrolochbearbeitung, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Hochpräzise Antihafwirkung, Mikroporenqualität um 15 % verbessert.

3.3 Medizinische Implantatkavitätenaufbereitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Arbeitsbedingungen: CoCr-Legierung (500 HV), Elektrolyt (pH 8), Pulsbreite 100 μ s, Stromstärke 15 A.

Design

Typ: Hohlraumelektrode (20×10×5 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m , TaC 0,3 Gew. %), Härte 1800 HV.

Beschichtung: Cu (1 μ m, PVD, Leitfähigkeit >95 % IACS).

Geometrie: Hohlraumabweichung $\leq \pm 0,004$ mm, Ra <0,1 μ m.

Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD Cu (200 °C).

Parameter: Kavitätstiefe 3 mm, Impulsbreite 100 μ s, Strom 15 A, Verarbeitungszeit 3 Stunden.

prüfen:

Elektrodenverlust: <0,5 % (Kupferelektrode 2,5 %, 5-fache Reduzierung).

Bearbeitungsgenauigkeit: Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,3 μ m .

Anti-Lichtbogenerosion: Verlust <0,01 mm³/min, Lebensdauer um das Dreifache erhöht.

Leitfähigkeit: >95 % IACS, Verarbeitungseffizienz um 20 % erhöht.

Auswahl: WCCo+Cu, geeignet für Hohlräume mit hoher Leitfähigkeit, regelmäßiges Polieren.

Vorteile: Hoher Wirkungsgrad, geringer Verlust, um 10 % verbesserte Hohlraumqualität.

Leistungsvergleich von Hartmetall-EDM-Elektroden

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Kupferelektrode	Graphitelektrode
Härte (HV)	1600 - 2000	50 - 100	50 - 80
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,02 - 0,05
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	12
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,02	0,51,0	0,30,6
Abbrandfestigkeit (mm ³ /min)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Elektrische Leitfähigkeit (% IACS)	>90	>95	10 - 20
Elektrodenverlust (%)	<0,5	1,5 - 2,5	1,0 - 2,0
Bearbeitungsgenauigkeit (mm)	$\leq \pm 0,005$	$\pm 0,01$ bis 0,02	$\pm 0,008$ bis 0,015
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Kupfer)	35	1	1,52

Highlights der Hartmetall-EDM-Elektrode:

Geringer Verlust: WC-Substrat, Verlust <0,5 %, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.

Abbrandfestigkeit: TiN/ZrN-Beschichtung, Abbrandrate <0,01 mm³/min, besser als Kupfer.

Hohe Leitfähigkeit: Cu/Ag-Beschichtung, Leitfähigkeit >95 % IACS, hohe Effizienz.

Hohe Präzision: Präzisionsbearbeitung, Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,10,3 μ m.

Empfehlungen zur Optimierung des EDM mit Hartmetallelektroden

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

Materialauswahl:

Turbinenschaufeln: WC8%Co+TiN, Lichtbogenerosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

Mikrolochverarbeitung: WC10 % Ni + ZrN, Antihafteffekt um 20 % erhöht.

Hohlraumverarbeitung: WC8%Co+Cu, Leitfähigkeit um 10 % erhöht.

Zusätze: TaC 0,3 Gew.-%, ZrC 0,5 Gew.-%, Verschleißfestigkeit um 5 % erhöht.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 µm), Abweichung <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

Beschichtung:

TiN (2 µm, PVD), Lichtbogenerosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

ZrN (1,5 µm, PVD), Antihafteffekt um 15 % erhöht.

Cu (1 µm, PVD), Leitfähigkeit um 10 % erhöht.

EDM-Finishing: Schlitzabweichung <±0,002 mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±1°C, 10^{-6} Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,003 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 0,51 µm/h, Abweichung <±0,03 µm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Turbinenschaufeln: WCCo+TiN, Formstahl, Pulsbreite 50 µs, Strom 20 A.

Mikrolochbearbeitung: WCNi+ZrN, Titanlegierung, Pulsbreite 30 µs, Stromstärke 10 A.

Hohlraumbearbeitung: WCCo+Cu, CoCr-Legierung, Pulsbreite 100 µs, Stromstärke 15 A.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngranzenspannung <2%).

Leistung: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr),

Lichtbogenerosionsbeständigkeit (<0,01 mm³/min).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Elektrische Eigenschaften: Leitfähigkeit > 90 % IACS, Elektrodenverlust < 0,5 % (IEC 60850).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung <±0,1 g/cm³.

GB/T 38512015: Festigkeit 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 16002000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate <0,02 mm³/h.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

IEC 60850: Lichtbogenerosionstest.

ISO 9001: Qualitätsmanagement.

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

Durch Optimierung von WC mit ultrafeiner Körnung (0,10,4 μm), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew. %) und PVD/CVD-Beschichtung (TiN/ZrN/Cu, 13 μm) erreichen Hartmetall-EDM-Elektroden eine hohe Härte (1600–2000 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), Lichtbogenerosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$), hohe Leitfähigkeit ($>90 \%$ IACS) und hohe Präzision (Abweichung $<\pm 0,005 \text{ mm}$). Die Elektroden eignen sich zur Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt, Mikroporen in Gussformen und Hohlräumen medizinischer Implantate und weisen einen Verlust von $<0,5 \%$, eine 35-fach erhöhte Lebensdauer, Ra 0,10,3 μm und eine Steigerung der Bearbeitungseffizienz um 1520 % auf. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und EDM-Bearbeitung können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen jedoch in der Ultrapräzisionsbearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und der Lichtbogenstabilität ($> 10^6$ -fach). Hartmetallelektroden sind Kupfer- und Graphitelektroden überlegen und erfüllen die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen der Präzisionsbearbeitung (ISO 9001).

Anhang:

Leitfähiges Hartmetall-Beschichtungssubstrat

Das leitfähige Beschichtungssubstrat aus Hartmetall besteht aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85 – 92 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 – 10 Gew.-%) oder Ni (6 – 12 Gew.-%) als Bindephase und wird pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Es verfügt über eine hohe Härte (1600 – 2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}), hohe Temperaturbeständigkeit ($> 800^\circ\text{C}$, oxidationshemmend) und hohe Festigkeit (Biegefestigkeit $1,82,5 \text{ GPa}$). Die Oberfläche ist mit einer leitfähigen PVD/CVD-Beschichtung (wie Cu, Ag, Au, NiP, $0,53 \text{ }\mu\text{m}$, Leitfähigkeit $> 95 \text{ \% IACS}$, IEC 6051221) überzogen, um die Leitfähigkeit, die Lichtbogenerosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$, IEC 60850) und den niedrigen Kontaktwiderstand ($< 10 \text{ }\mu\Omega$) zu verbessern. Das Substrat wird in der Luft- und Raumfahrt (elektrische Steckverbinder, leitfähige Schleifringe), in neuen Energien (Batterieelektroden, Bipolarplatten für Brennstoffzellen) und in der Elektronik (Kontaktpads von Leiterplatten) verwendet, hält hoher Stromdichte ($10 - 100 \text{ A/cm}^2$), Vibration (1050 g) und korrosiven Umgebungen (Salzsprühnebel, feuchte Hitze) stand und bietet eine hohe Leitfähigkeit ($> 95 \text{ \% IACS}$), geringe Verluste ($< 0,5 \text{ \%}$) und eine lange Lebensdauer ($> 10^6$ Zyklen) bei einer Oberflächenrauheit von $\text{Ra } 0,050,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Basierend auf den Normen (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 6051221, ISO 9001) bietet dieser Artikel Vorschläge zu Substrat, Verfahren, Leistung, Anwendung und Optimierung der leitfähigen Hartmetallbeschichtung.

Eigenschaften des leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstrats

1.1 Zusammensetzung des Substratmaterials für leitfähige Hartmetallbeschichtungen

Leitfähiges Hartmetall-Beschichtungssubstrat:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($\text{D}_{50} 0,1 - 0,4 \text{ }\mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($\text{KIC } 1015 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), um 10 % erhöhte Ermüdungsbeständigkeit.

Ni: 6 - 12 Gew. % (optional), Korrosionsbeständigkeit (HCl, $\text{SO}_4^{2-} < 0,01 \text{ mm/a}$), Leitfähigkeit um 5 % erhöht.

Additive: TaC ($0,1 - 0,3 \text{ Gew. \%}$), erhöht die Oxidationsbeständigkeit um 10 %; ZrC ($0,2 - 0,5 \text{ Gew. \%}$), erhöht die Verschleißfestigkeit um 5 %.

Leitfähige Hartmetallbeschichtung Substrat leitfähige Beschichtung:

Cu (PVD): Leitfähigkeit $> 98\% \text{ IACS}$, Temperaturbeständigkeit 600°C , Kontaktwiderstand $< 8 \text{ }\mu\Omega$.

Ag (PVD): Leitfähigkeit $> 99 \text{ \% IACS}$, Temperaturbeständigkeit 650°C , Lichtbogenerosionsbeständigkeit.

Au (PVD): Leitfähigkeit $> 95 \text{ \% IACS}$, Temperaturbeständigkeit 700°C , Korrosionsbeständigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um 20 % erhöht.

NiP (chemische Beschichtung): Leitfähigkeit >90 % IACS, Härte 800–1000 HV, Korrosionsbeständigkeit.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12 Gew. %), 20 % höhere Verschleißfestigkeit, 15 % höhere Rissbeständigkeit.

Oberflächenmodifikation: Nanotexturierung (Strukturgröße 50 – 200 nm), 15 % Vergrößerung der Kontaktfläche, 10 % Reduzierung des Widerstands.

1.2 Leistungsparameter des leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstrats

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1015 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 212, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >800°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).

Elektrische Leitfähigkeit: >95 % IACS (IEC 6051221).

Kontaktwiderstand: <10 μΩ (IEC 6051221).

Lichtbogenabbrandfestigkeit: Verlust <0,01 mm³/min (IEC 60850).

Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 μm, Kontaktstabilität um 20 % erhöht.

Zykluslebensdauer: >10⁶ mal (10100 A/cm², MILSTD810G).

1.3 Vorteile des leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstrats

Hohe Leitfähigkeit: Cu/Ag/Au-Beschichtung, Leitfähigkeit >95 % IACS, Kontaktwiderstand <10 μΩ.

Hohe Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörnige WC+-Beschichtung, Verschleiß <0,02 mm³/h, 35-fach verlängerte Lebensdauer.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + Au/NiP, beständig gegen Salzsprühnebel/Feuchtigkeit und Hitze, besser als auf Kupferbasis.

Hohe Temperaturbeständigkeit: Au-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für Umgebungen mit hohen Temperaturen (700 °C).

Abbrandfestigkeit: Ag/Au-Beschichtung, Verlust <0,01 mm³ / min, für hohe Ströme geeignet.

Herstellungsprozess eines leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstrats

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC / ZrC (D50 0,51 μm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,03 μm, Gleichmäßigkeit >99 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkokille (Abweichung $< \pm 0,02$ mm), Knüppeldichte 8,5 – 10,0 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,03$ mm, Rissrate $< 0,3$ %.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Ergebnisse: Dichte 14,8 – 15,0 g/cm³, Porosität $< 0,0003$ %, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,050,2 µm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Mikrorille/-loch (Ø 0,1–0,5 mm), Abweichung $\leq \pm 0,003$ mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,3 – 0,5 µm), 1200 U/min, Ra $< 0,05$ µm, Kontaktwiderstand um 10 % reduziert.

2.5 Leitfähige Beschichtung

Methode: PVD (Cu/Ag/Au-Target, $> 99,99$ %) oder stromloses Abscheiden (NiP).

Parameter: Cu/Ag/Au (0,53 µm), 10^{-5} Pa, 200400°C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,51 µm /h; NiP (13 µm), pH 4,55,5, 85°C.

Ergebnisse: Haftung > 80 N, Leitfähigkeit > 95 % IACS, Kontaktwiderstand < 10 µΩ.

2.6 Oberflächenmodifizierung

Methoden: Laser-Mikrobearbeitung (Wellenlänge 1064 nm) zur Erzeugung von Nanotexturen (Strukturgröße 50 – 200 nm).

Parameter: Leistung 1020 W, Frequenz 50 kHz, Scangeschwindigkeit 500 mm/s.

Ergebnisse: Die Kontaktfläche vergrößerte sich um 15 %, der Kontaktwiderstand verringerte sich um 10 % und die Leitfähigkeitsstabilität erhöhte sich um 20 %.

2.7 Erkennung

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

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,1 – 0,4 μm), EBSD (Korn grenzenspannung <2%).
Leistung: Härteabweichung $<\pm 30$ HV (ISO 6508), Verschleiß $<0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$, Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/a}$).
Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,003 \text{ mm}$), Laserscanning (Oberflächenabweichung $< \pm 0,002 \text{ mm}$).
Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte $< 0,005 \text{ mm}$), Ultraschall (Risse $< 0,003 \text{ mm}$).
Elektrische Eigenschaften: Leitfähigkeit $>95\%$ IACS, Kontaktwiderstand $<10 \mu\Omega$, Lichtbogenabbrandfestigkeit $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{min}$ (IEC 6051221).
Umwelttests: MILSTD810G (Salzsprühnebel 1000 Stunden, feuchte Hitze $85^\circ\text{C}/85\%$ relative Luftfeuchtigkeit, Vibration 50 g).

Anwendungsszenarien für leitfähige Beschichtungssubstrate

Leitfähige Hartmetall-Beschichtungssubstrate bieten hohe Leitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und extreme Umwelтанforderungen. Vorschläge zu Verfahren, Tests und Auswahl:

3.1 Elektrischer Steckverbinder für die Luftfahrt

Betriebsbedingungen: 50 A/cm^2 , 10 g Vibration, 55°C bis 200°C , Salzsprühnebel (5 % NaCl), 10^6 Zyklen.

Design

Typ: Kontaktstift ($\varnothing 2 \text{ mm}$, Länge 10 mm).

Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , ZrC 0,5 Gew. %), Härte 1700 HV.

Beschichtung: Au (1 μm , PVD, Leitfähigkeit $>95\%$ IACS, Temperaturbeständigkeit 700°C).

Geometrie: Rundheitsabweichung $< \pm 0,002 \text{ mm}$, $R_a < 0,05 \mu\text{m}$, Nanotextur 50 – 100 nm.

Prozesse: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD Au (250°C), Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Stromdichte 50 A/cm^2 , Vibration 10 g, Steck- und Ziehfrequenz 1 Hz.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10^6 -mal (5×10^5 -mal bei Kupfersubstrat, 4-mal länger).

Verschleißrate: $<0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr}$.

Kontaktwiderstand: $<8 \mu\Omega$, Leitfähigkeit $>95\%$ IACS.

Vibrationsfestigkeit: 10 g, 10^6 -fach, kein Ausfall.

Auswahl: WCNi+Au, geeignet für Hochstromkorrosion und regelmäßige NDT.

Vorteile: Geringer Widerstand, Korrosionsbeständigkeit, um 20 % erhöhte Verbindungszuverlässigkeit.

3.2 Bipolarplatten für Brennstoffzellen

Betriebsbedingungen: 100 A/cm^2 , 80°C , feuchte Wärme (95 % relative Luftfeuchtigkeit), saurer Elektrolyt (pH 3), 10^7 Zyklen.

Design

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typ: Bipolare Platte (100 × 100 × 2 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm, TaC 0,3 Gew. %), Härte 1900 HV.

Beschichtung: NiP (2 μm, chemisch plattiert, Leitfähigkeit >90 % IACS, Härte 1000 HV).

Geometrie: Fließkanalabweichung <±0,003 mm, Ra <0,1 μm, Nanotextur 100 – 200 nm.

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, chemische NiP-Beschichtung (85 °C), Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Stromdichte 100 A/cm², Temperatur 80°C, Taktfrequenz 0,1 Hz.

Prüfen:

Lebensdauer: 1,5×10⁷-mal (3×10⁶-mal bei Edelstahl, 5-mal länger).

Verschleißrate: <0,02 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

Kontaktwiderstand: <10 μΩ, Leitfähigkeit >90 % IACS.

Hitze- und Feuchtigkeitsbeständigkeit: 95 % relative Luftfeuchtigkeit, 1000 Stunden, keine Korrosion.

Auswahl: WCCo+NiP, geeignet für saure und feuchte Hitze, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit, hohe Leitfähigkeit, Batterieeffizienz um 15 % gesteigert.

3.3 Kontaktflächen elektronischer Leiterplatten

Betriebsbedingungen: 20 A/cm², 5 g Vibration, 40 °C bis 150 °C, trockene Umgebung, 10⁶ Kontakte.

Design

Typ: Kontaktpad (5×5×0,5 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,10,4 μm, ZrC 0,5 Gew. %), Härte 1800 HV.

Beschichtung: Ag (1 μm, PVD, Leitfähigkeit >99 % IACS, Temperaturbeständigkeit 650 °C).

Geometrie: Planaritätsabweichung <±0,002 mm, Ra <0,05 μm, Nanotextur 50/100 nm.

Prozesse: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD Ag (200 °C), Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Stromdichte 20 A/cm², Vibration 5 g, Kontaktfrequenz 1 Hz.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10⁶-mal (4×10⁵-mal bei Kupfersubstrat, 5-mal länger).

Verschleißrate: <0,01 mm³/h, Lichtbogenabbrandfestigkeit: <0,01 mm³/min.

Kontaktwiderstand: <7 μΩ, Leitfähigkeit >99 % IACS.

Vibrationsfestigkeit: 5 g, 10⁶-fach, kein Ausfall.

Auswahl: WCCo+Ag, geeignet für Hochfrequenzkontakt und normales Polieren.

Vorteile: geringer Lichtbogenwiderstand, um 20 % erhöhte Kontaktstabilität.

Leistungsvergleich von leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstraten

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Kupfersubstrat	Edelstahlsubstrat
Härte (HV)	1600 - 2000	50 - 100	200 - 300
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,2 - 0,4	0,5 - 0,8

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Kupfersubstrat	Edelstahlsubstrat
Zähigkeit (K_{IC} , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10 - 15	20 - 30	50 - 70
Verschleißfestigkeit (mm^3/h)	<0,02	0,5 - 1,0	0,2 - 0,5
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Elektrische Leitfähigkeit (% IACS)	>95	>98	dreiundzwanzig
Kontaktwiderstand ($\mu\Omega$)	<10	<5	50 - 100
Abbrandfestigkeit (mm^3/min)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Kupfer)	35	1	1,52

Highlights des leitfähigen Hartmetall-Beschichtungssubstrats:

Hohe Leitfähigkeit: Cu/Ag/Au-Beschichtung, Leitfähigkeit >95 % IACS, Kontaktwiderstand <10 $\mu\Omega$.

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß <0,02 mm^3/h , Lebensdauer um das 35-fache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + Au/NiP, beständig gegen Salzsprühnebel/Feuchtigkeit und Hitze, besser als auf Kupferbasis.

Abbrandfestigkeit: Ag/Au-Beschichtung, Verlust <0,01 mm^3/min , für hohe Ströme geeignet.

Optimierungsvorschläge für leitfähige Hartmetall-Beschichtungssubstrate

Materialauswahl:

Elektrischer Anschluss: WC10 % Ni + Au, Korrosionsbeständigkeit und Leitfähigkeit um 15 % erhöht.

Bipolarplatte für Brennstoffzellen: WC8 % Co + NiP, Säurebeständigkeit um 20 % erhöht.

Kontaktpad der Leiterplatte: WC8 % Co + Ag, Lichtbogenbeständigkeit um 15 % erhöht.

Zusätze: TaC 0,3 Gew.-%, ZrC 0,5 Gew.-%, Verschleißfestigkeit um 5 % erhöht.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Leitfähigkeit um 10 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 μm), Abweichung $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra <0,05 μm .

Beschichtung:

Au (1 μm , PVD), Kontaktwiderstand um 10 % reduziert.

NiP (2 μm , chemische Beschichtung), Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Ag (1 μm , PVD), Leitfähigkeit um 5 % erhöht.

Lasermikrobearbeitung: Nanotextur 50200 nm, Kontaktfläche um 15 % vergrößert.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

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

5-Achsen-CNC: Abweichung $< \pm 0,003$ mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate $0,51 \mu\text{m/h}$, Abweichung $< \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Elektrischer Anschluss: WCNi+Au, 50 A/cm^2 , 55°C bis 200°C , Salzsprühnebel.

Bipolarplatte: WCCo+NiP, 100 A/cm^2 , 80°C , saurer Elektrolyt.

Kontaktpad: WCCo+Ag, 20 A/cm^2 , 40°C bis 150°C , trockene Umgebung.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn $0,10,4 \mu\text{m}$), EBSD (Korngrenzenspannung $< 2\%$).

Leistung: ASTM G65 ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/Jahr}$), elektrische Leitfähigkeit ($> 95\%$ IACS).

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,003 \text{ mm}$), Laserscanning (Oberflächenabweichung $< \pm 0,002 \text{ mm}$).

Umgebung: MILSTD810G (Salzsprühnebel 1000 Stunden, feuchte Hitze $85^\circ\text{C}/85\%$ relative Luftfeuchtigkeit, Vibration 50 g).

Elektrische Eigenschaften: Durchgangswiderstand $< 10 \mu\Omega$, Abbrandfestigkeit $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$ (IEC 6051221).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Festigkeit $1,8 - 2,5 \text{ GPa}$.

GB/T 79972017: Härte $1600 - 2000 \text{ HV}$.

ASTM G65: Verschleißrate $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

IEC 6051221: Elektrische Kontakteigenschaften.

IEC 60850: Lichtbogenerosionstest.

ISO 9001: Qualitätsmanagement.

Das leitfähige Beschichtungssubstrat aus Hartmetall erreicht eine hohe Härte ($1600 - 2000 \text{ HV}$), Verschleißfestigkeit ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/Jahr}$), hohe Leitfähigkeit ($> 95\%$ IACS) und einen niedrigen Kontaktwiderstand ($< 10 \mu\Omega$) durch Optimierung von WC mit ultrafeinen Körnern ($0,10,4 \mu\text{m}$), Co/Ni-Bindungsphase ($612 \text{ Gew.}\%$), leitfähiger PVD-/chemischer Beschichtung (Cu/Ag/Au/NiP, $0,53 \mu\text{m}$) und nanotexturierter Oberfläche. Das Substrat eignet sich für elektrische Steckverbinder in der Luftfahrt, Bipolarplatten für Brennstoffzellen und Kontaktpads für elektronische Leiterplatten und weist eine um das 35-fache erhöhte Lebensdauer, $R_a 0,05 - 0,2 \mu\text{m}$ und eine um $15 - 20\%$ erhöhte Leitfähigkeitseffizienz auf. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und Laser-Mikrobearbeitung können die Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen jedoch in der Ultrapräzisionsbearbeitung (Kostensteigerung um 10%) und der Gleichmäßigkeit der Beschichtung (Abweichung $< \pm 0,03 \mu\text{m}$). Das Hartmetallsubstrat ist Kupfer- und Edelstahlsubstraten überlegen und erfüllt die hohen

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

Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Leitfähigkeit (ISO 9001).

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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:

Gewichtsreduzierte Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt

Gewichtsreduzierende Hartmetallkomponenten für die Luftfahrt bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (8592 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 - 10 Gew.-%) oder Ni (6 - 12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie verfügen über eine hohe Härte (1600 - 2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig) und Ermüdungsfestigkeit ($>10^6$ -fach, MILSTD810G). Durch Optimierung des Materialverhältnisses und der Struktur (wie poröse Struktur und dünne Wandstärke) wird die Dichte der Teile auf $8\text{--}12 \text{ g/cm}^3$ reduziert (20–40 % leichter als das herkömmliche Hartmetall $14,8\text{--}15,0 \text{ g/cm}^3$), und das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht ($>200 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$) ist besser als das einer Titanlegierung ($100\text{--}150 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$). Die Oberfläche wird mit einer PVD/CVD-Beschichtung (wie TiN, Al_2O_3 , $13 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,2$) oder einer Funktionsbeschichtung (Au, Ag, $0,52 \mu\text{m}$, Leitfähigkeit $>90 \%$ IACS) überzogen, um Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrische Eigenschaften zu verbessern. Die Komponenten werden in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Flügelverbinder, Befestigungselemente und Halterungen) verwendet und sind hohen Belastungen ($100\text{--}500 \text{ MPa}$), Vibrationen ($10\text{--}100 \text{ g}$) und extremen Umgebungsbedingungen ($55\text{--}800^\circ\text{C}$) ausgesetzt. Die Lebensdauer ist 35-mal länger als bei herkömmlichen Materialien (z. B. Edelstahl, Titanlegierung, $300\text{--}600 \text{ HV}$) und die Oberflächenrauheit beträgt $\text{Ra } 0,050,2 \mu\text{m}$.

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100) bietet dieser Artikel Vorschläge zur Herstellung, Verarbeitung, Leistung, Anwendung und Optimierung von gewichtsreduzierenden Hartmetallkomponenten für die Luftfahrt.

Eigenschaften von Hartmetallkomponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

1.1 Gewichtsreduzierende Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt

Materialzusammensetzung

Matrix:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($\text{D}_{50} 0,1 - 0,4 \mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 10 - 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), um 10 % erhöhte Dauerfestigkeit.

Ni: 6 - 12 Gew. % (optional), Korrosionsbeständigkeit (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/a}$), Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen.

Zusatzstoffe: Cr_3C_2 (0,20,5 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 5 %;

TaC (0,10,3 Gew.-%), erhöht die antioxidativen Eigenschaften um 10 %.

Gewichtsverlust:

Poröse Struktur: Porosität 5 – 15 %, Porengröße $50 - 200 \mu\text{m}$, Dichterduzierung 20 – 30 %.

Dünnwandig: Wandstärke $0,52 \text{ mm}$, Gewichtsreduzierung 10 – 20 %.

Verbundverstärkung: Kohlefaser/CNT (13 Gew.-%), Festigkeits-Gewichts-Verhältnis um 15 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhöht.

Beschichtung:

TiN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 800°C, Verschleißfestigkeit.

Al₂O₃ (CVD): Härte 1800 - 2200 HV, Temperaturbeständigkeit 1000°C, Korrosionsbeständigkeit.

Au/Ag (PVD): Leitfähigkeit >90 % IACS, Temperaturbeständigkeit 500 – 600 °C, Antioxidationsmittel.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12 Gew. %), Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht, Rissbeständigkeit um 15 % erhöht.

1.2 Leistungsparameter von Hartmetallkomponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 10 - 15 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 12 - 15, Ni-basiert 10 - 12).

Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht: >200 MPa·cm³ / g (Titanlegierung 100 - 150).

Dichte: 8 - 12 g/cm³ (20 - 40 % Gewichtsreduzierung).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 212, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >800°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).

Ermüdungsbeständigkeit: >10⁶ mal (100 - 500 MPa, MILSTD810G).

Elektrische Leitfähigkeit: >90 % IACS (Au/Ag-Beschichtung, IEC 6051221).

Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 µm, Kontaktstabilität um 20 % erhöht.

1.3 Vorteile von Hartmetallkomponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

Hohe Festigkeit und geringe Dichte: porös/dünnwandig, Festigkeits-Gewichts-Verhältnis >200 MPa·cm³ / g, 20 - 40 % Gewichtsreduzierung.

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, die Lebensdauer wird um das 35-fache erhöht und die Ausfallrate um 30 % reduziert.

Hohe Temperaturbeständigkeit: TiN/Al₂O₃-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für Hochtemperaturumgebungen (800 °C).

Korrosionsbeständigkeit: Auf Ni-Basis + Al₂O₃, beständig gegen Flugbenzin/Salzsprühnebel, geeignet für raue Umgebungen.

Ermüdungsbeständigkeit: Co/Ni mit hoher Zähigkeit, widersteht hochfrequenten Vibrationen (> 10⁶-mal), besser als Titanlegierung.

Herstellungsprozess von Hartmetallteilen zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,1 - 0,4 µm, Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 µm), Cr₃C₂/TaC (D50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,51 μm), Kohlenstofffaser/CNT (D50 0,10,5 μm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, Gleichmäßigkeit $> 99 \%$.

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) + additive Fertigung (unterstützt durch 3D-Druck).

Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkokille (Abweichung $< \pm 0,02 \text{ mm}$), Knüppeldichte 8,5 – 10,0 g/cm³.

3D-Druck: SLM (Selective Laser Melting), WCNi-Pulver, Schichtdicke 30 – 50 μm , Porosität 5 – 15 %.

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$, Porositätsabweichung $\leq \pm 0,5 \%$, Rissrate $< 0,3 \%$.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ $< 2 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 22,5 Stunden.

HIP: 1350 °C, 120 MPa (Ar), 11,5 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 8 – 12 g/cm³, Porosität $< 0,0003 \%$, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 μm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra 0,050,2 μm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Mikroloch/-schlitz ($\varnothing 0,1 - 0,5 \text{ mm}$), Abweichung $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 μm), 1200 U/min, Ra $< 0,05 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient um 10 % reduziert.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Ti/Al/Au/Ag-Ziele, $> 99,99 \%$).

Parameter: TiN / Al₂O₃ / Au/Ag (13 μm), 10^{-5} Pa , 200 - 400°C, Bias 80 V, Abscheiderate 0,51 $\mu\text{m} / \text{h}$.

Ergebnisse: Haftung $> 80 \text{ N}$, Reibungskoeffizient $< 0,2$, Leitfähigkeit $> 90 \%$ IACS.

2.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,1 – 0,4 μm), EBSD (Korngrenzenspannung $< 2\%$).

Leistung: Härteabweichung $\leq \pm 30 \text{ HV}$ (ISO 6508), Verschleiß $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{h}$,

Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/a}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,003$ mm), Laserscanning (Aperturabweichung $< \pm 0,002$ mm).
Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte $< 0,005$ mm), Ultraschall (Risse $< 0,003$ mm).
Umwelttests: MILSTD810G (55 °C bis 800 °C, 100 g Vibration, 10^6 Zyklen).
Mechanische Prüfung: Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^6$ -fach, MILSTD810G), Festigkeits-Gewichts-Verhältnis (> 200 MPa·cm³ / g).

Anwendungsszenarien für gewichtsreduzierte Teile in der Luftfahrt

Gewichtsreduzierende Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt bieten Prozess-, Test- und Auswahlvorschläge für hohe Festigkeit, geringe Dichte und extreme Umgebungsanforderungen:

3.1 Tragflächenverbinder aus Hartlegierungen für die Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

Bedingungen: 300 MPa, 100 g Vibration, 55 °C bis 200 °C, Salzsprühnebel (5 % NaCl), 10^6 Zyklen.
Design

Typ: Verbindungsplatte (100×50×2 mm, Porosität 10%).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,4 Gew.-%, CNT 2 Gew.-%), Härte 1700 HV.

Beschichtung: Al₂O₃ (2 µm, CVD, Temperaturbeständigkeit 1000°C, korrosionsbeständig).

Geometrie: Blendenabweichung $< \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,1$ µm, Dichte 9,5 g/cm³.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 300 MPa, SLM (Porosität 10 %), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, CVD Al₂O₃ (400 °C).

Parameter: Spannung 300 MPa, Vibration 100 g, Abtastrate 1 kHz.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10^6 -mal (5×10^5 -mal bei Titanlegierung, 4-mal länger).

Verschleißrate: $< 0,01$ mm³/h, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01$ mm/Jahr.

Festigkeits-Gewichts-Verhältnis: 220 MPa·cm³ / g, 30 % Gewichtsreduzierung.

Vibrationsfestigkeit: 100 g, 10^6 -fach, kein Ausfall.

Auswahl: WCNi+ Al₂O₃ +CNT, geeignet für Hochspannungskorrosion und regelmäßige NDT.

Vorteile: Hohe Festigkeit, geringe Dichte, Korrosionsbeständigkeit, um 15 % erhöhte Flügelstabilität.

3.2 Befestigungselemente (Schrauben) aus Hartmetall für gewichtsreduzierte Komponenten in der Luftfahrt

Bedingungen: 200 MPa, 20 g Vibration, 40 °C bis 150 °C, trockene Umgebung, 10^7 Zyklen.

Design

Typ: Schraube (M6, 1 mm dick, 8 % Porosität).

Material: WC8%Co (D50 0,10,4 µm, TaC 0,3 Gew.-%, Kohlefaser 1 Gew.-%), Härte 1800 HV.

Beschichtung: TiN (1 µm, PVD, Temperaturbeständigkeit 800°C, Härte 2400 HV).

Geometrie: Gewindeabweichung $< \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,05$ µm, Dichte 10 g/cm³.

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 300 MPa, SLM (Porosität 8 %), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiN (250 °C).

Parameter: Spannung 200 MPa, Vibration 20 g, Drehmoment 10 Nm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prüfen:

Lebensdauer: $1,5 \times 10^7$ -mal (Edelstahl 2×10^6 -mal, 7,5-mal länger).

Verschleißrate: $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr}$.

Festigkeits-Gewichts-Verhältnis: $210 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 / \text{g}$, 25 % Gewichtsreduzierung.

Ermüdungsfestigkeit: 200 MPa, 10^7 -fach, kein Bruch.

Auswahl: WCCo+TiN +Kohlefaser, geeignet für hochfrequente Vibrationen, regelmäßige Drehmomentprüfung.

Vorteile: geringe Dichte, hohe Festigkeit, Ermüdungsbeständigkeit, um 10 % gesteigerte Montageeffizienz.

3.3 Halterung für Gewichtsreduzierungskomponenten aus Hartlegierungen für die Luftfahrt (Motoraufhängung)

Bedingungen: 500 MPa, 50 g Vibration, 200–800 °C, Flugbenzin, 10^6 Zyklen.

Design

Typ: Halterung (200×100×1,5 mm, dünnwandig).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 Gew.-%, TaC 0,2 Gew.-%), Härte 1900 HV.

Beschichtung: Al_2O_3 (2 μm , CVD, Temperaturbeständigkeit 1000°C) + Au (0,5 μm , PVD, Leitfähigkeit $>95\%$ IACS).

Geometrie: Wanddickenabweichung $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$, Dichte 11 g/cm^3 .

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, CVD Al_2O_3 (400 °C), PVD Au (200 °C).

Parameter: Spannung 500 MPa, Vibration 50 g, Temperatur 800 °C.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10^6 -mal (Titanlegierung 4×10^5 -mal, 5-mal länger).

Verschleißrate: $<0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr}$.

Festigkeits-Gewichts-Verhältnis: $230 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 / \text{g}$, 20 % Gewichtsreduzierung.

Hohe Temperaturbeständigkeit: 800 °C, 500 Stunden, keine Oxidation.

Auswahl: WCCo+ Al_2O_3 +Au, geeignet für hohe Temperaturen, hohe Belastungen und regelmäßige NDT.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, starke Leitfähigkeit, um 10 % gesteigerte Motoreffizienz.

Leistungsvergleich von Hartmetallkomponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Titanlegierung (Ti6Al4V)	Edelstahl (316L)
Härte (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Zähigkeit (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht ($\text{MPa} \cdot \text{cm}^3 / \text{g}$)	>200	100 - 150	60 - 80

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Titanlegierung (Ti6Al4V)	Edelstahl (316L)
Dichte (g/cm ³)	812	4.4	8,0
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0,20,5
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Temperaturbeständigkeit (°C)	>800	400 - 600	300 - 500
Dauerfestigkeit (Zeiten, 500 MPa)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Edelstahl)	35	dreiundzwanzig	1

von Hartmetallkomponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt :

Gewichtsreduzierung: porös/dünnwandig, Dichte 812 g/cm³, Gewichtsreduzierung 2040 %.
Hohe Festigkeit: Festigkeits-Gewichts-Verhältnis > 200 MPa·cm³/g, besser als Titanlegierung.
Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß <0,02 mm³/h, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.
Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + Al₂O₃, beständig gegen Salzsprühnebel/Kraftstoff, besser als Edelstahl.

Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Komponenten zur Gewichtsreduzierung in der Luftfahrt

Materialauswahl:

Flügelverbinder: WC10%Ni+Al₂O₃ + CNT, Korrosionsbeständigkeit und 30 % Gewichtsreduzierung.
Befestigungselemente: WC8 % Co + TiN + Kohlefaser, ermüdungsbeständig und 25 % Gewichtsreduzierung.
Motorhalterung: WC8%Co+Al₂O₃ + Au, hohe Temperaturbeständigkeit und um 10 % erhöhte elektrische Leitfähigkeit.
Zusätze: Cr₃C₂ 0,4 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härtesteigerung um 5 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Festigkeitssteigerung um 15 %.
3D-Druck: SLM, Porosität 515 %, Gewichtsreduzierung 2030 %.
Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 µm), Abweichung <±0,005 mm, Ra <0,05 µm .

Beschichtung:

Al₂O₃ (2 µm, CVD), Hochtemperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.
TiN (1 µm, PVD), Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.
Au (0,5 µm, PVD), Leitfähigkeit um 10 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 10^{-6} Pa.

SLM-Anlage: Schichtdicke 30 – 50 μm , Porositätsabweichung $< \pm 0,5\%$.

5-Achsen-CNC: Abweichung $< \pm 0,003$ mm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Flügelverbinder: WCNi+ Al_2O_3 , 300 MPa, 55°C bis 200°C , Salzsprühnebel.

Befestigungselemente: WCCo+TiN, 200 MPa, 40°C bis 150°C , trockene Umgebung.

Träger: WCCo+ Al_2O_3 + Au, 500 MPa, 200 - 800°C , Heizöl.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 μm), EBSD (Korngrenzenspannung $< 2\%$).

Leistung: ASTM G65 ($< 0,02$ mm^3/h), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/Jahr), Temperaturbeständigkeit ($> 800^{\circ}\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm^2).

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,003$ mm), Laserscanning (Aperturabweichung $< \pm 0,002$ mm).

Umgebung: MILSTD810G (55°C bis 800°C , 100 g, 10^{-6} -fach).

Mechanisch: Festigkeits-Gewichts-Verhältnis (> 200 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$), Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^6$ -fach).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $< \pm 0,1$ g/cm^3 .

GB/T 38512015: Festigkeit 1,8 – 2,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1600 – 2000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate $< 0,02$ mm^3/h .

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

MILSTD810G: Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen (Vibration, Temperatur, Korrosion).

AS9100: Qualitätsmanagement für die Luft- und Raumfahrt.

Gewichtsreduzierende Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt erreichen eine hohe Härte (1600 – 2000 HV), Verschleißfestigkeit ($< 0,02$ mm^3/h), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/Jahr), Hochtemperaturbeständigkeit ($> 800^{\circ}\text{C}$) und ein hohes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht (> 200 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$) durch Optimierung von ultrafeinkörnigem WC (0,10,4 μm), Co/Ni-Bindungsphase (6 – 12 Gew. %), poröser/dünner Wand und PVD/CVD-Beschichtung (TiN/ Al_2O_3 /Au, 13 μm). Die Teile eignen sich für Flügelanschlüsse, Befestigungselemente und Motorhalterungen und bieten eine Gewichtsreduzierung von 20 – 40 %, eine 35-fach erhöhte Lebensdauer, Ra 0,05 – 0,2 μm und eine um 15 % erhöhte Zuverlässigkeit. Durch Optimierung der Porosität, der Beschichtungsdicke und des SLM-Prozesses können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen jedoch in der ultrapräzisen Bearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und der Porengleichmäßigkeit (Abweichung $< \pm 0,5\%$). Hartmetall ist Titanlegierungen und Edelstahl überlegen und erfüllt die strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (AS9100, MILSTD810G).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Biomedizinische Implantate aus Hartmetall

Biomedizinische Implantate aus Hartmetall bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85–92 Gew.-%), kombiniert mit Co (6–10 Gew.-%) oder Ni (6–12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie zeichnen sich durch hohe Härte (1600–2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 6,8, enthält NaCl, Protein), hohe Biokompatibilität (ISO 109935, Zytotoxizität $<5 \%$) und Ermüdungsbeständigkeit ($>10^7$ -fach, ISO 72064) aus. Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (z. B. TiN, DLC, ZrN, $13 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,2$) oder einer bioaktiven Beschichtung (z. B. Hydroxylapatit, HA, $510 \mu\text{m}$) versehen, um die Verschleißfestigkeit, antibakterielle Wirkung (antibakterielle Rate $>99 \%$, ISO 22196) und Knochenintegration (Knochenintegrationsrate $>80 \%$, ISO 109936) zu verbessern. Implantate werden in der Orthopädie (Hüft-/Kniegelenke, Knochennägel), Zahnmedizin (Implantate) und im Herz-Kreislauf-Bereich (Stents) verwendet und sind hohen Belastungen (500–2000 N), Korrosion durch Körperflüssigkeiten und zyklischer Ermüdung ($>10^7$ -mal) ausgesetzt. Die Lebensdauer ist 35-mal länger als bei herkömmlichen Materialien (wie Titanlegierungen, CoCr-Legierungen, 300–600 HV) und die Oberflächenrauheit beträgt $R_a 0,050,2 \mu\text{m}$.

Basierend auf den Normen (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 10993, ISO 7206) bietet dieser Artikel Vorschläge zur Herstellung, Verarbeitung, Leistung, Anwendung und Optimierung von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall.

Eigenschaften von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Materialzusammensetzung von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Matrix:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($D_{50} 0,10,4 \mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($KIC 1015 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), um 10 % erhöhte Ermüdungsbeständigkeit.

Ni: 6 – 12 Gew. % (optional), korrosionsbeständig (NaCl, Protein $<0,01 \text{ mm/Jahr}$), geringe Toxizität (ISO 109935).

Zusatzstoffe: TaC (0,10,3 Gew.-%), antioxidative Kapazität um 10 % erhöht; ZrC (0,20,5 Gew.-%), Biokompatibilität um 5 % erhöht.

Beschichtung:

TiN (PVD): Härte 2000–2400 HV, Temperaturbeständigkeit $800 \text{ }^\circ\text{C}$, Verschleißfestigkeit, hohe Biokompatibilität.

DLC (PVD): Härte 2500–3000 HV, Reibungskoeffizient $<0,1$, antibakterielle Rate $>99 \%$.

ZrN (PVD): Härte 2200–2600 HV, Korrosionsbeständigkeit, Knochenintegrationsrate um 15 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HA (Plasmaspritzen): 510 μm dick, Knochenintegrationsrate > 80 %, hohe biologische Aktivität.
Gradientenstruktur: niedriger Co/Ni-Gehalt (68 Gew. %) an der Oberfläche, hoher Co/Ni-Gehalt (1012 Gew. %) im Kern, 20 % höhere Verschleißfestigkeit, 15 % höhere Rissbeständigkeit.
Oberflächenmodifikation: Nanoporöse Struktur (Porengröße 50200 nm), Zellanhaftungsrate um 30 % erhöht.

1.2 Leistungsparameter von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Härte: 1600–2000 HV (GB/T 79972017).
Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).
Bruchzähigkeit: 10 - 15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).
Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm^3/h (ASTM G65).
Korrosionsbeständigkeit: pH 68, <0,01 mm/Jahr (ISO 1099310).
Ermüdungsfestigkeit: >10⁷ mal (500-2000 N, ISO 72064).
Biokompatibilität: Zytotoxizität <5 %, nicht sensibilisierend (ISO 109935).
Antibakterielle Eigenschaft: antibakterielle Rate > 99 % (DLC/ZrN, ISO 22196).
Osseointegration: Osseointegrationsrate > 80 % (HA, ISO 109936).
Reibungskoeffizient: <0,2 (Beschichtung), Antihafteffekt um 25 % erhöht.
Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 μm , Zellhaftung um 20 % erhöht.

1.3 Vorteile von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Hohe Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörnige WC+-Beschichtung, Verschleiß <0,02 mm^3/h , 35-fach verlängerte Lebensdauer.
Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC/ZrN, beständig gegen Flüssigkeitskorrosion, besser als CoCr-Legierung.
Hohe Biokompatibilität: TiN/HA-Beschichtung, ungiftig, Knochenintegrationsrate > 80 %.
Ermüdungsbeständigkeit: Hohe Zähigkeit Co/Ni, hält hohen Belastungen stand (>10⁷-mal), besser als Titanlegierungen.
Antibakteriell: DLC/ZrN-Beschichtung, antibakterielle Rate >99 %, Infektionsrisiko um 30 % reduziert.

Herstellungsprozess von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,104 μm , Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC / ZrC (D50 0,51 μm).
Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, Gleichmäßigkeit >99 %.

2.2 Umformen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 250–300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlform (Abweichung $\leq \pm 0,02$ mm),
Knüppeldichte 8,510,0 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,03$ mm, Rissrate $< 0,3$ %.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200–500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1350–1400 °C, 10^{-5} – 10^{-6} Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Ergebnisse: Dichte 14.815,0 g/cm³, Porosität $< 0,0003$ %, Härte 1600–2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003–0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,050,2 µm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Mikroloch/-schlitz (Ø 0,1–0,5 mm), Abweichung $\leq \pm 0,003$ mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 µm), 1200 U/min, Ra $< 0,05$ µm, Zellhaftung um 15 % erhöht.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Ti/Zr/C-Target, $> 99,99$ %) oder Plasmaspray (HA).

Parameter: TiN /DLC/ ZrN (13 µm), 10^{-5} Pa, 200 - 400°C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,51 µm /h; HA (510 µm), Sprühtemperatur 8000°C, Geschwindigkeit 400 m/s.

Ergebnisse: Adhäsionskraft > 80 N, Reibungskoeffizient $< 0,2$, Knochenintegrationsrate > 80 %.

2.6 Oberflächenmodifizierung

Methoden: Lasermikrobearbeitung (Wellenlänge 1064 nm) zur Erzeugung nanoporöser Strukturen (Porengröße 50–200 nm).

Parameter: Leistung 1020 W, Frequenz 50 kHz, Scangeschwindigkeit 500 mm/s.

Ergebnisse: Die Zellanhaftungsrate stieg um 30 % und die Knochenintegrationszeit verringerte sich um 20 %.

2.7 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngrenzenspannung $< 2\%$).

Leistung: Härteabweichung $\leq \pm 30$ HV (ISO 6508), Verschleiß $< 0,02$ mm³ / h,
Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/a).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,003$ mm), Laserscanning (Oberflächenabweichung $< \pm 0,002$ mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte $< 0,005$ mm), Ultraschall (Risse $< 0,003$ mm).

Biologische Tests: Zytotoxizität < 5 % (ISO 109935), Knochenintegration > 80 % (ISO 109936), antibakterielle Rate > 99 % (ISO 22196).

Mechanische Prüfung: Ermüdungsfestigkeit $> 10^7$ -fach (ISO 72064), Scherfestigkeit > 20 MPa (ASTM F1044).

Anwendungsszenarien von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Hartmetallimplantate erfüllen hohe Anforderungen an Haltbarkeit und Biokompatibilität. Verfahrens-, Test- und Auswahlvorschläge:

3.1 Biomedizinische Implantate aus Hartmetall – Hüftprothese (Acetabularschale/Femurkopf)

Bedingungen: 1000–2000 N, Körperflüssigkeit (pH 7,4), 10^7 Zyklen, 37 °C.

Design

Typ: Acetabulum-Pfanne (Ø 50 mm) + Femurkopf (Ø 28 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,10,4 µm, ZrC 0,5 Gew. %), Härte 1800 HV.

Beschichtung: DLC (2 µm, PVD, Reibungskoeffizient $< 0,1$) + HA (5 µm, Plasmaspritzen).

Geometrie: Sphärische Abweichung $< \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ µm, Apertur 100–200 nm.

Prozesse: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD DLC (250 °C), Plasmaspritzen HA, Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Belastung 1500 N, Schwingfrequenz 1 Hz, pH-Wert der Körperflüssigkeit 7,4.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10^7 -mal (Titanlegierung 5×10^6 -mal, 4-mal länger).

Verschleißrate: $< 0,01$ mm³/h, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01$ mm/Jahr.

Biokompatibilität: Zytotoxizität < 3 %, Knochenintegrationsrate > 85 %.

Antibakterielle Eigenschaft: antibakterielle Rate > 99 % (S. aureus), Reibungskoeffizient $< 0,1$.

Auswahl: WCNi+DLC+HA, geeignet für hochbelastete Körperflüssigkeiten und regelmäßige bildgebende Untersuchungen.

Vorteile: verschleißfest und antibakteriell, starke Knochenintegration und 20 % Verkürzung der postoperativen Erholungszeit.

3.2 Biomedizinische Implantate aus Hartmetall Zahnimplantate (Zahnwurzeln)

Bedingungen: 500–1000 N, Speichel (pH 6,7), 10^7 Kautabletten, 37 °C.

Design

Typ: Gewindeimplantat (Ø 4 mm, Länge 10 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 µm, TaC 0,3 Gew. %), Härte 1900 HV.

Beschichtung: ZrN (2 µm, PVD, Härte 2600 HV) + HA (5 µm, Plasmaspritzen).

Geometrie: Gewindeabweichung $< \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ µm, Apertur 50150 nm.

Prozesse: Kugelmahlen 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schleifen, PVD ZrN (300 °C), Plasmaspritzen HA, Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Belastung 800 N, Kaufrequenz 2 Hz, Speichel-pH 6,5.

prüfen:

Lebensdauer: $1,5 \times 10^7$ -mal (CoCr-Legierung 4×10^6 -mal, 3,8-mal länger).

Verschleißrate: $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr}$.

Biokompatibilität: Zytotoxizität $<4 \%$, Knochenintegrationsrate $>80 \%$.

Antibakterielle Eigenschaft: antibakterielle Rate $>99 \%$ (P. gingivalis), Implantationserfolgsrate um 15% erhöht.

Auswahl: WCCo+ZrN+HA, geeignet für Kaubelastung und regelmäßige Munduntersuchung.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit, schnelle Knochenintegration und 20% höhere Implantatstabilität.

3.3 Kardiovaskulärer Stent aus biomedizinischem Hartmetall

Bedingungen: 100200 N, Blut (pH 7,4), 10^8 Herzschläge, 37°C .

Design

Typ: Mesh-Stent (Ø 3 mm, Länge 15 mm).

Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , ZrC 0,5 Gew. %), Härte 1700 HV.

Beschichtung: TiN (1 μm , PVD, Härte 2400 HV) + DLC (1 μm , PVD).

Geometrie: Maschenabweichung $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, Ra $<0,05 \mu\text{m}$, Porengröße 50100 nm.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), EDM, PVD TiN+DLC (250°C), Laser-Mikrobearbeitung.

Parameter: Belastung 150 N, Pulsationsfrequenz 1 Hz, Blut-pH 7,4.

prüfen:

Lebensdauer: 3×10^8 -mal (CoCr-Legierung 1×10^8 -mal, 3-mal länger).

Verschleißrate: $<0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr}$.

Biokompatibilität: Zytotoxizität $<2 \%$, Thrombose rate $<1 \%$.

Antibakterielle Eigenschaft: antibakterielle Rate $>99 \%$ (E. coli), Stent-Durchgängigkeitsrate um 20% erhöht.

Auswahl: WCNi+TiN+DLC, geeignet für Blutumgebung und regelmäßige Ultraschalluntersuchung.

Vorteile: Anti-Müdigkeit, Anti-Thrombose, vaskuläre Restenoserate um 15% reduziert.

Leistungsvergleich von biomedizinischen Implantaten aus Hartmetall

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Titanlegierung (Ti6Al4V)	CoCr- Legierung
Härte (HV)	1600 - 2000	300 - 400	400 - 600
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	1,5 - 2,0
Zähigkeit (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10 - 15	40 - 60	20 - 30
Verschleißfestigkeit (mm^3/h)	$<0,02$	0.10.3	0,050,1
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr , pH 68)	$<0,01$	0,02 - 0,05	0,01 - 0,03

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Titanlegierung (Ti6Al4V)	CoCr- Legierung
Dauerfestigkeit (Zeiten, 2000 N)	$>10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-7}$
Biokompatibilität (Toxizität %)	<5	<5	<10
Osseointegration (%)	>80	6070	50 - 60
Antibakterielle Eigenschaft (%)	>99	50 - 70	60 - 80
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zur Titanlegierung)	35	1	1,52

Highlights der biomedizinischen Implantate aus Hartmetall:

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.
Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC/ZrN, beständig gegen Flüssigkeitskorrosion, besser als CoCr-Legierung.

Biokompatibilität: TiN/HA-Beschichtung, Knochenintegrationsrate $> 80 \%$, besser als Titanlegierung.

Antibakteriell: DLC/ZrN-Beschichtung, antibakterielle Rate $>99 \%$, geringes Infektionsrisiko.

Optimierungsempfehlungen für biomedizinische Implantate aus Hartmetall

Materialauswahl:

Hüftgelenk: WC10 % Ni + DLC + HA, verschleißfeste Knochenintegration um 20 % erhöht.

Zahnimplantat: WC8%Co+ZrN+HA, Korrosionsschutz und Knochenbindung um 15 % erhöht.

Herz-Kreislauf-Stent: WC10 % Ni + TiN + DLC, antithrombotische Wirkung um 20 % erhöht.

Additive: ZrC 0,5 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Biokompatibilität um 5 % erhöht.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität $<0,0003 \%$, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe ($13 \mu\text{m}$), Abweichung $<\pm 0,005 \text{ mm}$, $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

Beschichtung:

DLC ($2 \mu\text{m}$, PVD), Reibungskoeffizient um 10 % reduziert.

ZrN ($2 \mu\text{m}$, PVD), antibakterielle Wirkung um 15 % erhöht.

HA ($5 \mu\text{m}$, Plasmaspritzen), Knochenbindungsrate um 20 % erhöht.

Lasermikrobearbeitung: Porengröße 50–200 nm, Zellanhaftung um 30 % erhöht.

Geräteoptimierung =

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

5-Achsen-CNC: Abweichung $<\pm 0,003 \text{ mm}$.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate $0,51 \mu\text{m}/\text{h}$, Abweichung $<\pm 0,03 \mu\text{m}$.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

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

Hüftgelenk: WCNi+DLC+HA , 1000-2000 N, Körperflüssigkeit, 10^7 -mal.

Zahnimplantate: WCCo+ZrN+HA , 500-1000 N, Speichel, 10^7 mal.

Herz-Kreislauf-Stent: WCNi+TiN+DLC , 100-200 N, Blut, 10^8 -fach.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 μm), EBSD (Korngrenzenspannung <2%).

Leistung: ASTM G65 (<0,02 mm^3/h), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), Ermüdungsbeständigkeit (> 10^7 -fach).

Biologisch: ISO 109935 (Toxizität <5 %), ISO 109936 (Osseointegration >80 %), ISO 22196 (antibakterielle Rate >99 %).

Geometrie: KMG (Abweichung < $\pm 0,003 \text{ mm}$), Laserscanning (Oberflächenabweichung < $\pm 0,002 \text{ mm}$).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung < $\pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$.

GB/T 38512015: Festigkeit 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1600–2000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate <0,02 mm^3/h .

ISO 109935: Biokompatibilität (Toxizität <5 %).

ISO 109936: Osseointegrationsprüfung.

ISO 22196: Antimikrobielle Eigenschaften.

ISO 72064: Prüfung der Ermüdungsfestigkeit.

Biomedizinische Hartmetallimplantate erreichen eine hohe Härte (1600–2000 HV), Verschleißfestigkeit (<0,02 mm^3/h), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), hohe Biokompatibilität (Toxizität < 5 %) und Ermüdungsfestigkeit (> 10^7 -fach) durch Optimierung von WC mit ultrafeinen Körnern (0,1–0,4 μm), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew.-%), PVD/CVD-Beschichtung (TiN/DLC/ZrN, 13 μm) und HA-Beschichtung (510 μm). Die Implantate eignen sich für Hüftgelenke, Zahnimplantate und Herz-Kreislauf-Stents und weisen eine um das 35-fache erhöhte Lebensdauer, Ra 0,05–0,2 μm , eine Knochenintegrationsrate von >80 % und ein um 30 % reduziertes Infektionsrisiko auf. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und Lasermikrobearbeitung können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen jedoch in der Ultrapräzisionsbearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und langfristigen In-vivo-Tests (> 10^7 -fach). Hartmetall ist Titanlegierungen und CoCr-Legierungen überlegen und erfüllt die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen der Biomedizin (ISO 10993, ISO 7206).

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:

Intelligente Hartmetallform

Intelligente Hartmetallformen bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (88–94 Gew.-%), kombiniert mit Co (6–10 Gew.-%) oder Ni (612 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie zeichnen sich durch hohe Härte (1800–2200 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}) und hohe Temperaturbeständigkeit ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$, oxidationshemmend) aus. Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN, DLC, $25 \text{ }\mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,15$) versehen, um die Verschleiß- und Antihafteigenschaften zu verbessern, und verfügt über integrierte intelligente Sensoren (MEMS, Dehnungsmessstreifen), um eine Echtzeitüberwachung (Temperatur $\pm 0,5^\circ\text{C}$, Druck $\pm 0,1 \text{ MPa}$, Dehnung $\pm 1 \text{ }\mu\epsilon$) zu erreichen. Die Form wird in der intelligenten Fertigung (wie in der Automobil-, Luftfahrt- und Elektronikindustrie) verwendet und ist hohen Belastungen (100–500 MPa), hohen Temperaturen (600–1200°C) und zyklischen Thermoschocks ($\Delta T \text{ } 500\text{--}800^\circ\text{C}$) ausgesetzt. Die Lebensdauer ist 35-mal länger als die von herkömmlichem Formenstahl (H13, 400–600 HV), und die Oberflächenrauheit beträgt $R_a \text{ } 0,10,3 \text{ }\mu\text{m}$.

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 17879, ISO 9001) bietet dieser Artikel Technologie, Leistung, Anwendung und Optimierungsvorschläge für intelligente Hartmetallformen.

Eigenschaften der intelligenten Hartmetallform

1.1 Materialzusammensetzung der intelligenten Hartmetallform

Matrix:

WC: 88–94 Gew.-%, ultrafeines Korn ($D_{50} \text{ } 0,2\text{--}0,5 \text{ }\mu\text{m}$), Härte 1800–2200 HV.

Co: 6–10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($\text{KIC } 1520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), Verschleißfestigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 6–12 Gew.-% (optional), Korrosionsbeständigkeit (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ mm/Jahr}$), Schlagfestigkeit ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Zusätze: Cr₃C₂ (0,3–0,6 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %; TaC (0,1–0,3 Gew.-%), erhöht die Oxidationsbeständigkeit um 10 %.

Beschichtung:

TiAlN (PVD/CVD): Härte 2800–3200 HV, Temperaturbeständigkeit 10–50 °C, hohe Temperaturverschleißfestigkeit.

AlCrN (PVD): Härte 3000–3400 HV, Temperaturbeständigkeit 1100°C, Oxidationsbeständigkeit.

DLC (PVD): Härte 2500–3000 HV, Reibungskoeffizient $<0,1$, Temperaturbeständigkeit 600 °C, antiadhäsiv.

Gradientenstruktur: niedriger Co/Ni-Gehalt (6–8 Gew.-%) an der Oberfläche, hoher Co/Ni-Gehalt (10–12 Gew.-%) im Kern, 25 % höhere Verschleißfestigkeit, 20 % höhere Rissbeständigkeit.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Intelligente Komponenten: MEMS (auf Siliziumbasis, <0,5 mm) oder Dehnungsmessstreifen (NiCr, 0,01 mm dick), Überwachung von Temperatur, Druck, Dehnung, Fehler <±0,5 %.

1.2 Leistungsparameter der intelligenten Hartmetallform

Härte: 1800–2200 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 2,0–2,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 12–20 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1520, Ni-basiert 1215).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,03 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 2–12, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >1000°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 1000 Stunden).

Thermoschock: >10⁻⁵-fach (ΔT 500–800°C, ISO 17879).

Reibungskoeffizient: <0,15 (Beschichtung), Antihaftwirkung um 30 % erhöht.

Oberflächenrauheit: Ra 0,1–0,3 μm, Entformungseffizienz um 15 % erhöht.

Überwachungsgenauigkeit: Temperatur ±0,5°C, Druck ±0,1 MPa, Dehnung ±1 με (IEC 60751).

1.3 Vorteile intelligenter Hartmetallformen

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, 35-mal höhere Lebensdauer, 30 % geringere Wartungskosten.

Hohe Temperaturbeständigkeit: TiAlN/AlCrN-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für Hochtemperaturformen (600–1200 °C).

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC, säure- und laugen-/schmelzbeständig, geeignet für Elektronik-/Glasformung.

Intelligente Überwachung: MEMS/Dehnungsmessstreifen, Echtzeit-Feedback der Arbeitsbedingungen, Optimierungseffizienz um 20 % gesteigert.

Hohe Präzision: reibungsarme Beschichtung + Präzisionsbearbeitung, Formabweichung <±0,005 mm, Qualitätssteigerung von 15 %.

2. Intelligenter Formherstellungsprozess aus Hartmetall

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,2–0,5 μm, Reinheit > 99,95 %), Co/Ni (D50 1–2 μm), Cr3C2/TaC (D50 0,51 μm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 12:1), 350 U/min, 18–22 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,05 μm, Gleichmäßigkeit >98 %.

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 300–350 MPa, Haltedruck 90 Sekunden, Form aus Titanlegierung (Abweichung <±0,03

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm), Rohlingsdichte 9,0–10,5 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung <±0,05 mm, Rissrate <0,5 %.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200–600°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ <3 ppm), 10⁻³ Pa.

Sintern: 1400–1450 °C, 10⁻⁵–10⁻⁶ Pa, 2,53 Stunden.

HIP: 1400 °C, 150 MPa (Ar), 1,52 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 15,0–15,2 g/cm³, Porosität <0,0005 %, Härte 1800–2200 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 µm), 4000 U/min, Vorschub 0,005–0,02 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,01 mm, Ra 0,10,3 µm.

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Hohlraum/Loch (Ø 0,55 mm), Abweichung <±0,005 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 µm), 1000 U/min, Ra < 0,1 µm, Antihafteffizienz um 25 % erhöht.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Cr/Al/Ti-Ziel, >99,99 %).

Parameter: TiAlN / AlCrN /DLC (25 µm), 10⁻⁵ Pa, 250–450 °C, Vorspannung 100 V, Abscheidungsrate 11,5 µm/h.

Ergebnisse: Haftung >100 N, Reibungskoeffizient <0,15, Temperaturbeständigkeit 600–1100°C.

2.6 Intelligente Integration

Sensor: MEMS (Temperatur, Druck, <0,5 mm) oder Dehnungsmessstreifen (NiCr, 0,01 mm), Fehler <±0,5 %.

Verpackung: Laserschweißen (Ti-Hülle, Luftdichtheit <10⁻⁸ Pa·m³ / s), Temperaturbeständigkeit 1000°C, Vibrationsbeständigkeit 50 g.

Datenübertragung: eingebetteter Chip (5G/Bluetooth, Latenz <5 ms, Stromverbrauch <30 mW), unterstützt IIoT-Protokolle (OPC UA, MQTT).

2.7 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,2–0,5 µm), EBSD (Korngrenzenspannung < 3 %).

Leistung: Härteabweichung <±40 HV (ISO 6508), Verschleiß <0,03 mm³ / h, Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/a).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,005 mm), Laserscanning (Hohlraumabweichung < ± 0,003

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte < 0,01 mm), Ultraschall (Risse < 0,005 mm).

Intelligente Prüfung: Temperatur ($\pm 0,5$ °C, IEC 60751), Druck ($\pm 0,1$ MPa, IEC 61298), Dehnung (± 1 $\mu\epsilon$, ASTM E251).

Umwelttests: Thermoschock (ΔT 800 °C, $> 10^5$ Zyklen, ISO 17879), Salzsprühnebel (1000 Stunden, ISO 9227).

3. Anwendungsszenarien von intelligenten Hartmetallformen

Als Antwort auf die hohen Präzisions- und Zuverlässigkeitsanforderungen der intelligenten Fertigung bieten intelligente Hartmetallformen Vorschläge zu Prozessen, Tests und Auswahl:

3.1 Intelligentes Hartmetall-Warmschmiedegesenk für die Automobilindustrie (Kurbelwelle)

Arbeitsbedingungen: 1000–1200 °C, 300 MPa, zyklischer Thermoschock (ΔT 800 °C), 10^5 -faches Formen.

Design

Typ: Schmiedegesenk (Hohlraum 100×50 mm).

Material: WC10%Co (D50 0,2–0,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%), Härte 2000–2200 HV.

Beschichtung: AlCrN (5 μm , PVD, Härte 3400 HV, Temperaturbeständigkeit 1100°C).

Intelligente Komponenten: MEMS (Temperatur $\pm 0,5$ °C, Druck $\pm 0,1$ MPa), eingebettet in die Kavität.

Geometrie: Hohlraumradius R2 mm, Ra < 0,2 μm , Abweichung $< \pm 0,01$ mm.

Verfahren: Kugelmahlen 22 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD AlCrN (450 °C), MEMS-Laserschweißen.

Parameter: Temperatur 1100 °C, Druck 300 MPa, Zyklen 5000 Mal, Abtastrate 1 kHz.

prüfen:

Lebensdauer: 10.000-mal (H13-Stahl 2.000-mal, 5-mal länger).

Verschleißrate: < 0,03 mm³/h, Oxidationsbeständigkeit < 0,01 mg/cm².

Thermischer Riss: Kein Riss (ΔT 800 °C, 5000-mal).

Überwachungsgenauigkeit: Temperatur $\pm 0,5$ °C, Druck $\pm 0,1$ MPa, prognostizierte Wartungsrate um 20 % erhöht.

Auswahl: WCCo+AlCrN+MEMS, geeignet für hohe Temperaturen und hohe Belastungen, regelmäßige NDT.

Vorteile: Hohe Temperaturverschleißfestigkeit, intelligente Überwachung, um 15 % gesteigerte Formeffizienz.

3.2 Intelligente Hartmetallform für die Luftfahrt (Turbinschaufel)

Arbeitsbedingungen: 700–800 °C, 150 MPa, zyklischer Thermoschock (ΔT 500 °C), 10^6 -faches Formen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Design

Typ: Druckgussform (Hohlraum 200×100 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,2–0,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew.-%), Härte 2000–2200 HV.

Beschichtung: TiAlN (4 μm , PVD, Härte 3200 HV, Temperaturbeständigkeit 1050°C).

Intelligente Komponenten: Dehnungsmessstreifen (Dehnung $\pm 1 \mu\epsilon$), eingebettet in die Formoberfläche.

Geometrie: Kavitätsneigung 1°, Ra <0,1 μm , Abweichung $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiAlN (400 °C), Dehnungsmessstreifenmontage.

Parameter: Temperatur 750 °C, Druck 150 MPa, Zyklus 10.000 Mal, Abtastrate 500 Hz.

prüfen:

Lebensdauer: 50.000 Mal (H13-Stahl 10.000 Mal, 5-mal länger).

Verschleißrate: <0,02 mm³/h, Antihafteffizienz um 25 % erhöht.

Thermischer Riss: Kein Riss (ΔT 500 °C, 10.000-mal).

Überwachungsgenauigkeit: Dehnung $\pm 1 \mu\epsilon$, Defekterkennungsrate um 15 % erhöht.

Typ auswählen: WCCo+TiAlN + Dehnungsmessstreifen, geeignet für Hochtemperaturschmelzen, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Antihafteffizienz, intelligentes Feedback, um 10 % gesteigerte Gussqualität.

3.3 Intelligente Form aus Hartlegierung, Form zur elektronischen Glasformung (Handybildschirm)

Arbeitsbedingungen: 1000–1100 °C, 50 MPa, korrosiv (pH 24), 10⁵-faches Formen.

Design

Typ: Druckguss ($\varnothing$ 50 mm, gebogen).

Material: WC10%Ni (D50 0,2–0,5 μm , Cr3C2 0,6 Gew.-%), Härte 2000–2200 HV.

Beschichtung: DLC (3 μm , PVD, Reibungskoeffizient <0,1, Temperaturbeständigkeit 600°C).

Intelligente Komponenten: MEMS (Temperatur $\pm 0,5 \text{ °C}$), eingebettet in einen Formkern.

Geometrie: Oberflächenabweichung $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$, Ra <0,1 μm .

Verfahren: Kugelmahlen 22 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD DLC (300 °C), MEMS-Laserschweißen.

Parameter: Temperatur 1050 °C, Druck 50 MPa, Zyklen 2000 Mal, Abtastrate 2 kHz.

prüfen:

Lebensdauer: 8000-mal (H13-Stahl 1500-mal, 5,3-mal länger).

Verschleißrate: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

Antihafteffizienz: Glasrückstandsrate <1 %, Ra 0,1 μm .

Überwachungsgenauigkeit: Temperatur $\pm 0,5 \text{ °C}$, Qualitätskonstanz um 20 % erhöht.

Typ auswählen: WCNi+DLC+MEMS, geeignet für korrosive Hochtemperaturen, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit, intelligente Überwachung, hohe Formpräzision.

Leistungsvergleich intelligenter Hartmetallformen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Formenstahl (H13)	Keramikform
Härte (HV)	1800-2200	400-600	1200-1500
Biegefestigkeit (GPa)	2,0 - 2,8	1,5 - 2,0	0,5 - 1,0
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	12-20	20-30	35
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,03	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,05 - 0,1	0,01 - 0,03
Temperaturbeständigkeit (°C)	>1000	600-800	1200-1500
Thermoschock (ΔT 800°C)	>10 ⁵ mal	10 ³ - 10 ⁴ mal	10 ² - 10 ³ mal
Lebensdauermultiplikator (im Vergleich zu H13)	35	1	1,52
Reibungskoeffizient (Beschichtung)	<0,15	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4
Überwachungsgenauigkeit	±0,5 %	keiner	keiner

Highlights der intelligenten Hartmetallform:

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß <0,03 mm³/h, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.
Hohe Temperaturbeständigkeit: TiAlN/AlCrN-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für 1200 °C.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC, beständig gegen Glasschmelze, besser als H13-Stahl.

Intelligenz: MEMS/Dehnungsmessstreifen, Echtzeitüberwachung, 20 % Effizienzsteigerung.

Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Smart-Molds

Materialauswahl:

Warmschmieden im Automobilbereich: WC10 % Co + AlCrN, um 15 % erhöhte Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen.

Luftfahrt-Druckguss: WC8%Co+TiAlN, Antihaftwirkung um 25 % erhöht.

Elektronisches Glas: WC10 % Ni + DLC, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Zusätze: Cr₃C₂ 0,6 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härtesteigerung um 6 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1400°C, 150 MPa, Porosität <0,0005 %, Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (24 μm), Abweichung <±0,01 mm, Ra <0,1 μm.

Beschichtung:

TiAlN (4 μm, 400 °C), Hochtemperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

AlCrN (5 μm, 450 °C), Oxidationsbeständigkeit um 20 % erhöht.

DLC (3 μm, 300 °C), Antihaftwirkung um 25 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

EDM: Hohlraumabweichung $< \pm 0,003$ mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Intelligente Integration:

Sensoren: MEMS (Temperatur, Druck), Dehnungsmessstreifen (Dehnung), Fehler $< \pm 0,5$ %.

Datenverarbeitung: Eingebettete Chips, Unterstützung für IIoT, um 20 % erhöhte Rate an vorausschauender Wartung.

Verpackung: Ti-Gehäuse, Luftdichtheit $< 10^{-8}$ Pa·m³ / s, Vibrationsfestigkeit 50 g.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 2^{\circ}\text{C}$, 10^{-6} Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung $< \pm 0,005$ mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 11,5 μm /h, Abweichung $< \pm 0,05$ μm .

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Warmschmieden im Automobilbereich: WCCo+AlCrN, 1000–1200 $^{\circ}\text{C}$, 300–500 MPa.

Luftfahrt-Druckguss: WCCo+TiAlN, 700–800 $^{\circ}\text{C}$, 100–200 MPa.

Elektronisches Glas: WCNi+DLC, 1000–1100 $^{\circ}\text{C}$, 50–100 MPa.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), EBSD (Korngrenzenspannung $< 3\%$).

Leistung: ASTM G65 ($< 0,03$ mm³ / h), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/Jahr), Temperaturbeständigkeit ($> 1000^{\circ}\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm²).

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,005$ mm), Laserscanning (Hohlraumabweichung $< \pm 0,003$ mm).

Smart: IEC 60751 (Temperatur $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), IEC 61298 (Druck $\pm 0,1$ MPa), ASTM E251 (Dehnung ± 1 $\mu\epsilon$).

Umwelt: ISO 17879 (Thermoschock, $> 10^5$ -fach), ISO 9227 (Salzsprühnebel, 1000 Stunden).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität $< 0,01$ %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $< \pm 0,1$ g/cm³.

GB/T 38512015: Festigkeit 2,0–2,8 GPa.

GB/T 79972017: Härte 18002200 HV.

ASTM G65: Verschleißrate $< 0,03$ mm³/h.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

ISO 17879: Thermoschocktest.

ISO 9001: Qualitätsmanagement.

IEC 60751: Genauigkeit von Temperatursensoren.

IEC 61298: Genauigkeit von Drucksensoren.

Durch die Optimierung von ultrafeinkörnigem WC (0,20,5 μm), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew.-%), PVD/CVD-Beschichtung (TiAlN/AlCrN/DLC, 25 μm) und

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

MEMS/Dehnungsmessstreifen-Integration erreicht die intelligente Hartmetallform hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$), hohe Temperaturbeständigkeit ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$) und hochpräzise Überwachung (Fehler $\leq \pm 0,5 \%$). Die Form eignet sich für Warm Schmieden in der Automobilindustrie, Druckguss in der Luftfahrt und das Formen von elektronischem Glas. Sie bietet eine 35-fach erhöhte Lebensdauer ($R_a 0,10,3 \mu\text{m}$) und eine um 1520 % gesteigerte Produktionseffizienz. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und intelligente Integration können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderung liegt jedoch in der hochpräzisen Verarbeitung (Kostensteigerung um 15 %) und der Sensorhaltbarkeit ($> 10^5$ -mal). Intelligente Hartmetallformen sind H13-Stahl- und Keramikformen überlegen und erfüllen die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen der intelligenten Fertigung (ISO 9001).

Anhang:

Hartmetall-Roboterteile

Roboterteile aus Hartmetall bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85 – 92 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 – 10 Gew.-%) oder Ni (6 – 12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie weisen eine hohe Härte (1600 – 2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig) und Schlagzähigkeit ($>10^6$ -fach, ISO 1791) auf. PVD/CVD-Beschichtungen (wie TiN, DLC, AlCrN, 13 μm , Reibungskoeffizient $<0,2$) werden auf der Oberfläche aufgetragen, um Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Reibungsverhalten zu verbessern. Die Komponenten werden in Industrierobotern (Gelenke, Greifer, Zahnräder), Servicerobotern (Gehäuse, Getriebeteile) und Spezialrobotern (Tiefsee, Luft- und Raumfahrt) eingesetzt und sind hohen Belastungen (100 – 1000 N), hochfrequenten Bewegungen (10^5 – 10^7 Zyklen) und extremen Umgebungen (40°C bis 800°C , Salznebel, Sand und Staub) ausgesetzt. Die Lebensdauer ist 510-mal höher als bei herkömmlichen Materialien (wie Edelstahl, Aluminiumlegierung, 200 – 600 HV), und die Oberflächenrauheit beträgt Ra 0,05 – 0,2 μm .

Basierend auf Standards (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 1791, ISO 9001) bietet dieser Artikel Vorschläge zu Design, Prozess, Leistung, Anwendung und Optimierung von Roboterkomponenten aus Hartmetall.

1. Eigenschaften von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

1.1 Materialzusammensetzung von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

Matrix:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn (D50 0,1 – 0,4 μm), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 – 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 1015 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), Schlagzähigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 612 Gew.-% (optional), Korrosionsbeständigkeit (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ mm/Jahr}$), Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen.

Zusatzstoffe: Cr3C2 (0,2–0,5 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 5 %;

TaC (0,1–0,3 Gew.-%), erhöht die antioxidativen Eigenschaften um 10 %.

Beschichtung:

TiN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 800°C , Verschleißfestigkeit.

DLC (PVD): Härte 2500 – 3000 HV, Reibungskoeffizient $<0,1$, Temperaturbeständigkeit 600°C , antiadhäsiv.

AlCrN (PVD): Härte 3000 – 3400 HV, Temperaturbeständigkeit 1100°C , Korrosionsbeständigkeit.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12 Gew. %), 20 % höhere Verschleißfestigkeit, 15 % höhere Rissbeständigkeit.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Leistungsparameter von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1015 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 212, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >800°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).

Stoßfestigkeit: >10⁶-fach (ISO 1791, 100 N Belastung).

Reibungskoeffizient: <0,2 (Beschichtung), Antihaftwirkung um 25 % erhöht.

Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 µm, Bewegungsstabilität um 20 % erhöht.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeiner Körnung, Lebensdauer um das 510-fache erhöht, Wartungsaufwand um 30 % reduziert.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC/AlCrN, beständig gegen Salzsprühnebel/Chemikalien, geeignet für Meeres-/Chemieumgebungen.

Hohe Temperaturbeständigkeit: AlCrN-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für den Hochtemperaturbetrieb (800 °C, Schweißroboter).

Schlagfestigkeit: Co/Ni mit hoher Zähigkeit, widersteht hochfrequenten Bewegungen (> 10⁶-mal), besser als Aluminiumlegierung.

Geringe Reibung: DLC/TiN-Beschichtung, Reibungskoeffizient <0,2, Bewegungseffizienz um 15 % erhöht.

2. Herstellungsprozess von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,1 - 0,4 µm, Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 µm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 µm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,03 µm, Gleichmäßigkeit >99 %.

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkokille (Abweichung < ± 0,02 mm), Knüppeldichte 8,5 – 10,0 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung <±0,03 mm, Rissrate <0,3 %.

2.3 Sintern

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

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350 °C, 120 MPa (Ar), 11,5 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 14,8 – 15,0 g/cm³, Porosität <0,0003 %, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,005 mm, Ra 0,050,2 µm .

EDM: Funkenerosion, Schlitz/Loch (Ø 0,21 mm), Abweichung <±0,003 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 µm), 1200 U/min, Ra <0,05 µm, Reibungskoeffizient um 10 % reduziert.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Ti/Cr/Al-Ziel, >99,99 %).

Parameter: TiN /DLC/ AlCrN (13 µm), 10⁻⁵ Pa, 200–400 °C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,51 µm/h.

Ergebnisse: Haftung >80 N, Reibungskoeffizient <0,2, Temperaturbeständigkeit 600 – 1100°C.

2.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngrenzenspannung <2%).

Leistung: Härteabweichung <±30 HV (ISO 6508), Verschleiß <0,02 mm³ / h, Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/a).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte < 0,005 mm), Ultraschall (Risse < 0,003 mm).

Umweltprüfungen: ISO 9227 (Salzsprühnebel, 1000 Stunden), ISO 1791 (Schock, >10⁶-fach).

3. Anwendungsszenarien von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

Hartmetall-Roboterkomponenten bieten Prozess-, Test- und Auswahlvorschläge für hohe Belastungen, hochfrequente Bewegungen und extreme Umgebungen:

3.1 Hartmetall- Maschinenroboterteile Industrierobotergelenke (Schweißroboter)

Betriebsbedingungen: 800°C, 500 N Belastung, 10⁶ Umdrehungen, trockene Umgebung .

Design

Typ: Kugelgelenk (Ø 20 mm, Dicke 5 mm).

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

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 Gew.-%, TaC 0,2 Gew.-%), Härte 1900 HV.
Beschichtung: AlCrN (2 μm , PVD, Temperaturbeständigkeit 1100°C, Härte 3400 HV).
Geometrie: Rundheit $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,1$ μm .
Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD AlCrN (400 °C).
Parameter: Belastung 500 N, Drehzahl 100 U/min, Temperatur 800°C.
prüfen:
Lebensdauer: 2×10^6 -mal (3×10^5 -mal bei Edelstahl, 6,7-mal länger).
Verschleißrate: $< 0,01$ mm³/h, Reibungskoeffizient $< 0,15$.
Hohe Temperaturbeständigkeit: 800 °C, 500 Stunden, keine Oxidation.
Stoßfestigkeit: 500 N, 10^6 -fach, keine Risse.
Auswahl: WCCo+AlCrN, geeignet für hohe Temperaturen und hohe Belastungen, regelmäßige NDT.
Vorteile: Hohe Temperaturverschleißfestigkeit, um 20 % erhöhte Bewegungsstabilität.

3.2 Hartmetall- Maschinenroboterteile Serviceroboter Greifer (Logistikroboter)

Bedingungen: 20 °C bis 60 °C, 200 N Belastung, 10^{-7} Griffe, feuchte Umgebung (85 % relative Luftfeuchtigkeit).
Design
Typ: Greiferzähne (10×5 mm, Dicke 2 mm).
Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,4 Gew. %), Härte 1700 HV.
Beschichtung: DLC (1,5 μm , PVD, Reibungskoeffizient $< 0,1$, Temperaturbeständigkeit 600°C).
Geometrie: Zahnkopfabweichung $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,05$ μm .
Verfahren: Kugelmahlen 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), EDM, PVD DLC (250 °C).
Parameter: Last 200 N, Greiffrequenz 1 Hz, Luftfeuchtigkeit 85 % RH.
prüfen:
Lebensdauer: $1,5 \times 10^7$ -mal (2×10^6 -mal bei Aluminiumlegierung, 7,5-mal länger).
Verschleißrate: $< 0,02$ mm³/h, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01$ mm/Jahr.
Antihafteffekt: Greiffehlerrate < 1 %, Reibungskoeffizient $< 0,1$.
Feuchtigkeitsbeständigkeit: 85 % relative Luftfeuchtigkeit, 1000 Stunden, keine Korrosion.
Auswahl: WCNi+DLC, geeignet für Hochfrequenz in feuchter Umgebung, regelmäßige Reinigung.
Vorteile: geringe Reibung, Korrosionsbeständigkeit, 15 % höhere Greifeffizienz.

3.3 Hartmetall- Maschinenroboterteile Spezielle Roboterzahnräder (Tiefseeroboter)

Bedingungen: 40 °C bis 100 °C, 1000 N Last, 10^6 Zyklen, Meerwasser (pH 8).
Design
Typ: Stirnrad (Ø 30 mm, Modul 2).
Werkstoff: WC8%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,4 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härte 1800 HV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtung: TiN (2 μm , PVD, Temperaturbeständigkeit 800°C, Härte 2400 HV).
Geometrie: Zahnprofilabweichung $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.
Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiN (300 °C).
Parameter: Belastung 1000 N, Übertragungsgeschwindigkeit 50 U/min, Druck 100 MPa.
prüfen:
Lebensdauer: 2×10^6 -mal (Edelstahl 4×10^5 -mal, 5-mal länger).
Verschleißrate: $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/Jahr}$.
Seewasserbeständigkeit: pH 8, 1000 Stunden, keine Korrosion.
Stoßfestigkeit: 1000 N, 10^6 -fach, kein Bruch.
Auswahl: WCNi+TiN, geeignet für Tiefseehochdruck, regelmäßige NDT.
Vorteile: Korrosions- und Verschleißbeständigkeit, um 20 % erhöhte Getriebestabilität.

Leistungsvergleich von Hartmetall-Maschinenroboterteilen

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Edelstahl (316L)	Aluminiumlegierung (7075)
Härte (HV)	1600 - 2000	200 - 300	150 - 200
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,5 – 0,8	0,50,7
Zähigkeit (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	10 - 15	50 - 70	20 - 30
Verschleißfestigkeit (mm^3/h)	$< 0,02$	0,20,5	0,30,6
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr , pH 212)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,1 - 0,2
Temperaturbeständigkeit (°C)	> 800	300 - 500	100 - 200
Stoßfestigkeit (Stoßfestigkeit, 100 N)	$> 10^6$	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Aluminiumlegierungen)	5 - 10	dreiundzwanzig	1
Reibungskoeffizient (Beschichtung)	$< 0,2$	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6

der Hartmetall- Maschinenroboterteile:

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, Lebensdauer um das 510-fache erhöht.
Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + DLC/TiN, beständig gegen Seewasser/Salznebel, besser als Edelstahl.
Hohe Temperaturbeständigkeit: AlCrN-Beschichtung, Antioxidationsmittel, besser als Aluminiumlegierung.
Geringe Reibung: DLC-Beschichtung, Reibungskoeffizient $< 0,1$, hohe Bewegungseffizienz.

5. Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Maschinenroboterteile

Materialauswahl:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schweißverbindung: WC8 % Co + AlCrN, um 15 % erhöhte Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen.

Logistikgreifer: WC10%Ni+DLC, Antihafte Wirkung um 20 % erhöht.

Tiefseegetriebe: WC8 % Ni + TiN, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

Zusätze: Cr3C2 0,4 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härtesteigerung um 5 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 µm), Abweichung <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

Beschichtung:

AlCrN (2 µm, PVD), Hochtemperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

DLC (1,5 µm, PVD), Reibungskoeffizient um 10 % reduziert.

TiN (2 µm, PVD), Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

EDM: Schlitzabweichung <±0,002 mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,003 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 0,51 µm/h, Abweichung <±0,03 µm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Schweißroboter: WCCo+AlCrN, 800°C, 500 N, trockene Umgebung.

Logistikroboter: WCNi+DLC, 20°C bis 60°C, 200 N, feuchte Umgebung.

Tiefseeroboter: WCNi+TiN, 40°C bis 100°C, 1000 N, Meerwasser.

6. Inspektion und Überprüfung von Hartmetall-Maschinenroboterteilen:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korn grenzenspannung <2%).

Leistung: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), Temperaturbeständigkeit (>800°C, <0,01 mg/cm²).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Umwelt: ISO 9227 (Salzsprühnebel, 1000 Stunden), ISO 1791 (Stoß, >10⁶-fach).

Normen und Spezifikationen für Hartmetall-Maschinenroboterteile

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung <±0,1 g/cm³.

GB/T 38512015: Festigkeit 1,8 – 2,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1600 – 2000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate <0,02 mm³/h.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 1791: Schlagprüfung.

ISO 9001: Qualitätsmanagement.

Durch die Optimierung von ultrafeinkörnigem WC (0,1 - 0,4 μm), Co/Ni-Bindungsphase (6 - 12 Gew.-%) und PVD/CVD-Beschichtung (TiN/DLC/AlCrN, 13 μm) erreichen Roboterteile aus Hartmetall eine hohe Härte (1600 - 2000 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$) und Schlagfestigkeit ($>10^6$ -fach). Die Teile eignen sich für Industrierobotergetriebe, Servicerobotergriffe und spezielle Robotergetriebe und haben eine Lebensdauer von 510-fach, Ra 0,05 - 0,2 μm und eine um 15 % gesteigerte Bewegungseffizienz. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und EDM-Genauigkeit lassen sich Kosten senken. Die Herausforderungen liegen jedoch in der ultrapräzisen Bearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und den Tests unter extremen Bedingungen ($> 10^6$ -fach). Hartmetall ist Edelstahl und Aluminiumlegierungen überlegen und erfüllt die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen von Robotern (ISO 9001).

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

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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:

Hartmetall-Luftfahrtsensor

Luftfahrtsensoren aus Hartmetall bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85 – 92 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 – 10 Gew.-%) oder Ni (6 – 12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie verfügen über eine hohe Härte (1600 – 2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800^\circ\text{C}$, oxidationshemmend) und Vibrationsfestigkeit ($>10^6$ -fach, MILSTD810G). Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (wie TiN, Al_2O_3 , $13 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,2$) oder einer Funktionsbeschichtung (Au, Ag, $0,52 \mu\text{m}$, Leitfähigkeit $>90 \%$ IACS) versehen, um Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektrische Eigenschaften zu verbessern. Der Sensor wird in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt (wie Motorüberwachung, Flugsteuerung, Strukturüberwachung), widersteht extremen Umgebungen (55°C bis 800°C , 10100 g Vibration, 10^5 10^7 Zyklen), bietet hochpräzise Daten (Fehler $\pm 0,5 \%$) und hat eine 510-mal längere Lebensdauer als herkömmliche Materialien (wie Edelstahl, Titanlegierung, $400 - 600 \text{ HV}$) bei einer Oberflächenrauheit von $\text{Ra } 0,05 - 0,2 \mu\text{m}$.

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100) bietet dieser Artikel Technologie, Leistung, Anwendung und Optimierungsvorschläge für Luftfahrtsensoren aus Hartmetall.

1. Eigenschaften von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

1.1 Materialzusammensetzung von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

Matrix:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($\text{D}_{50} 0,1 - 0,4 \mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 10 - 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), Vibrationsfestigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 6 - 12 Gew. % (optional), Korrosionsbeständigkeit (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/a}$), Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen.

Zusatzstoffe: Cr_3C_2 (0,2 – 0,5 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 5 %;

TaC (0,10,3 Gew.-%), erhöht die antioxidativen Eigenschaften um 10 %.

Beschichtung:

TiN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 800°C , Verschleißfestigkeit.

Al_2O_3 (CVD): Härte 1800 - 2200 HV, Temperaturbeständigkeit 1000°C , Korrosionsbeständigkeit.

Au/Ag (PVD): Leitfähigkeit $>90 \%$ IACS, Temperaturbeständigkeit $500 - 600^\circ\text{C}$, Antioxidationsmittel.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12 Gew. %), Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht, Rissbeständigkeit um 15 % erhöht.

1.2 Leistungsparameter von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).
Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).
Bruchzähigkeit: 1015 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).
Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).
Korrosionsbeständigkeit: pH 212, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).
Hohe Temperaturbeständigkeit: >800°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).
Vibrationsfestigkeit: >10⁶-fach (10100 g, MILSTD810G).
Elektrische Leitfähigkeit: >90 % IACS (Au/Ag-Beschichtung, IEC 6051221).
Messgenauigkeit: Fehler <±0,5 % (Temperatur, Druck, Dehnung).
Oberflächenrauheit: Ra 0,050,2 µm, Signalstabilität um 20 % erhöht.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, die Lebensdauer wird um das 510-fache erhöht und die Ausfallrate um 30 % reduziert.
Hohe Temperaturbeständigkeit: TiN/Al₂O₃-Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für Hochtemperaturumgebungen (800 °C, Motor).
Korrosionsbeständigkeit: Auf Ni-Basis + Al₂O₃, beständig gegen Flugbenzin/Salzsäurenebel, geeignet für raue Umgebungen.
Vibrationsfestigkeit: Co/Ni mit hoher Zähigkeit, widersteht hochfrequenten Vibrationen (> 10⁶-mal), besser als Titanlegierung.
Hohe Präzision: reibungsarme Beschichtung + Präzisionsbearbeitung, Datenfehler <±0,5 %, Signaldämpfung um 15 % reduziert.

2. Herstellungsprozess von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,1 - 0,4 µm, Reinheit >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 µm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 µm).
Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 1620 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,03 µm, Gleichmäßigkeit >99 %.

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.
Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkokille (Abweichung < ± 0,02 mm), Knüppeldichte 8,5 – 10,0 g/cm³.
Ergebnisse: Maßabweichung <±0,03 mm, Rissrate <0,3 %.

2.3 Sintern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ 10⁻⁶ Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Ergebnisse: Dichte 14,8 – 15,0 g/cm³, Porosität <0,0003 %, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,005 mm, Ra 0,05 – 0,2 µm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Mikroloch/-schlitz (Ø 0,1–0,5 mm), Abweichung <±0,003 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 µm), 1200 U/min, Ra <0,05 µm, Signalstabilität um 10 % erhöht.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Ti/Al/Au/Ag-Ziele, >99,99 %).

Parameter: TiN / Al₂O₃ /Au/Ag (13 µm) , 10⁻⁵Pa , 200400 ° C, Bias 80 V, Abscheiderate 0,51 µm / h .

Ergebnisse: Haftung >80 N, Reibungskoeffizient <0,2, Leitfähigkeit >90 % IACS.

2.6 Sensorintegration

Sensorelemente: MEMS (auf Siliziumbasis, Größe <0,5 mm) oder Dehnungsmessstreifen (NiCr, 0,01 mm dick), die Temperatur (±0,5 °C), Druck (±0,1 MPa) und Dehnung (±1 µε) überwachen.

Verpackung: Laserschweißen (Ti-Hülle, Luftdichtheit <10⁻⁸ Pa·m³/s), Temperaturbeständigkeit 800°C, Vibrationsbeständigkeit 100 g.

Datenübertragung: 5G/Bluetooth-Modul, Latenz <5 ms, Stromverbrauch <30 mW.

2.7 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngrenzenspannung <2%).

Leistung: Härteabweichung <±30 HV (ISO 6508), Verschleiß <0,02 mm³ / h, Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/a).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (Defekte < 0,005 mm), Ultraschall (Risse < 0,003 mm).

Umwelttests: MILSTD810G (55 °C bis 800 °C, 100 g Vibration, 10⁶ Zyklen).

Elektrische Eigenschaften: Leitfähigkeit > 90 % IACS, Signalfehler < ± 0,5 % (IEC 6051221).

3. Anwendungsszenarien von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

Carbide-Luftfahrtsensoren liefern Prozess-, Test- und Auswahlvorschläge für extreme

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungen und hohe Präzisionsanforderungen:

3.1 Carbide Aviation Sensor Motorüberwachung (Temperatur-/Drucksensor)

Bedingungen: 800 °C, 50 MPa, 100 g Vibration, Flugbenzinumgebung, 10^6 Zyklen.

Design

Typ: MEMS-Druck-/Temperatursensor (Ø 10 mm, Dicke 2 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,3 Gew.-%, TaC 0,2 Gew.-%), Härte 1900 HV.

Beschichtung: Al₂O₃ (2 µm, CVD, Temperaturbeständigkeit 1000°C, korrosionsbeständig).

Geometrie: Planaritätsabweichung $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ µm.

Prozesse: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, CVD Al₂O₃ (400 °C), MEMS-Integration, Laserschweißen.

Parameter: Temperatur 800 °C, Druck 50 MPa, Vibration 100 g, Abtastrate 1 kHz.

prüfen:

Lebensdauer: 2×10^6 -mal (Titanlegierung 3×10^5 -mal, 6,7-mal länger).

Verschleißrate: $< 0,01$ mm³/h, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01$ mm/Jahr.

Genauigkeit: Temperaturfehler $\pm 0,5$ °C, Druckfehler $\pm 0,1$ MPa.

Vibrationsfestigkeit: 100 g, 10^6 -fach, kein Ausfall.

Auswahl: WCCo+Al₂O₃, geeignet für hohe Temperaturen und hohen Druck, normale NDT.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, hohe Präzision und 10 % höhere Motoreffizienz.

3.2 Strukturelle Zustandsüberwachung von Hartmetall-Luftfahrtsensoren (Dehnungssensoren)

Betriebsbedingungen: 55 °C bis 200 °C, 10 g Vibration, Salzsprühnebel (5 % NaCl), 10^7 Zyklen.

Design

Typ: Dehnungsmessstreifensensor (5×3 mm, Dicke 0,5 mm).

Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,4 Gew %), Härte 1700 HV.

Beschichtung: TiN (1 µm, PVD, temperaturbeständig bis 800°C, verschleißfest).

Geometrie: Oberflächenabweichung $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ µm.

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), EDM, PVD TiN (250 °C), Dehnungsmessstreifenmontage, Laserschweißen.

Parameter: Dehnung ± 5000 µε, Vibration 10 g, Abtastrate 500 Hz.

prüfen:

Lebensdauer: $1,5 \times 10^7$ -mal (Edelstahl 2×10^6 -mal, 7,5-mal länger).

Verschleißverlust: $< 0,02$ mm³/h, Salzsprühnebelbeständigkeit 1000 Stunden, Beständigkeitssteigerung $< 5\%$.

Genauigkeit: Dehnungsfehler ± 1 µε, Signaldämpfung $< 0,1$ %.

Vibrationsfestigkeit: 10 g, 10^7 -fach, kein Ausfall.

Auswahl: WCNi+TiN, geeignet für Korrosion bei niedrigen Temperaturen, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Anti-Vibrationskorrosion, geeignet für die Flügel-/Rumpfüberwachung, Sicherheit um 15 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhöht.

3.3 Carbide Aviation Sensor Flugsteuerung (Magnetsensor)

Betriebsbedingungen: 40 °C bis 150 °C, 20 g Vibration, trockene Umgebung, 10⁶ Zyklen.
Design
Typ: Hall-Effekt-Magnetsensor (Ø 3 mm, Dicke 1 mm).
Material: WC8%Co1%Ag (D50 0,10,4 µm, Cr3C2 0,3 Gew. %), Härte 1800 HV.
Beschichtung: Au (0,5 µm, PVD, Leitfähigkeit >95 % IACS, Temperaturbeständigkeit 600 °C).
Geometrie: Rundheit <±0,002 mm, Ra <0,05 µm.
Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD Au (200 °C), Hall-Element-Integration, Laserschweißen.
Parameter: Magnetfeld 0500 mT, Vibration 20 g, Abtastrate 2 kHz.
prüfen:
Lebensdauer: 2×10⁶-mal (Titanlegierung 4×10⁵-mal, 5-mal länger).
Verschleißverlust: <0,01 mm³/h, Übergangswiderstand <8 µΩ.
Genauigkeit: Magnetfeldfehler ±0,1 mT, Signalstabilität ±0,5 %.
Vibrationsfestigkeit: 20 g, 10⁶-fach, kein Ausfall.
Auswahl: WCCo+Au, geeignet für trockene Umgebungen mit hoher Leitfähigkeit, regelmäßige Widerstandserkennung.
Vorteile: Hochpräzise Leitfähigkeit, geeignet für Navigation/Lageregelung und 20 % höhere Zuverlässigkeit.

4. Leistungsvergleich von Hartmetall-Luftfahrtsensoren

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Titanlegierung (Ti6Al4V)	Edelstahl (316L)
Härte (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0,20,5
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Temperaturbeständigkeit (°C)	>800	400 - 600	3005-00
Vibrationsfestigkeit (mal, 100 g)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Edelstahl)	5 - 10	dreiundzwanzig	1
Elektrische Leitfähigkeit (% IACS)	>90	12	dreiundzwanzig

Highlights der Carbide Aviation Sensoren:

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß <0,02 mm³/h, Lebensdauer um das 510-fache erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperaturbeständigkeit: TiN/Al₂O₃-Beschichtung, Oxidationsschutz, besser als Titanlegierung.
Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + Al₂O₃, beständig gegen Salzsprühnebel/Kraftstoff, besser als Edelstahl.

Hohe Präzision: geringe Reibung + Präzisionsbearbeitung, Fehler <±0,5 %, besser als herkömmliche Materialien.

5. Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Luftfahrtsensoren

Materialauswahl:

Motorüberwachung: WC8%Co+Al₂O₃, Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

Überwachung der strukturellen Integrität: WC10 % Ni + TiN, Vibrationskorrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Flugsteuerung: WC8 % Co + Au, Leitfähigkeit > 95 % IACS, Genauigkeit um 10 % erhöht.

Zusätze: Cr₃C₂ 0,4 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härtesteigerung um 5 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 µm), Abweichung <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

Beschichtung:

Al₂O₃ (2 µm, CVD), Hochtemperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

TiN (1 µm, PVD), Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

Au (0,5 µm, PVD), Kontaktwiderstand um 10 % reduziert.

EDM: Mikrolochabweichung <±0,002 mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,003 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 0,51 µm/h, Abweichung <±0,03 µm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Motor: WCCo + Al₂O₃, 800 °C, 50 MPa, 100 g Vibration.

Strukturüberwachung: WCNi+TiN, 55°C bis 200°C, 10 g Vibration, Salzsprühnebel.

Flugsteuerung: WCCo+Au, 40 °C bis 150 °C, 20 g Vibration, trockene Umgebung.

6. Prüfung und Verifizierung von Luftfahrtsensoren aus Hartlegierungen:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korn grenzenspannung <2%).

Leistung: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr),

Temperaturbeständigkeit (>800°C, <0,01 mg/cm²).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Umgebung: MILSTD810G (55 °C bis 800 °C, 100 g, 10⁻⁶-fach).

Elektrische Eigenschaften: Leitfähigkeit > 90 % IACS, Fehler < ± 0,5 % (IEC 6051221).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Normen und Spezifikationen für Luftfahrtsensoren aus Hartlegierungen

GB/T 183762014: Porosität $<0,01\%$.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $<\pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Festigkeit 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 16002000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate $<0,02\text{ mm}^3/\text{h}$.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

MILSTD810G: Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen (Vibration, Temperatur, Korrosion).

AS9100: Qualitätsmanagement für die Luft- und Raumfahrt.

IEC 6051221: Kontaktwiderstand $<10\text{ }\mu\Omega$.

Durch die Optimierung von ultrafeinkörnigem WC ($0,10,4\text{ }\mu\text{m}$), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew.-%), PVD-/CVD-Beschichtung ($\text{TiN/Al}_2\text{O}_3/\text{Au}$, $13\text{ }\mu\text{m}$) und MEMS/Dehnungsmessstreifen-Integration erreichen Hartmetall-Luftfahrtsensoren hohe Härte (1600–2000 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,02\text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01\text{ mm/Jahr}$), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800\text{ }^\circ\text{C}$) und hohe Präzision (Fehler $<\pm 0,5\%$). Der Sensor eignet sich für die Triebwerksüberwachung, die Strukturzustandsüberwachung und die Flugsteuerung. Er bietet eine um das 510-fache erhöhte Lebensdauer, $R_a\ 0,050,2\text{ }\mu\text{m}$ und eine um 20 % erhöhte Datenzuverlässigkeit. Durch Optimierung der Korngröße, Beschichtungsdicke und MEMS-Integration können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen jedoch in der Ultrapräzisionsbearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und den Tests unter extremen Bedingungen ($>10^6$ -fach). Hartmetall ist Titanlegierungen und Edelstahl überlegen und erfüllt die strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (AS9100, MILSTD810G).

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:

Intelligente Hartmetall-Schneidwerkzeuge

Intelligente Hartmetallwerkzeuge bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (88 – 94 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 – 10 Gew.-%) oder Ni (6 – 12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie weisen eine hohe Härte (1800 – 2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}) und hohe Temperaturbeständigkeit ($>1000^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig) auf. Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (wie DLC, TiAlN, AlCrN, 25 μm , Reibungskoeffizient $<0,15$) überzogen, mit intelligenter Sensorik (Temperatur, Verschleiß, Spannung) und adaptiver Steuerung (Optimierung der Schnittparameter) ausgestattet, wodurch die Bearbeitungseffizienz um 20 – 30 % verbessert wird. Die Lebensdauer ist 35-mal länger als bei herkömmlichen Werkzeugen (Edelstahl, 400 – 600 HV), mit einer Oberflächenrauheit von Ra 0,10,2 μm . Das Werkzeug wird für die Hochpräzisionsbearbeitung (Luftfahrt, Automobil, Formenbau) verwendet und eignet sich für Hochgeschwindigkeitsschneiden (1000 – 5000 U/min), Trocken-/Nassschneiden und schwer zu bearbeitende Materialien (Titanlegierung, Nickelbasislegierung). Dieser Artikel basiert auf Normen (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 6508) und bietet intelligente Hartmetallwerkzeuge, Prozesse, Leistung, Anwendungen und Optimierungsvorschläge.

1. Merkmale intelligenter Hartmetallwerkzeuge

1.1 Intelligente Hartmetall-Werkzeugmaterialzusammensetzung

Matrix:

WC: 88 – 94 Gew.-%, ultrafeines Korn (D50 0,2 – 0,5 μm), Härte 1800 – 2200 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 15 - 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), Verschleißfestigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 6 - 12 Gew. % (optional), korrosionsbeständig (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/a}$), schlagzäh ($K_{IC} 12 - 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Zusatzstoffe: Cr3C2 (0,3 – 0,6 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %;

TaC (0,1 – 0,3 Gew.-%), erhöht die antioxidativen Eigenschaften um 10 %.

Beschichtung:

DLC (PVD): Härte 3000 – 3500 HV, Reibungskoeffizient $<0,1$, Temperaturbeständigkeit 600°C , antiadhäsiv.

TiAlN (PVD/CVD): Härte 2800 – 3200 HV, Temperaturbeständigkeit 1050°C , Erosionsbeständigkeit.

AlCrN (PVD): Härte 3000 – 3400 HV, Temperaturbeständigkeit 1100°C , Hochtemperaturverschleißfestigkeit.

Gradientenstruktur: wenig Co/Ni an der Oberfläche (6 – 8 Gew. %), viel Co/Ni im Kern (10 – 12 Gew. %), Verschleißfestigkeit um 25 % erhöht, Rissbeständigkeit um 20 % erhöht.

1.2 Intelligente Funktionen des intelligenten Hartmetallwerkzeugs

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sensoren: Eingebettete Mikrosensoren (MEMS, Größe < 0,5 mm) überwachen Temperatur (± 1 °C, 0500 °C), Verschleiß ($\pm 0,01$ mm), Spannung (± 5 MPa).

Datenübertragung: Bluetooth/5G-Modul, Echtzeitübertragung zum CNC-System, Verzögerung <10 ms.

Adaptive Steuerung: KI-Algorithmus (Maschinelles Lernen, basierend auf Verschleiß-/Temperaturdaten) passt Schnittgeschwindigkeit (± 10 %) und Vorschubgeschwindigkeit (± 15 %) dynamisch an und optimiert so die Effizienz um 20 – 30 %.

Lebensdauervorhersage: Basierend auf dem Verschleißmodell (Archard-Modell) wird die verbleibende Lebensdauer vorhergesagt (± 5 % Fehler), wodurch die Ausfallzeit um 30 % reduziert wird.

1.3 Leistungsparameter intelligenter Hartmetallwerkzeuge

Härte: 1800 – 2200 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 2,0 – 2,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: $1220 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (Co-basiert 1520, Ni-basiert 1215).

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,03 mm³/h (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 212, <0,01 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperaturbeständigkeit: >1000°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 1000 Stunden).

Reibungskoeffizient: <0,15 (Beschichtung), Antihaftwirkung um 30 % erhöht.

Oberflächenrauheit: Ra 0,10, 0,2 µm, Qualität der Bearbeitungsoberfläche um 15 % verbessert.

1.4 Vorteile intelligenter Hartmetallwerkzeuge

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, die Lebensdauer wird um das 35-fache erhöht, die Schneidleistung wird um 20 % gesteigert.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-Basiswerkzeuge sind beständig gegen Säuren und Laugen (HCl, SO₄²⁻) und eignen sich zum Nassschneiden.

Hohe Temperaturbeständigkeit: TiAlN/AlCrN-Beschichtung, beständig gegen thermische Rissbildung, geeignet für Hochgeschwindigkeits-Trockenschneid.

Intelligenz: Echtzeitüberwachung + adaptive Steuerung, wodurch die Ausschussrate um 15 % reduziert und Energie um 1020 % gespart wird.

2. Intelligenter Herstellungsprozess von Hartmetallwerkzeugen

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,2 – 0,5 µm, Reinheit >99,95 %), Co/Ni (D50 12 µm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,5 – 1 µm).

Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 12:1), 350 U/min, 1822 Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,05 µm, Gleichmäßigkeit >98 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 300 – 350 MPa, Haltedruck 90 Sekunden, Form aus Titanlegierung (Abweichung $< \pm 0,03$ mm), Barrendichte $9,0 - 10,5$ g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,05$ mm, Rissrate $< 0,5$ %.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 600°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ < 3 ppm), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1400 - 1450°C, $10^{-5} - 10^{-6}$ Pa, 2,53 Stunden.

HIP: 1400 °C, 150 MPa (Ar), 1,52 Stunden.

Ergebnisse: Dichte $15,0 - 15,2$ g/cm³, Porosität $< 0,0005$ %, Härte 1800 – 2200 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 µm), 4000 U/min, Vorschub $0,005 - 0,02$ mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,01$ mm, Ra $0,10,2$ µm .

EDM: Funkenerosion, Schlitz/Loch (Ø 0,52 mm), Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 µm), 1000 U/min, Ra $< 0,1$ µm, Antihaftwirkung um 25 % erhöht.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Cr/Al/Ti-Ziel, $> 99,99$ %).

Parameter: DLC/ TiAlN / AlCrN (25 µm), 10^{-5} Pa, 250 - 450°C, Bias 100 V, Abscheiderate $11,5$ µm /h.

Ergebnisse: Haftung > 100 N, Reibungskoeffizient $< 0,15$, Temperaturbeständigkeit 600 – 1100°C.

2.6 Intelligente Integration

Sensoreinbettung: Lasermikrobearbeitung (Grabentiefe 0,51 mm), Implantation von MEMS-Sensoren (Temperatur, Spannung, Verschleiß), Epoxidharzversiegelung (Temperaturbeständigkeit 500°C).

Schaltungsintegration: Dünnschichtschaltungen (0,1 mm dick), 5G-/Bluetooth-Module, Stromverbrauch ≤ 50 mW.

Software: KI-Algorithmus (Python, TensorFlow), Echtzeioptimierung der Schnittparameter, Datenspeicherung in der Cloud (Verschlüsselung, AES256).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.7 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), EBSD (Korngrenzenspannung <3%).

Leistung: Härteabweichung $<\pm 40$ HV (ISO 6508), Verschleiß $<0,03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, Korrosionsbeständigkeit (pH 212, $<0,01 \text{ mm/a}$).

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,005 \text{ mm}$), Laserscanning (Kantenradius $< \pm 0,003 \text{ mm}$).

Smarte Funktionen: Sensorgenauigkeit (Temperatur $\pm 1^\circ\text{C}$, Verschleiß $\pm 0,01 \text{ mm}$), Übertragungsverzögerung $<10 \text{ ms}$.

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte $< 0,01 \text{ mm}$), Ultraschall (Risse $< 0,005 \text{ mm}$).

3. Intelligente Hartmetallwerkzeuge – Anwendungsszenarien für intelligente Reaktionen

Intelligente Hartmetallwerkzeuge liefern hochpräzise Bearbeitungs-, Prozess-, Prüf- und Auswahlvorschläge:

3.1 Luft- und Raumfahrt (Verarbeitung von Titanlegierungen)

Arbeitsbedingungen: Ti6Al4V, 2000 U/min, 200°C , Trockenschneid, Schnitttiefe 12 mm.

Typ: Fräser ($\varnothing 20 \text{ mm}$, 4 Schneiden).

Material: WC8%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: TiAlN (4 μm , Härte 3200 HV, Reibung 0,12, Temperaturbeständigkeit 1050°C).

Intelligenz: MEMS-Sensoren (Temperatur, Verschleiß), KI-Optimierung (Schnittgeschwindigkeit $\pm 10 \%$).

Geometrie: Schneidenwinkel 15° , Schneidenradius $<0,01 \text{ mm}$, $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiAlN (400°C), Sensor-Lasereinbettung.

Parameter: Drehzahl 2000 U/min, Vorschub 0,1 mm/U, Schnitttiefe 1,5 mm.

prüfen:

Lebensdauer: 800 Stunden (200 Stunden bei herkömmlichen Werkzeugen, 4-mal länger).

Verschleißverlust: $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, Oberflächengüte $R_a 0,2 \mu\text{m}$.

Effizienz: Bearbeitungszeit um 25 % reduziert, Ausschussrate um 15 % gesenkt.

Intelligent: Temperaturregelung $<200^\circ\text{C}$, Verschleißvorhersage $\pm 5\%$.

Auswahl: WCCo+TiAlN, geeignet für hohe Temperaturen, hohe Härte, Trockenschneiden und normale NDT.

Vorteile: Hohe Temperaturbeständigkeit, intelligente Optimierung und 20 % Effizienzsteigerung.

3.2 Automobilform (Schnellarbeitsstahlverarbeitung)

Arbeitsbedingungen: H13-Stahl, 3000 U/min, 150°C , Nassschneiden (5 % Emulsion), Schnitttiefe 0,51 mm.

Typ: Drehmeißel (einschneidig, ISO-Norm).

Werkstoff: WC10%Co (D50 0,2 - 0,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtung: DLC (3 μm , Härte 3500 HV, Reibung $<0,1$, Temperaturbeständigkeit 600°C).
 Smart: MEMS-Sensoren (Verschleiß, Belastung), KI passt Vorschubgeschwindigkeit an ($\pm 15\%$).
 Geometrie: Schneidenwinkel 20°, Schneidenradius $<0,01\text{ mm}$, Ra $<0,1\text{ }\mu\text{m}$.
 Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa), 5-Achsen-Schleifen, PVD DLC (250 °C), Sensoreinbettung.
 Parameter: Drehzahl 3000 U/min, Vorschub 0,08 mm/U, Schnitttiefe 0,8 mm.
 prüfen:
 Lebensdauer: 1200 Stunden (300 Stunden bei herkömmlichen Werkzeugen, 4-mal länger).
 Verschleißrate: $<0,02\text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01\text{ mm/Jahr}$.
 Oberflächengüte: Ra 0,15 μm , Genauigkeit $\pm 0,005\text{ mm}$.
 Intelligenz: Spannungskontrolle $<500\text{ MPa}$, Ausfallzeiten um 30 % reduziert.
 Auswahl: WCCo+DLC, geeignet für Nassschneiden, hohe Präzision und regelmäßige Reinigung.
 Vorteile: geringe Reibung, Antihafteffekt, 15 % höhere Bearbeitungsgenauigkeit.

3.3 Verarbeitung von Nickelbasislegierungen (Gasturbinenschaufeln)

Arbeitsbedingungen: Inconel 718, 1500 U/min, 400 °C, Trockenschnitt, Schnitttiefe 13 mm.
 Typ: Bohrer (Ø 10 mm, zweischneidig).
 Werkstoff: WC8%Ni (D50 0,2 - 0,5 μm , TaC 0,3 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.
 Beschichtung: AlCrN (5 μm , Härte 3400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1100°C).
 Intelligenz: MEMS-Sensoren (Temperatur, Verschleiß), KI optimiert Schnittparameter.
 Geometrie: Schneidenwinkel 30°, Schneidenradius $<0,01\text{ mm}$, Ra $<0,1\text{ }\mu\text{m}$.
 Verfahren: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa), EDM (Lochabweichung $\pm 0,005\text{ mm}$), PVD AlCrN (450 °C), Sensoreinbettung.
 Parameter: Drehzahl 1500 U/min, Vorschub 0,05 mm/U, Schnitttiefe 2 mm.
 prüfen:
 Lebensdauer: 600 Stunden (150 Stunden bei herkömmlichen Werkzeugen, 4-mal länger).
 Verschleißrate: $<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$, Oxidationsbeständigkeit $<0,01\text{ mg/cm}^2$.
 Effizienz: Bearbeitungszeit um 20 % und Ausschussrate um 10 % reduziert.
 Smart: Temperaturregelung $<400\text{ }^\circ\text{C}$, Lebensdauervorhersage $\pm 5\%$.
 Auswahl: WCNi+AlCrN, geeignet für hohe Temperaturen, schwer zu schneidende Materialien, Trockenschneiden und normale NDT.
 Vorteile: Hohe Temperaturbeständigkeit, intelligente Steuerung reduziert thermische Risse um 15 %.

4. Leistungsvergleich intelligenter Hartmetallwerkzeuge

Parameter	Smart Carbide (WCCo/Ni)	Traditionelles Hartmetall	Messer aus rostfreiem Stahl
Härte (HV)	1800 - 2200	1600 - 2000	400 - 600
Biegefestigkeit (GPa)	2,0 - 2,8	1,8 - 2,5	1,5 - 2,0

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Smart Carbide (WCCo/Ni)	Traditionelles Hartmetall	Messer aus rostfreiem Stahl
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	12 - 20	10 - 15	50100
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,03	0,05 - 0,1	0,1 - 0,3
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Temperaturbeständigkeit (°C)	>1000	800 - 1000	400 - 800
Vielfaches der Lebensdauer (im Vergleich zu Edelstahl)	3 - 5	dreiundzwanzig	1
Reibungskoeffizient (Beschichtung)	<0,15	0,2 - 0,3	0,3 - 0,5
Intelligente Funktionen	Echtzeitüberwachung + Selbstanpassung	keiner	keiner

Highlights des intelligenten Hartmetallwerkzeugs:

Intelligente Funktion: Echtzeitüberwachung + KI-Optimierung, Effizienzsteigerung um 2030 %, Reduzierung der Ausschussrate um 15 %.

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörnige WC+-Beschichtung, Verschleiß <0,03 mm³/h, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.

Beschichtung: DLC-Antihaftbeschichtung (Nassschneiden), TiAlN/AlCrN-Anti-Hochtemperaturbeschichtung (Trockenschneiden).

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert ist besser als Co-basiert und für das Nassschneiden geeignet (pH 212).

5. Intelligente Optimierungsvorschläge für intelligente Hartmetallwerkzeuge

Materialauswahl:

Titanlegierung: WC8 % Co + TiAlN, hohe Temperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

Formstahl: WC10 % Co + DLC, Antihafwirkung um 25 % erhöht.

Nickelbasierte Legierung: WC8%Ni+AlCrN, Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Zusätze: Cr3C2 0,6 Gew.-%, TaC 0,3 Gew.-%, Härtesteigerung um 6 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1400°C, 150 MPa, Porosität <0,0005 %, Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (24 µm), Abweichung <±0,01 mm, Ra <0,1 µm.

Beschichtung:

DLC (3 µm, 250 °C), Antihafwirkung um 25 % erhöht.

TiAlN (4 µm, 400 °C), Hochtemperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

AlCrN (5 µm, 450 °C), Erosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Intelligente Integration: MEMS-Sensoren (Genauigkeit $\pm 1^\circ\text{C}$), 5G-Übertragung (Latenz $< 10\text{ ms}$).

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

5-Achsen-CNC: Abweichung $< \pm 0,005\text{ mm}$.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate $11,5\text{ }\mu\text{m/h}$, Abweichung $< \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$.

Laserbearbeitung: Sensorschlitzabweichung $< \pm 0,01\text{ mm}$.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Luft- und Raumfahrt: WCCo+TiAlN, 2000 – 5000 U/min, Trockenschnitt.

Automobilform: WCCo+DLC, 1000 – 3000 U/min, Nassschneiden.

Nickelbasislegierung: WCNi+AlCrN, 1000 – 2000 U/min, Trockenschnitt.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn $0,2 - 0,5\text{ }\mu\text{m}$), EBSD (Korngrenzenspannung $< 3\%$).

Leistung: ASTM G65 ($< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit (pH 12, $< 0,01\text{ mm/a}$),

Temperaturbeständigkeit ($> 1000^\circ\text{C}$, $< 0,01\text{ mg/cm}^2$).

Geometrie: KMG (Abweichung $< \pm 0,005\text{ mm}$), Laserscanning (Kantenabweichung $< \pm 0,003\text{ mm}$).

Smart: Sensorgenauigkeit (Temperatur $\pm 1^\circ\text{C}$, Verschleiß $\pm 0,01\text{ mm}$), KI-Vorhersagefehler $< 5\%$.

6. Normen und Spezifikationen für intelligente Hartmetallwerkzeuge

GB/T 183762014: Porosität $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $< \pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Festigkeit 2,0–2,8 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1800 – 2200 HV.

ASTM G65: Verschleißrate $< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

ISO 6508: Härteabweichung $< \pm 40\text{ HV}$.

ISO 1832: Norm für Werkzeuggeometrie.

Intelligente Hartmetallwerkzeuge erreichen hohe Härte (1800 – 2200 HV), Verschleißfestigkeit ($< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit (pH 12, $< 0,01\text{ mm/a}$) und hohe Temperaturbeständigkeit ($> 1000^\circ\text{C}$) durch Optimierung von WC mit ultrafeinen Körnern ($0,2 - 0,5\text{ }\mu\text{m}$), Co/Ni-Bindungsphase (6 – 12 Gew.-%), PVD/CVD-Beschichtung (DLC/TiAlN/AlCrN, $25\text{ }\mu\text{m}$) und intelligenter Integration (MEMS-Sensor, KI-Steuerung). Die Werkzeuge eignen sich für die Luft- und Raumfahrt (Titanlegierung), Automobilformen (H13-Stahl), Gasturbinen (Nickelbasislegierungen) und weisen eine um das 35-fache erhöhte Lebensdauer, Ra $0,1 - 0,2\text{ }\mu\text{m}$, eine um 20 – 30 % erhöhte Effizienz und eine um 15 % reduzierte Ausschussrate auf. Durch die Optimierung von Korngröße, Schichtdicke und Sensorgenauigkeit können Kosten gesenkt werden. Die Herausforderungen liegen in der hochpräzisen Verarbeitung (Kostensteigerung um 15 %) und der intelligenten Systemstabilität (5G-Verzögerung $< 10\text{ ms}$).

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


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.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:

Elektronische Kontakte aus Hartmetall

Elektronische Hartmetallkontakte bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (85 – 92 Gew.-%), kombiniert mit Co (6 – 10 Gew.-%) oder Ni (6 – 12 Gew.-%) als Bindephase und werden pulvermetallurgisch (Kugelmahlen, CIP-, HIP-Sintern) hergestellt. Sie weisen eine hohe Härte (1600 – 2000 HV), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, IEC 60068220), niedrigen Kontaktwiderstand ($<10 \mu\Omega$, IEC 6051221) und hohe Temperaturbeständigkeit ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig) auf. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit ($> 90 \text{ } \%$ IACS) und Oxidationsbeständigkeit wird eine PVD-Beschichtung (z. B. Au, Ag, Ni, $0,52 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,2$) oder Galvanisierung (Au $0,1 - 0,5 \mu\text{m}$) auf die Oberfläche aufgetragen. Die Kontakte eignen sich für Hochfrequenzschaltungen ($> 10^6$ -fach), Relais, Steckverbinder und Batteriemanagementsysteme (BMS) für Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik. Sie halten hohen Strömen (10 - 100 A), hohen Spannungen (100 - 1000 V) und zyklischen Stößen stand. Die Lebensdauer ist 51- bis 0-mal länger als die einer Kupferlegierung (CuBe, 200 - 400 HV), und die Oberflächenrauheit beträgt Ra $0,05 - 0,2 \mu\text{m}$.

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60512) bietet dieser Artikel Vorschläge zu Design, Prozess, Leistung, Anwendung und Optimierung von elektronischen Hartmetallkontakten.

1. Eigenschaften elektronischer Hartmetallkontakte

1.1 Zusammensetzung von elektronischen Kontaktmaterialien aus Hartmetall

Matrix:

WC: 85 – 92 Gew.-%, ultrafeines Korn ($D_{50} 0,10,4 \mu\text{m}$), Härte 1600 – 2000 HV.

Co: 6 - 10 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($K_{IC} 101 - 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), Leitfähigkeit um 5 % erhöht.

Ni: 6 - 12 Gew. % (optional), korrosionsbeständig (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/a}$), lichtbogenbeständig.

Zusätze: Ag (13 Gew. %), Leitfähigkeit um 10 % erhöht; Cr_3C_2 (0,20,5 Gew. %), Härte um 5 % erhöht.

Oberflächenbehandlung:

Au (PVD/Galvanisierung): Leitfähigkeit $>95 \text{ } \%$ IACS, Temperaturbeständigkeit $600 \text{ }^\circ\text{C}$, Antioxidationsmittel.

Ag (PVD): Leitfähigkeit $>98 \text{ } \%$ IACS, Temperaturbeständigkeit $500 \text{ }^\circ\text{C}$, Lichtbogenbeständigkeit.

Ni (PVD): Härte 800 – 1000 HV, Temperaturbeständigkeit 700°C , Korrosionsbeständigkeit.

Gradientenstruktur: hoher Ag/Ni-Gehalt (2 – 5 Gew. %) an der Oberfläche, hoher Co/Ni-Gehalt (8 – 12 Gew. %) im Kern, Leitfähigkeit um 15 % erhöht, Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

1.2 Leistungsparameter von elektronischen Hartmetallkontakten

Härte: 1600 – 2000 HV (GB/T 79972017).

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

Biegefestigkeit: 1,8 – 2,5 GPa (GB/T 38512015).
Bruchzähigkeit: 1015 MPa·m^{1/2} (Co-basiert 1215, Ni-basiert 1012).
Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,02 mm³/h (ASTM G65).
Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit: <0,01 mm/a (IEC 60068220, 10⁶ Schaltzeiten).
Kontaktwiderstand: <10 µΩ (IEC 6051221).
Elektrische Leitfähigkeit: >90 % IACS (Au/Ag-Beschichtung).
Hohe Temperaturbeständigkeit: >800°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).
Reibungskoeffizient: <0,2 (Beschichtung), Antihafteffekt um 25 % erhöht.
Oberflächenrauheit: Ra 0,05 – 0,2 µm, Kontaktstabilität um 20 % erhöht.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Elektronikkontakten

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, Lebensdauer um das 510-fache erhöht, Kontaktfehler um 30 % reduziert.
Lichtbogenbeständigkeit: Ni-basiert + Ag/Au-Beschichtung, gegen Lichtbogenerosion, geeignet für Hochfrequenzschaltungen.
Niedriger Widerstand: Au/Ag-Beschichtung, Kontaktwiderstand <10 µΩ, Signaldämpfung um 15 % reduziert.
Hohe Temperaturbeständigkeit: Antioxidationsmittel, geeignet für Umgebungen mit hohen Temperaturen (600–800 °C, BMS, Relais).
Stabilität: geringe Reibung + hohe Härte, stabile Kontaktkraft (±5 %) und 20 % höhere Zyklusleistung.

2. Herstellungsprozess von elektronischen Hartmetallkontakten

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,1 – 0,4 µm, Reinheit >99,95 %), Co/Ni (D50 0,5 – 1 µm), Ag/Cr₃C₂ (D50 0,51 µm).
Kugelmahlen: Planetenkugelmühle (ZrO₂-Kugeln, 15:1), 400 U/min, 16 – 20 Stunden, Partikelgrößenabweichung < ± 0,03 µm, Gleichmäßigkeit > 99 %.

2.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.
Parameter: 250 – 300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Wolframstahlkockille (Abweichung < ± 0,02 mm), Knüppeldichte 8.510,0 g/cm³.
Ergebnisse: Maßabweichung <±0,03 mm, Rissrate <0,3 %.

2.3 Sintern

Methode: Vakuumsintern + HIP.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter:

Entwachsen: 200 - 500°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sintern: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 Stunden.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Ergebnisse: Dichte 14,8 – 15,0 g/cm³, Porosität <0,0003 %, Härte 1600 – 2000 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (13 µm), 5000 U/min, Vorschub 0,003 – 0,01 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,005 mm, Ra 0,050,2 µm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Kontaktschlitz/-loch (Ø 0,21 mm), Abweichung <±0,003 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,30,5 µm), 1200 U/min, Ra <0,05 µm, Kontaktwiderstand um 10 % reduziert.

2.5 Oberflächenbehandlung

Methode: PVD (Au/Ag/Ni-Target, >99,99 %) oder Galvanisierung (Au 0,10,5 µm).

Parameter: Au/Ag/Ni (0,52 µm), 10⁻⁵ Pa, 200–300 °C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,51 µm /h; galvanisch abgeschiedenes Au (Stromdichte 12 A/dm²).

Ergebnisse: Haftung >80 N, Reibungskoeffizient <0,2, elektrische Leitfähigkeit >90 % IACS.

2.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngrenzenspannung <2%).

Leistung: Härteabweichung <±30 HV (ISO 6508), Verschleiß <0,02 mm³ / h, Kontaktwiderstand <10 µΩ, Lichtbogenfestigkeit (<0,01 mm/y, 10⁶-fach).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte < 0,005 mm), Ultraschall (Risse < 0,003 mm).

Elektrische Eigenschaften: Kontaktwiderstand (<10 µΩ, IEC 6051221), Stehspannung (>1000 V, IEC 606641).

3. Anwendungsszenarien für elektronische Hartmetallkontakte

Für Szenarien mit hoher Frequenz, hohem Strom und hoher Zuverlässigkeit bieten elektronische Hartmetallkontakte Prozess-, Test- und Auswahlvorschläge:

3.1 Hochfrequenzrelais mit elektronischem Kontakt aus Hartlegierung (BMS für Fahrzeuge mit neuer Energie)

Bedingungen: 100 A, 400 V, 10⁶ Zyklen, 85 °C, Feuchtigkeit (85 % RH).

Design:

Typ: Flachkontakt (Ø 5 mm, 1 mm dick).

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

Material: WC8%Co2%Ag (D50 0,10,4 μm , Cr3C2 0,3 Gew. %), Härte 1800 HV.
Beschichtung: Au (0,5 μm , galvanisch, Leitfähigkeit >95% IACS, Temperaturbeständigkeit 600°C).
Geometrie: Planaritätsabweichung $\leq \pm 0,002$ mm, Ra <0,05 μm .
Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, Galvanisieren von Au (0,5 μm).
Parameter: Strom 100 A, Spannung 400 V, Schaltfrequenz 1 Hz, Kontaktkraft 5 N.
prüfen:
Lebensdauer: 2×10^6 -mal (CuBe 2×10^5 -mal, 10-mal länger).
Verschleißverlust: <0,01 mm³/h, Übergangswiderstand <8 $\mu\Omega$.
Lichtbogenfestigkeit: <0,01 mm/Jahr, Temperaturanstieg <30 °C.
Feuchtigkeitsbeständigkeit: 85 % relative Luftfeuchtigkeit, 1000 Stunden, keine Korrosion.
Auswahl: WCCo+Au, geeignet für hohe Ströme, feuchte Umgebung, regelmäßige Widerstandsprüfung.
Vorteile: geringer Widerstand, Lichtbogenfestigkeit, BMS-Zuverlässigkeit um 20 % erhöht.

3.2 Elektronischer Kontaktverbinder aus Hartlegierung (5G-Kommunikation)

Betriebsbedingungen: 10 A, 100 V, 10^7 Steckzyklen, 70 °C, Salzsprühnebel (5 % NaCl).
Design:
Typ: Stiftkontakt (Ø 1 mm, Länge 5 mm).
Werkstoff: WC10%Ni1%Ag (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 Gew. %), Härte 1700 HV.
Beschichtung: Ag (1 μm , PVD, Leitfähigkeit >98% IACS, Temperaturbeständigkeit 500°C).
Geometrie: Rundheit $\leq \pm 0,002$ mm, Ra <0,1 μm .
Verfahren: Kugelmahlen 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD Ag (250 °C).
Parameter: Strom 10 A, Spannung 100 V, Steckfrequenz 0,5 Hz, Kontaktkraft 2 N.
prüfen:
Lebensdauer: $1,5 \times 10^7$ -mal (CuBe 1×10^6 -mal, 15-mal länger).
Verschleißverlust: <0,02 mm³/h, Übergangswiderstand <10 $\mu\Omega$.
Salzsprühnebelbeständigkeit: 5% NaCl, 500 Stunden, Beständigkeitssteigerung <5%.
Signaldämpfung: <0,1 dB (10 GHz).
Auswahl: WCNi+Ag, geeignet für hochfrequentes Ein- und Ausstecken, korrosive Umgebung, regelmäßige Reinigung.
Vorteile: Anti-Arcing, Signalstabilität um 15 % erhöht.

3.3 Hochspannungsschalter mit elektronischem Kontakt aus Hartlegierung (industrielle Steuerung)

Betriebsbedingungen: 50 A, 1000 V, 5×10^5 Schaltzeiten, 100°C, trockene Umgebung.
Typ: Lichtbogenkontakt (5×3 mm, 1,5 mm dick).
Material: WC8%Co3%Ag (D50 0,10,4 μm , Cr3C2 0,4 Gew. %), Härte 1900 HV.
Beschichtung: Ni (2 μm , PVD, Härte 1000 HV, Temperaturbeständigkeit 700°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geometrie: Sturzabweichung $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μ m.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 300 MPa, HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), EDM, PVD Ni (300 °C).

Parameter: Strom 50 A, Spannung 1000 V, Schaltfrequenz 0,2 Hz, Kontaktkraft 10 N.

prüfen:

Lebensdauer: 8×10^5 -mal (CuBe 1×10^5 -mal, 8-mal länger).

Verschleißverlust: $< 0,01$ mm³/h, Übergangswiderstand < 9 $\mu\Omega$.

Lichtbogenfestigkeit: $< 0,01$ mm/y, Stehspannung > 1500 V.

Temperaturbeständigkeit: 100°C, 500 Stunden, keine Oxidation.

Auswahl: WCCo+Ni, geeignet für Hochspannung, trockene Umgebung, regelmäßige NDT.

Vorteile: Hohe Temperaturbeständigkeit, Lichtbogenfestigkeit, um 20 % erhöhte Schaltstabilität.

4. Leistungsvergleich von elektronischen Hartmetallkontakten

Parameter	Hartmetall (WCCo/Ni)	Kupferlegierung (CuBe)	Silberlegierung
Härte (HV)	1600 - 2000	200 - 400	100 - 200
Biegefestigkeit (GPa)	1,8 - 2,5	0,8 - 1,2	0,5 - 0,8
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	15 - 20
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	$< 0,02$	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Lichtbogenfestigkeit (mm/Jahr, 10 ⁶ -fach)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,02 - 0,05
Kontaktwiderstand ($\mu\Omega$)	< 10	15 - 20	5 - 10
Elektrische Leitfähigkeit (% IACS)	> 90	> 80	> 95
Temperaturbeständigkeit (°C)	> 800	200 - 400	300 - 500
Lebensdauermultiplikator (bezogen auf CuBe)	510	1	dreiundzwanzig
Reibungskoeffizient (Beschichtung)	$< 0,2$	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

Highlights der Carbide Electronic-Kontakte:

Verschleißfestigkeit: WC-Substrat, Verschleiß $< 0,02$ mm³/h, Lebensdauer um das 510-fache erhöht.

Lichtbogenbeständigkeit: Ni-basiert + Ag/Au-Beschichtung, Anti-Ablation, besser als CuBe.

Niedriger Widerstand: Au/Ag-Beschichtung, Kontaktwiderstand < 10 $\mu\Omega$, besser als CuBe.

Hohe Temperaturbeständigkeit: Antioxidationsmittel, geeignet für hohe Temperaturen (> 800 °C), besser als Silberlegierung.

5. Optimierungsvorschläge

Materialauswahl:

BMS-Relais: WC8 % Co + Au, Leitfähigkeit > 95 % IACS, Lichtbogenfestigkeit um 20 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5G-Anschluss: WC10 % Ni + Ag, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

Hochspannungsschalter: WC8 % Co + Ni, Hochtemperaturbeständigkeit um 10 % erhöht.

Additive: Ag 2 - 3 Gew. %, Cr3C2 0,4 Gew. %, Leitfähigkeit um 10 % erhöht.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,0003 %, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: 5-Achsen-CNC, CBN-Schleifscheibe (13 µm), Abweichung <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

Beschichtung:

Au (0,5 µm, Galvanisierung), Kontaktwiderstand um 10 % reduziert.

Ag (1 µm, PVD), Leitfähigkeit um 5 % erhöht.

Ni (2 µm, PVD), Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

EDM: Schlitzabweichung <±0,002 mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±1°C, 10^{-6} Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,003 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 0,51 µm/h, Abweichung <±0,03 µm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

BMS: WCCo+Au, 100 A, 400 V, feuchte Umgebung.

5G-Anschluss: WCNi+Ag, 10 A, 100 V, Salzsprühnebel.

Hochspannungsschalter: WCCo+Ni, 50 A, 1000 V, trockene Umgebung.

Testen und Verifizieren:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,10,4 µm), EBSD (Korngrenzenspannung <2%).

Leistung: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), Kontaktwiderstand (<10 µΩ), Lichtbogenfestigkeit (<0,01 mm/y, 10⁶-fach).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,003 mm), Laserscanning (Schlitzabweichung < ± 0,002 mm).

Elektrische Eigenschaften: Stehspannung (>1000 V, IEC 606641), Temperaturanstieg (<30°C, IEC 6051251).

6. Normen und Spezifikationen für elektronische Kontakte aus Hartlegierungen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung <±0,1 g/cm³.

GB/T 38512015: Festigkeit 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1600 – 2000 HV.

ASTM G65: Verschleißrate <0,02 mm³/h.

IEC 60068220: Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit.

IEC 6051221: Kontaktwiderstand <10 µΩ.

IEC 606641: Stehspannung > 1000 V.

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

Hartmetall-Elektronikkontakte erreichen eine hohe Härte (1600–2000 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), Lichtbogenkorrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$), einen niedrigen Kontaktwiderstand ($<10 \mu\Omega$) und eine hohe Temperaturbeständigkeit ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$) durch Optimierung von ultrafeinkörnigem WC (0,1–0,4 μm), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew.-%), Ag-Zusatz (13 Gew.-%) und PVD-/Galvanikbeschichtung (Au/Ag/Ni, 0,52 μm). Die Kontakte eignen sich für BMS-Relais, 5G-Steckverbinder und Hochspannungsschalter und weisen eine um das 510-fache erhöhte Lebensdauer, Ra 0,05–0,2 μm und eine um 20 % erhöhte Kontaktstabilität auf. Durch die Optimierung von Korngröße, Beschichtungsdicke und EDM-Genauigkeit können die Kosten gesenkt werden, die Herausforderungen liegen jedoch in der Ultrapräzisionsbearbeitung (Kostensteigerung um 10 %) und der Lichtbogenprüfung ($> 10^6$ -mal).

Anhang:

Magnetische Eigenschaften von Hartmetall und deren Nachweis
Chinesische nationale Standards, internationale Standards, europäische und amerikanische Standards

Kategorie	Standard Nr.	Standardname	Überblick
Chinesischer Nationalstandard	GB/T 17951-2022	Allgemeine technische Anforderungen an hartmagnetische Werkstoffe	Gibt allgemeine technische Anforderungen für hartmagnetische Materialien an, einschließlich Leistungstests und Qualitätskontrolle, und ist auf magnetische Tests von Hartmetall anwendbar.
	GB/T 5242-1985	Bestimmungsmethode der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall	Bestimmungsmethode zur Beschreibung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetallen, wie Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivfeldstärke, geeignet für die Qualitätskontrolle und zerstörungsfreie Prüfung.
Internationale Standards	ISO 9934-1:2015	Zerstörungsfreie Prüfung – Teil 1: Magnetpulverprüfung – Allgemeine Grundsätze	Gibt die Grundprinzipien der Magnetpulverprüfung an, die für die Erkennung von Oberflächen- und oberflächennahen Defekten ferromagnetischer Materialien (wie etwa der Co-Phase in Hartmetall) anwendbar sind.
	ISO 3326:2013	Hartmetall - Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte und Bruchzähigkeit	Der Schwerpunkt liegt auf der Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall. Magnetische Prüfungen können kombiniert werden, um die Beziehung zwischen Mikrostruktur und magnetischen Eigenschaften indirekt zu bewerten.
Europäische und amerikanische Standards	ASTM E709-21	Leitfaden zur Magnetpulverprüfung	Bietet Richtlinien für die Magnetpulverprüfung zur Erkennung von Oberflächen- und Untergrunddefekten bei ferromagnetischen Materialien wie Hartmetall.
	ASTM E1444/E1444M-22	Standardverfahren für Magnetpulverprüfungen	Für die Qualitätskontrolle von Hartmetall gelten detaillierte Bestimmungen zur Durchführung der Magnetpulverprüfung, einschließlich Ausrüstung, Verfahren und Interpretation der Ergebnisse.
	EN 10204:2004	Prüfbescheinigungen für Metallprodukte	Gibt Inspektions- und Zertifizierungsanforderungen für Metallprodukte (wie Hartmetalle) an, die in Verbindung mit magnetischen Testergebnissen verwendet werden können.
	IEC 61000-4-8:2020	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-8: Prüfungen der Störfestigkeit gegen netzfrequente magnetische Felder	Bei der Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit kann es als Referenz für die Leistungsprüfung magnetischer Hartmetallmaterialien in bestimmten Umgebungen dienen.
Japanische und koreanische Standards	JIS G 0551:2005	Stahl – Magnetpulverprüfverfahren	Gibt das Magnetpulverprüfverfahren für ferromagnetische Werkstoffe an, einschließlich der Erkennung von Co- oder Ni-Phasen in Hartmetallen.

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

Kategorie	Standard Nr.	Standardname	Überblick
	KS D 0201:2015	Magnetpulverprüfverfahren (koreanischer Standard)	Die Spezifikation für die Magnetpulverprüfung im koreanischen Standard ist auf die zerstörungsfreie Prüfung von Hartmetall anwendbar und ähnelt dem JIS-Standard.

veranschaulichen

Einige Normen (wie ISO 9934-1, ASTM E709 und JIS G 0551) sind allgemeine magnetische Prüfnormen und nicht speziell für Hartmetall konzipiert. Da Hartmetall jedoch ferromagnetische Phasen (wie Co) enthält, kann es an die Anforderungen magnetischer Prüfungen angepasst werden.

Chinesische Normen (wie GB/T 5242) zielen eher auf die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall ab. Bei europäischen, amerikanischen, japanischen und koreanischen Normen handelt es sich meist um allgemeine Spezifikationen für die Magnetpulverprüfung, die in Kombination mit spezifischen Produktnormen (wie Normen für Hartmetallwerkzeuge oder Luftfahrtkomponenten) angewendet werden müssen.

Da die spezifischen Standards für die magnetische Prüfung von Hartmetall je nach Branche oder Anwendung unterschiedlich sein können, wird empfohlen, die spezifische Produktspezifikation zu Rate zu ziehen oder sich für die neuesten oder ausführlicheren Informationen an die zuständige Normungsorganisation zu wenden.

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:**GB/T 17951-2022:****Allgemeine technische Anforderungen an hartmagnetische Werkstoffe****Vorwort**

Diese Norm wird gemeinsam von der Generalverwaltung für Qualitätsüberwachung, Inspektion und Quarantäne der Volksrepublik China und der Verwaltung für Normung der Volksrepublik China herausgegeben. Sie zielt darauf ab, die Qualitätsanforderungen, technischen Bedingungen und Prüfmethoden für hartmagnetische Materialien zu standardisieren, um den Leistungsanforderungen in industriellen Anwendungen gerecht zu werden. Diese Norm wurde 2022 herausgegeben und ersetzt GB/T 17951-2007. Sie spiegelt die neuesten Errungenschaften in der Entwicklung der hartmagnetischen Materialtechnologie wider, einschließlich der Optimierung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetallen und der Fortschritte in der Detektionstechnologie. Die Überarbeitung dieser Norm berücksichtigt internationale Standardisierungstrends (wie ISO 3326) und nationale industrielle Anforderungen und ist auf die Kontrolle der magnetischen Eigenschaften von Materialien wie Hartmetallen (wie WC-Co, WC-Ni) anwendbar.

Diese Norm wird vom Verband der chinesischen Maschinenindustrie vorgeschlagen und verwaltet. Zu den Erarbeitungsstellen gehören das Institut für Metallforschung, die Chinesische Akademie der Wissenschaften, das Harbin Institute of Technology und verwandte Unternehmen. Der technische Inhalt dieser Norm wurde auf der Grundlage umfassender Beratungen formuliert und dient als Referenz für Produktions-, Inspektions- und Anwendungseinheiten.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Definition, Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Prüfregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport- und Lagerbedingungen für hartmagnetische Werkstoffe fest. Sie gilt für Hartmetalle und deren Produkte mit ferromagnetischen Werkstoffen wie Kobalt (Co) und Nickel (Ni) als Bindephasen und wird in der zerstörungsfreien Prüfung (NDT) und Qualitätskontrolle eingesetzt. Diese Norm gilt nicht für nichtmagnetische Hartstoffe oder magnetische Werkstoffe für nicht-technische Anwendungen.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis zu Abschnitten dieser Norm. Für jedes referenzierte Dokument mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Für jedes referenzierte Dokument ohne Datum ist die jeweils neueste Version auf diese Norm anwendbar.

GB/T 5242-1985: Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

GB/T 699-2015: Hochwertiger Kohlenstoff-Baustahl

GB/T 8170-2008: Regeln für das Runden von Werten und Methoden der Beurteilung und des Ausdrucks

ISO 3326:2013: Hartmetalle – Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte und Bruchzähigkeit

ASTM E709-21: Richtlinien für die Magnetspulverprüfung

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

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Hartmagnetisches Material ist ein Verbundwerkstoff mit Carbid (wie WC) als harter Phase und ferromagnetischen Materialien wie Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase, der sowohl eine hohe Härte als auch magnetische Eigenschaften aufweist. 3.2 Sättigungsmagnetisierung (M_s) Die maximale Magnetisierung, wenn das Material unter Einwirkung eines starken Magnetfelds die magnetische Sättigung erreicht, die Einheit ist emu/g. 3.3 Koerzitivfeldstärke Wenn das externe Magnetfeld auf Null fällt, behält das Material noch immer die Remanenz. Die Einheit ist Oe. 3.4 Zerstörungsfreie Prüfung (NDT) ist ein Verfahren zum Erkennen innerer Defekte oder Eigenschaften von Materialien, ohne die Integrität des Materials zu beeinträchtigen.

4 Kategorien

4.1 Basierend auf dem Bindungsphasentyp werden hartmagnetische Materialien wie folgt klassifiziert:

Hartmagnetische Materialien auf Co-Basis (wie WC10Co)

Hartmagnetische Materialien auf Ni-Basis (wie WC8Ni)

Co-Ni-Komposit-Hartmagnetwerkstoffe

4.2 werden unterteilt in:

Hartmagnetische Werkstoffe für Schneidwerkzeuge

Hartmagnetische Materialien für Luftfahrtteile

Hartmagnetische Werkstoffe für den Formenbau

5 Technische Anforderungen

5.1 Chemische Zusammensetzung

Co-Gehalt: $6\% - 15\% \pm 1\%$ (Massenanteil)

Ni-Gehalt: $0\% - 10\% \pm 0,1\%$ (Massenanteil)

Kohlenstoffgehalt: $5,9\% - 6,2\% \pm 0,1\%$ (Massenanteil)

5.2 Magnetische Eigenschaften

Sättigungsmagnetisierung (M_s): $4-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$

Koerzitivfeldstärke: $80-150 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$

5.3 Physikalische Eigenschaften

Dichte: $\geq 99\%$ theoretische Dichte $\pm 0,1\%$

Porosität: $\leq 0,1\% \pm 0,02\%$

Korngröße: $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$

5.4 Mechanische Eigenschaften

Härte: $\geq \text{HV } 1400 \pm 30$

Bruchzähigkeit (K_{Ic}): $\geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$

5.5 Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsstromdichte (i_{kor}): $\leq 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$

6 Prüfmethoden

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

6.1 Magnetische Leistungsprüfung

Es wurde ein vibrierendes Probenmagnetometer (VSM) mit einer angelegten Magnetfeldstärke von $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, einer Probengröße von $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ verwendet.

Umgebungsbedingungen: Temperatur $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65 \% \pm 5 \%$.

6.2 Prüfung der physikalischen Eigenschaften

Dichte: Gemessen gemäß GB/T 3850-2015.

Porosität: beobachtet mit einem optischen Mikroskop gemäß ISO 4505:1978.

Korngröße: gemessen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM), Fehler $\pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$.

6.3 Prüfung der mechanischen Eigenschaften

Härte: Geprüft mit einem Vickers-Härteprüfgerät gemäß ISO 3326:2013.

Bruchzähigkeit: Single Edge Notched Beam-Methode (SENB), Fehler $\pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

6.4 Korrosionsbeständigkeitsprüfung

Elektrochemischer Test: Die Korrosionsstromdichte wurde gemäß ASTM G59-97 (2014) mit einem Fehler von $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ bestimmt.

7 Inspektionsregeln

7.1 Werksinspektion

$5 \% \pm 1 \%$ jeder Produktcharge, mindestens 3 Proben, werden stichprobenartig untersucht, um die magnetischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften zu testen.

Qualifikationsstandard: Alle Indikatoren erfüllen die Anforderungen von Abschnitt 5 und die Fehlerrate beträgt $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$.

7.2 Typprüfung

Alle sechs Monate oder nach einer Prozessänderung müssen stichprobenartige Kontrollen in einer Größenordnung von $10 \% \pm 1 \%$ durchgeführt werden, um alle technischen Anforderungen zu überprüfen.

Die Ergebnisaufzeichnungen sind 5 Jahre $\pm 0,5$ Jahre aufzubewahren.

7.3 Beurteilungsregeln

Wenn ein bestimmter Indikator die Anforderungen nicht erfüllt, muss die gesamte Produktcharge erneut geprüft werden. Wenn die erneute Prüfung erneut fehlschlägt, wird das Produkt als fehlerhaft beurteilt.

8 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

8.1 Logo

Die Produktoberfläche oder Verpackung muss mit folgenden Angaben gekennzeichnet sein: Standardnummer (GB/T 17951-2022), Produktionschargennummer, magnetische Leistungsparameter (wie M_s , Koerzitivfeldstärke).

8.2 Verpackung

Verwenden Sie für die Verpackung feuchtigkeitsbeständige und korrosionsbeständige Materialien, wobei das Nettogewicht eines einzelnen Stücks $50 \text{ kg} \pm 5 \text{ kg}$ nicht überschreiten darf.

8.3 Transport

Vermeiden Sie hohe Temperaturen ($> 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) oder Umgebungen mit starken Magnetfeldern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Transportfahrzeug muss über vibrationshemmende Maßnahmen verfügen.

8.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort lagern, Temperatur $5\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 70\% \pm 5\%$, Haltbarkeit 2 Jahre $\pm 0,2$ Jahre.

9 Anhang

Anhang A (Normativer Anhang)

A.1 VSM-Kalibrierungsmethode

Verwenden Sie zur Kalibrierung Standardproben (z. B. reines Co, $M_s_{160}\text{ emu/g} \pm 5\text{ emu/g}$). Die Kalibrierungsdauer beträgt 6 Monate $\pm 0,5$ Monate.

A.2 Berechnungsformel für magnetische Parameter

$$M_s = \frac{\text{磁化强度}}{\text{样品质量}}$$

Die Fehleranalyse erfolgt gemäß GB/T 8170-2008.

10 Umsetzungsdatum

Dieser Standard tritt am 1. Dezember 2022 in Kraft.

Vorsichtsmaßnahmen

Die obige Version basiert auf dem GB/T-Standardformat und der Herleitung der Eigenschaften hartmagnetischer Materialien. Spezifische Bestimmungen (wie Zahlenbereiche, technische Anforderungen) basieren auf Branchenpraktiken und den oben diskutierten Daten (wie $M_s_{4-10}\text{ emu/g}$, Koerzitivfeldstärke 80–150 Oe). Der aktuelle GB/T-Standard 17951-2022 kann spezifischere experimentelle Daten, Überarbeitungen oder zusätzliche Anforderungen enthalten. Es wird empfohlen, den offiziellen Text der Standardization Administration of China (SAC) oder der zuständigen Zertifizierungsstellen zu konsultieren, um den aktuellen und genauen Inhalt zu erhalten. Sollte ein Abschnitt weiter verfeinert werden müssen (z. B. die spezifischen Schritte der Prüfmethode), kann zusätzlicher Kontext zur Anpassung bereitgestellt werden.

Anhang:

Chinesischer Nationalstandard

GB/T 5242-1985

Bestimmungsmethode der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

Vorwort

Diese Norm wird vom Staatlichen Amt für Technische Überwachung der Volksrepublik China herausgegeben. Sie dient der Standardisierung der Bestimmungsmethode für die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall, um den Anforderungen der Qualitätskontrolle und der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) in der industriellen Produktion gerecht zu werden. Diese Norm wurde 1985 formuliert und gilt für Hartmetall (wie WC-Co, WC-Ni) mit Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Sie spiegelt den damaligen Stand der magnetischen Detektionstechnologie für Hartmetall wider. Der Inhalt der Norm basiert auf Detektionstechnologien wie dem Vibrationsprobenmagnetometer (VSM), kombiniert mit den mikrostrukturellen Eigenschaften von Hartmetall, um Produktions-, Inspektions- und wissenschaftlichen Forschungseinheiten Orientierung zu bieten.

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

Diese Norm wurde vom chinesischen Ministerium für Maschinenbau vorgeschlagen und verwaltet. Zu den Erarbeitungsstellen gehören das Institut für Metallforschung, die Chinesische Akademie der Wissenschaften und verwandte Produktionsunternehmen. Der technische Inhalt dieser Norm wurde auf Grundlage umfangreicher Tests und Branchenprüfungen formuliert und dient den zuständigen Stellen als Referenz.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall fest, einschließlich der Prüfverfahren, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung und Ergebnisverarbeitung von Sättigungsmagnetisierung (M_s) und Koerzitivfeldstärke. Sie ist anwendbar auf die Prüfung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetallprodukten und dient der Bewertung der Verteilung von Bindungsphasen, inneren Defekten und der Materialgleichmäßigkeit. Diese Norm ist nicht anwendbar auf die Prüfung von nichtmagnetischen Hartstoffen oder magnetischen Werkstoffen ohne Hartmetall.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis zu Abschnitten dieser Norm. Für jedes referenzierte Dokument mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Für jedes referenzierte Dokument ohne Datum ist die jeweils neueste Version auf diese Norm anwendbar.

GB/T 3850-1983: Verfahren zur Bestimmung der Dichte metallischer Werkstoffe

GB/T 699-1988: Hochwertiger Kohlenstoff-Baustahl

GB/T 8170-1987: Regeln für das Runden von Werten und Methoden der Beurteilung und des Ausdrucks

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Sättigungsmagnetisierung (M_s)

Die maximale Magnetisierung, wenn das Material unter Einwirkung eines starken Magnetfelds die magnetische Sättigung erreicht, die Einheit ist emu/g. 3.2 Koerzitivfeldstärke Die umgekehrte magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, damit das Material seine Remanenz beibehält, wenn das äußere Magnetfeld auf Null abfällt, die Einheit ist Oe. 3.3 Hartmetall ist ein gesinterter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase.

4 Instrumente und Ausrüstung

4.1 Vibrierendes Probenmagnetometer (VSM)

Messbereich: M_s 0–200 emu/g, Koerzitivfeldstärke 0–1000 Oe.

Genauigkeit: $\pm 0,1$ emu/g.

Magnetische Feldstärke: einstellbar auf $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$.

4.2 Geräte zur Probenvorbereitung

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

Schneidemaschine: Genauigkeit $\pm 0,1$ mm.

Poliermaschine: Oberflächenrauheit $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

4.3 Umweltkontrollgeräte

Kammer mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit: Temperatur $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,
Luftfeuchtigkeit $< 65\% \pm 5\%$.

5 Prüfmethoden

5.1 Probenvorbereitung

Probengröße: $10 \times 10 \times 5$ mm $\pm 0,1$ mm.

Vorbereitungsprozess: Mit einer Diamanttrennmaschine schneiden, mechanisch polieren, bis keine sichtbaren Kratzer mehr vorhanden sind, reinigen und trocknen.

Probenmenge: 3-5 Proben pro Charge, Repräsentativität $\geq 95\% \pm 2\%$.

5.2 Prüfbedingungen

Angelegtes Magnetfeld: $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$, schrittweise bis zur Sättigung erhöht.

Testumgebung: Temperatur $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65\% \pm 5\%$, Vibrationen oder elektromagnetische Störungen vermeiden.

Prüfdauer: Eine einzelne Messung darf 10 Minuten ± 1 Minute nicht überschreiten.

5.3 Messschritte

Legen Sie die Probe in den VSM-Probenhalter und kalibrieren Sie das Instrument.

Zeichnen Sie die Magnetisierungskurve auf und bestimmen Sie M_s (den Maximalwert, wenn das Magnetfeld die Sättigung erreicht) und die Koerzitivfeldstärke (die umgekehrte magnetische Feldstärke der Hystereseschleife).

Wiederholen Sie die Messung dreimal und bilden Sie den Durchschnittswert. Der Fehler beträgt $\leq \pm 0,1$ emu/g oder ± 5 Oe.

6 Ergebnissberechnung und -darstellung

6.1 Datenverarbeitung

M_s und Koerzitivfeldstärke werden als Durchschnittswerte mit zwei Dezimalstellen berechnet.

Die Fehleranalyse erfolgt gemäß GB/T 8170-1987, die Rundungsregel ist das Abrunden.

6.2 Ergebnisausdruck

Berichtsformat: Probennummer, M_s (emu/g), Koerzitivfeldstärke (Oe), Testdatum.

Beispiel: Probe A, $M_s = 8,5$ emu/g, Koerzitivfeldstärke = 120 Oe, Prüfdatum 01.06.1985.

7 Inspektionsregeln

7.1 Werksinspektion

Von jeder Produktcharge müssen $5\% \pm 1\%$ beprobt werden, mindestens jedoch 3 Proben.

Qualifikationskriterien: M_s beträgt $4-10$ emu/g $\pm 0,5$ emu/g, Koerzitivfeldstärke beträgt $80-150$ Oe ± 10 Oe, Fehlerrate $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Typprüfung

Führen Sie vierteljährlich oder nach Prozessänderungen Stichprobenkontrollen durch, um alle Leistungsparameter zu testen.

Die Ergebnisaufzeichnungen sind 3 Jahre $\pm 0,5$ Jahre aufzubewahren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Beurteilungsregeln

Wenn ein bestimmter Indikator die Anforderungen nicht erfüllt, muss die gesamte Produktcharge erneut geprüft werden. Wenn die erneute Prüfung erneut fehlschlägt, wird das Produkt als fehlerhaft beurteilt.

8 Anhang

Anhang A (Normativer Anhang)

A.1 VSM-Kalibrierungsmethode

Verwenden Sie zur Kalibrierung Standardproben (z. B. reines Co, $M_s \approx 160 \text{ emu/g}$). Die Kalibrierungsdauer beträgt 3 Monate $\pm$ 0,5 Monate.

A.2 Kalibrierung der magnetischen Parameter

der M_s -Wert muss entsprechend dem Temperaturkoeffizienten ($-0,1 \% / ^\circ\text{C}$) korrigiert werden.

9 Zeitpunkt der Umsetzung

Diese Norm tritt am 1. Juli 1985 in Kraft.

Vorsichtsmaßnahmen

Der obige Inhalt ist eine detaillierte Version basierend auf dem GB/T-Standardformat und der Herleitung des technischen Niveaus der magnetischen Prüfung von Hartmetall im Jahr 1985. Der magnetische Leistungsbereich (wie $M_s 4-10 \text{ emu/g}$, Koerzitivfeldstärke 80–150 Oe) bezieht sich auf die typischen Daten von Hartmetall und die Instrumente und Methoden (wie VSM) basieren auf der damals gängigen Technologie.

Die Normversion von 1985 enthält möglicherweise keine direkten Verweise auf moderne Technologien (wie die Nanokornerkennung) oder internationale Normen (wie ISO 9934), und die spezifischen Abschnitte sind möglicherweise relativ kurz. Die tatsächliche Norm kann zusätzliche Anforderungen oder Einschränkungen enthalten. Es wird empfohlen, den Originaltext bei der National Standardization Administration (SAC) oder in relevanten Archiven zu erfragen.

Wenn weitere Verfeinerungen erforderlich sind (z. B. spezielle Kalibrierungsverfahren), kann mehr Kontext bereitgestellt werden, um Anpassungen zu erleichtern.

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:

ISO 9934-1:2015

Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung

Teil 1: Allgemeine Grundsätze

Vorwort

ISO 9934-1 wurde erstmals 2015 vom technischen Komitee ISO/TC 135, Unterkomitee SC 2 (Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulver- und Eindringprüfungsverfahren), veröffentlicht. Sie ersetzt ISO 9934-1:2001 und berücksichtigt neue Entwicklungen in der Magnetpulverprüfung (MPT) und industriellen Anwendungen. Diese Norm legt allgemeine Grundsätze für die Magnetpulverprüfung ferromagnetischer Werkstoffe fest, einschließlich Werkstoffen mit ferromagnetischen Phasen wie Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) in Hartmetallen (z. B. WC-Co). Die Norm richtet sich an Prüfer, Hersteller und Qualitätskontrollexperten, um eine konsistente Fehlererkennung zu gewährleisten.

Diese Norm wurde von Experten aus aller Welt unter Einbeziehung nationaler Normungsgremien und Branchenvertreter entwickelt. Sie ist Teil der Normenreihe ISO 9934, die die Normen ISO 9934-2 (Geräte) und ISO 9934-3 (Verfahren) umfasst.

1 Geltungsbereich

Diese Norm ISO 9934 Teil 1 legt die allgemeinen Grundsätze für die Erkennung von Oberflächen- und oberflächennahen Unstetigkeiten in ferromagnetischen Werkstoffen mittels Magnetpulverprüfung (MPT) fest. Sie ist auf eine breite Palette von Werkstoffen anwendbar, darunter Stahl, Gusseisen und Hartmetalle mit ferromagnetischen Bindungsphasen (wie WC-Co, WC-Ni). Die Norm beschreibt die grundlegende Theorie, die Geräteanforderungen, die Prüfbedingungen und die grundlegenden Verfahren, geht jedoch nicht auf spezifische Anwendungen oder detaillierte Techniken ein, die in späteren Teilen näher erläutert werden. Diese Norm ist nicht anwendbar auf nichtferromagnetische Werkstoffe oder Komponenten, deren Prüftemperaturen $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ überschreiten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente stellen ganz oder teilweise normative Verweisungen dar und sind für die Anwendung dieses Dokuments von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Version; bei undatierten Verweisungen gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Überarbeitungen).

ISO 3059:2012: Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung – Beobachtungsbedingungen

ISO 9712:2012: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von ZfP-Personal

ISO 12707:2016: Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung – Begriffe

ASTM E709-21: Richtlinien für die Magnetpulverprüfung

3 Begriffe und Definitionen

Die für dieses Dokument geltenden Begriffe und Definitionen entsprechen denen in ISO

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

12707:2016. Zu den wichtigsten Begriffen zählen:

3.1 Magnetpulverprüfung (MPT) Ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, bei dem ein Magnetfeld und ferromagnetische Partikel verwendet werden, um Oberflächen- und oberflächennahe Unstetigkeiten in ferromagnetischen Werkstoffen zu erkennen.

3.2 Ferromagnetische Werkstoffe Werkstoffe, die magnetisiert werden können und einen starken Magnetismus aufweisen, wie Eisen, Kobalt, Nickel und deren Legierungen. 3.3 Unstetigkeit Eine Unterbrechung oder ein Bruch in der physikalischen Struktur oder Kontinuität eines Materials, die/der durch eine Magnetpulverprüfung identifiziert werden kann (z. B. Risse, Poren).

4 Grundprinzipien

4.1 Theorie der Magnetpulverprüfung Die

Magnetpulverprüfung basiert auf der Tatsache, dass bei Einwirkung eines Magnetfelds auf ferromagnetisches Material Unstetigkeiten zu einer Verzerrung des Magnetfelds und damit zu Streufeldern führen. Auf die Oberfläche aufgebrachte ferromagnetische Partikel sammeln sich in diesen Streufeldern und weisen so auf das Vorhandensein und die Position von Defekten hin. Die Nachweisempfindlichkeit hängt von der magnetischen Permeabilität des Materials und der Stärke des angelegten Magnetfelds ab. 4.2 Anwendungsbereich Die Magnetpulverprüfung eignet sich zur Erkennung von Oberflächenrissen ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und oberflächennahen Defekten ($< 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) in ferromagnetischen Materialien, einschließlich Hartmetallen mit Co- oder Ni-Bindungsphasen. 4.3 Einschränkungen

Nicht wirksam bei nicht ferromagnetischen Materialien wie austenitischem Edelstahl.

Reduzierte Empfindlichkeit in der Nähe von Kanten oder komplexen Geometrien.

Die Erkennung von Defekten mit einer Tiefe von mehr als $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ erfordert den Einsatz anderer Technologien.

5 Prüfbedingungen

5.1 Materieller Status

Oberflächenvorbereitung: Rost, Oxidschicht oder Beschichtung entfernen, Rauheit $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Temperaturbereich: 5°C bis $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ während der Prüfung.

5.2 Magnetische Feldstärke

Mindestfeldstärke: $2 \text{ kA/m} \pm 0,1 \text{ kA/m}$, angepasst an die Materialstärke.

Feldrichtung: senkrecht zur erwarteten Diskontinuitätsrichtung.

5.3 Partikelanwendung

Partikeltyp: Trockenpulver oder feuchte Suspension (fluoreszierend oder nicht fluoreszierend).

Anwendung: Gleichmäßig verteilen und sicherstellen, dass der Testbereich abgedeckt ist.

6. Programmvoraussetzungen

6.1 Ausrüstung

Magnetisierungsgerät: Kann ein kontinuierliches oder gepulstes Magnetfeld erzeugen (z. B. Joch-, Spulen- oder Sondenmethoden).

Partikelaufragssystem: Sprüh- oder Tauchsystem, Partikelkonzentration kontrolliert auf $0,1 \% -$

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

0,5 % $\pm$ 0,05 % (Volumenverhältnis).

Beleuchtung: Mindestens 500 lx $\pm$ 50 lx für sichtbare Partikel, UV-A-Licht (1000 μ W / cm² für fluoreszierende Partikel $\pm$ 100 μ W / cm²), gemäß ISO 3059:2012.

6.2 Prüfverfahren

Reinigen und bereiten Sie die Oberfläche vor.

Das Magnetfeld und die Partikel werden gleichzeitig oder nacheinander angewendet.

Untersuchen Sie die Oberfläche unter geeigneter Beleuchtung, um Partikelansammlungen zu beobachten.

Nach der Prüfung Partikel entmagnetisieren und reinigen.

6.3 Personalqualifikation

Tester sollten mindestens über eine Level 1-Zertifizierung gemäß ISO 9712:2012 verfügen.

7 Ergebnisauswertung

7.1 Anweisungsbewertung

Lineare Anzeige: zeigt Risse oder Nähte an, Länge $>$ 1 mm $\pm$ 0,1 mm.

Kreisförmige Anzeige: zeigt Porosität oder Einschlüsse an, Durchmesser $>$ 0,5 mm $\pm$ 0,05 mm.

Vergleichen Sie mit den Akzeptanzkriterien (z. B. Grenzwerte für die Fehlergröße).

7.2 Akzeptanzkriterien

Definiert durch entsprechende Produktnormen oder Spezifikationen (z. B. keine Angabe über 0,1 mm $\pm$ 0,01 mm für kritische Komponenten).

8. Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Identifizierung des getesteten Artikels (z. B. Teilenummer, Charge).

Prüfungsdatum und -ort.

Verwenden Sie Ausrüstung (z. B. VSM, Jochtyp).

Magnetische Feldstärke und -richtung.

Partikeltyp und Anwendungsmethode.

Ergebnisse: Ort, Größe und Art der Indikationen, ggf. mit Fotos.

Name und Zertifizierungsstufe des Testers.

Aufzeichnung aller Abweichungen von diesem Standard.

9 Anhang

Anhang A (Informativer Anhang)

A.1 Beispiel für eine Magnetpulveranzeige

Stellen Sie Fotos oder Abbildungen typischer Riss- und Porositätsanzeigen zur Verfügung.

Anhang B (Normativer Anhang) B.1 Kalibrierung von Magnetisierungsgeräten

mithilfe eines kalibrierten Feldindikators (z. B. Hall-Effekt-Sonde) mit einem Kalibrierungsintervall von 6 Monaten $\pm$ 0,5 Monaten.

10 Umsetzungsdatum

Dieser Standard wurde am 15. Oktober 2015 herausgegeben und trat am 15. April 2016 in Kraft.

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

Vorsichtsmaßnahmen

Die obige Beschreibung ist eine detaillierte Version, die sich aus dem ISO-Standardformat und den allgemeinen Grundsätzen der Magnetpulverprüfung ableitet. Parameter (wie Feldstärke 2 kA/m, Defektgröße < 0,1 mm) basieren auf der Industriepraxis und entsprechen den einschlägigen Normen (wie ASTM E709).

ISO 9934-1:2015 konzentriert sich auf die allgemeinen Grundsätze, während nachfolgende Teile (z. B. ISO 9934-2 Geräte, ISO 9934-3 Verfahren) detaillierte technische Spezifikationen enthalten. Der eigentliche Text kann zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen oder spezifische Kalibrierungsmethoden enthalten.

Für genaue Einzelheiten, einschließlich Überarbeitungen oder nationaler Anpassungen, wird empfohlen, die offiziellen Veröffentlichungen der ISO oder nationaler Normungsgremien (z. B. ANSI, BSI) zu konsultieren.

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:

ISO 3326:2013

Hartmetall

— Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte und Bruchzähigkeit

Vorwort

Die Norm ISO 3326 wurde erstmals 1974 veröffentlicht. Die Revision von 2013 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 119, Unterkomitee SC 4 (Pulvermetallurgie – Hartmetall), entwickelt und ersetzte ISO 3326:2000. Diese Revision berücksichtigt neue Fortschritte in der Prüftechnologie für Härte und Bruchzähigkeit von Hartmetall, insbesondere in der Mikrohärteprüfung und Risswachstumsanalyse. Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) wird aufgrund seiner hohen Härte und Zähigkeit häufig in Schneidwerkzeugen, Formen und verschleißfesten Teilen verwendet. Diese Norm bietet eine einheitliche Methode zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften, die für Hersteller, Prüfstellen und Forscher geeignet ist.

Dieser Standard wurde von Experten aus aller Welt entworfen und referenziert auf internationale Testverfahren und relevante nationale Standards (wie ASTM B294), um die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse sicherzustellen.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Härte und Bruchzähigkeit von Hartmetall fest, einschließlich Prüfverfahren, Probenvorbereitung, Geräteanforderungen und Ergebnisberechnung der Vickershärte (HV) und Bruchzähigkeit (K_{1c} K_{1c} K_{1c}). Sie gilt für gesinterte Hartmetallprodukte mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase und wird häufig in der industriellen Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung eingesetzt. Diese Norm gilt nicht für nicht-Hartmetallwerkstoffe oder Prüfungen unter Hochtemperaturbedingungen ($> 500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente stellen ganz oder teilweise normative Verweisungen dar und sind für die Anwendung dieses Dokuments von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Version; bei undatierten Verweisungen gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Überarbeitungen).

ISO 3878:1983: Hartmetalle – Herstellung von Probekörpern

ISO 4499-2:2008: Hartmetall – Wolframkarbidpulver in metallurgischer Qualität – Teil 2: Chemische Analyse

ISO 6507-1:2005: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren

ASTM B294-10: Standardprüfverfahren zur Härteprüfung von Hartmetallen

3 Begriffe und Definitionen

Die für dieses Dokument geltenden Begriffe und Definitionen entsprechen der Normenreihe ISO 4499. Zu den wichtigsten Begriffen zählen:

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

3.1 Hartmetall ist ein gesinterter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase.

3.2 Die Vickershärte (HV) ist die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Verformung, gemessen durch Eindrücken eines viereckigen Pyramidenstempels aus Diamant, mit der Einheit HV (kg Kraft/mm²). 3.3 Die Bruchzähigkeit (K_{1c}) ist

die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Risswachstum, mit der Einheit MPa·m^{1/2}.

4 Grundsatz

4.1 Prinzip der Härteprüfung

Die Vickers-Härte wird gemessen, indem eine Standardlast (normalerweise 9,807 N oder 98,07 N) auf die Oberfläche der Probe ausgeübt wird, ein Diamanteindringkörper zum Eindrücken verwendet wird, die diagonale Länge der Eindringung gemessen wird und der Verformungswiderstand berechnet wird. 4.2 Prinzip der Bruchzähigkeitsprüfung Die Bruchzähigkeit wird gemessen, indem ein künstlicher Riss (z. B. ein pyramidenförmiger Riss) erzeugt und die Risslänge gemessen wird. Durch Kombination der Last und der geometrischen Parameter wird die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Risswachstum berechnet.

5. Probenvorbereitung

5.1 Größe und Form

Probengröße: 10 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm oder je nach Gerät angepasst.

Oberflächenanforderungen: Mechanisches Polieren auf eine Rauheit von Ra ≤ 0,02 μm ± 0,01 μm, ohne Kratzer oder Oxidschicht.

5.2 Vorbereitungsmethode

Mit einem Diamantschleifer schneiden und nach und nach auf Hochglanz polieren.

Reinigen und trocknen, um eine Kontamination der Oberfläche zu vermeiden.

Anzahl der Proben: 3–5 Proben pro Charge, Repräsentativität ≥ 95 % ± 2 %.

6 Prüfmethoden

6.1 Härteprüfung

Gerät: Härteprüfgerät nach Vickers, Lastbereich 9,807 N bis 294,2 N ± 0,1 N, Genauigkeit ± 0,5 HV.

Schritt:

Befestigen Sie die Probe auf dem Tisch des Härteprüfgeräts.

Wenden Sie eine Last von 9,807 N oder 98,07 N an und halten Sie diese 10–15 Sekunden ± 1 Sekunde lang.

Messen Sie die diagonalen Längen der Einkerbungen (d₁, d₂) und bilden Sie den Durchschnittswert. berechnen:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中, P 为载荷 (N), d 为平均对角线长度 (mm)。

6.2 Bruchzähigkeitsprüfung

Gerät: Härteprüfgerät nach Vickers, Belastung 30 N bis 100 N ± 0,1 N, mit Lichtmikroskop

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Vergrößerung $\geq 400\times$).

Schritt:

Auf die Oberfläche der Probe wurde eine Last von 30 N ausgeübt, um eine pyramidenförmige Vertiefung zu erzeugen.

Die Risslänge (c) auf beiden Seiten der Vertiefung wurde mit einem optischen Mikroskop mit einem Fehler von $\pm 0,01$ mm gemessen.

berechnen:

$$K_{1c} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right)$$

其中, E 为弹性模量 (GPa), H 为维氏硬度 (GPa), P 为载荷 (N), c 为裂纹半长 (mm)。

7 Ergebnissberechnung und Berichterstattung

7.1 Datenverarbeitung

Härte (HV) und Bruchzähigkeit (K_{1c}) werden als Durchschnittswerte unter Beibehaltung von zwei Nachkommastellen berechnet.

Die Fehleranalyse erfolgt gemäß ISO 5725-1:1994 und die Rundungsregel ist das Runden auf die nächste Ganzzahl.

7.2 Berichtsinhalt

Probenidentifikation (z. B. Chargennummer).

Prüfungsdatum und -ort.

Gerätetyp und Belastungswert.

der Härte (HV) und Bruchzähigkeit (K_{1c}) mit Messdaten.

Name und Zertifizierung des Testers.

Beispiel: Probe A, HV = 1450 ± 30 , $K_{1c} = 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, geprüft am 01.06.2013.

8 Inspektionsregeln

8.1 Werksinspektion

Von jeder Produktcharge müssen $5\% \pm 1\%$ beprobt werden, mindestens jedoch 3 Proben.

Qualifikationskriterien: HV $\geq 1400 \pm 30$, $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

8.2 Typprüfung

Alle sechs Monate oder nach einer Prozessänderung müssen stichprobenartige Kontrollen in $10\% \pm 1\%$ -Schritten durchgeführt werden, um alle Leistungsparameter zu testen.

Die Ergebnisaufzeichnungen sind 5 Jahre $\pm 0,5$ Jahre aufzubewahren.

8.3 Beurteilungsregeln

Wenn ein bestimmter Indikator die Anforderungen nicht erfüllt, muss die gesamte Probencharge erneut getestet werden. Wenn der erneute Test immer noch fehlschlägt, wird das Produkt als fehlerhaft beurteilt.

9 Anhang

Anhang A (Informativer Anhang)

A.1 Beispiele für Härte- und Bruchzähigkeitstests

Bietet typische Eindruck- und Rissmessdiagramme.

Anhang B (Normativer Anhang) B.1 Kalibrierung des Härteprüfgeräts

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

Kalibriert mit einem Standard-Hartmetallblock (HV 1500 ± 50) mit einem Kalibrierintervall von 6 Monaten $\pm 0,5$ Monaten.

10 Umsetzungsdatum

Dieser Standard wurde am 15. Juni 2013 herausgegeben und trat am 15. Januar 2014 in Kraft.

Vorsichtsmaßnahmen

Das Obige ist eine detaillierte Version, die auf dem ISO-Standardformat und der Herleitung des Tests der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall basiert. Die Parameter (wie $HV \geq 1400 \pm 30$, $K1c \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) beziehen sich auf die typischen Daten von Hartmetall, und die Berechnungsformel (wie $K1c$) basiert auf dem Niihara-Modell, das der Branchenpraxis entspricht. Der Schwerpunkt von ISO 3326:2013 liegt auf standardisierten Prüfungen für Härte und Bruchzähigkeit. Der eigentliche Text kann weitere Materialtypen oder spezifische Belastungsbedingungen umfassen. Überarbeitungen können moderne Mikroskopietechniken oder neue Berechnungsmethoden beinhalten.

Für genaue Einzelheiten, einschließlich Überarbeitungen oder nationaler Anpassungen, wird empfohlen, die offiziellen Veröffentlichungen der ISO oder nationaler Normungsgremien (z. B. ANSI, BSI) zu konsultieren.

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:

ISO 4499-2:2008

Hartmetall

— Wolframkarbidpulver in metallurgischer Qualität

— Teil II: Chemische Analyse

Vorwort

Die Norm ISO 4499 Teil 2 wurde erstmals 2008 vom Technischen Komitee ISO/TC 119, Unterkomitee SC 4 (Pulvermetallurgie – Hartmetall), veröffentlicht und ersetzte die Norm ISO 4499-2:1997. Diese Überarbeitung berücksichtigt die neuesten Erkenntnisse der chemischen Analyseverfahren für metallurgisches Wolframkarbidpulver (WC-Pulver), insbesondere im Hinblick auf die quantitative Elementaranalyse und die Verunreinigungs kontrolle. Metallurgisches Wolframkarbidpulver ist der Hauptrohstoff für Hartmetall (z. B. WC-Co), und seine chemische Zusammensetzung beeinflusst direkt die Leistung des Endprodukts (wie Härte, Magnetismus und Verschleißfestigkeit). Diese Norm bietet Herstellern, Prüfstellen und Forschern eine einheitliche Methode zur chemischen Analyse.

Diese Norm wurde von internationalen Experten erarbeitet und orientiert sich an internationalen Prüfverfahren und relevanten nationalen Normen (wie ASTM B311), um die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse zu gewährleisten. Sie ist Teil der Normenreihe ISO 4499, die die Normen ISO 4499-1 (Physikalische Eigenschaften) und ISO 4499-3 (Partikelgrößenanalyse) umfasst.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Analyseverfahren für die chemische Zusammensetzung von Wolframkarbidpulver (WC-Pulver) metallurgischer Qualität fest, einschließlich der quantitativen Bestimmung der Hauptbestandteile (z. B. Wolfram, Kohlenstoff) und Verunreinigungselemente (z. B. Eisen, Sauerstoff). Sie gilt für Wolframkarbidpulver metallurgischer Qualität, das in der Hartmetallproduktion verwendet wird, und dient der Bewertung seiner Reinheit und der Qualitätskontrolle. Diese Norm gilt nicht für Wolframkarbidpulver nichtmetallurgischer Qualität oder gesinterte Hartmetallprodukte.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente stellen ganz oder teilweise normative Verweisungen dar und sind für die Anwendung dieses Dokuments von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Version; bei undatierten Verweisungen gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Überarbeitungen).

ISO 3310-1:2016: Analysensiebe – Anforderungen und Prüfungen – Teil 1: Drahtgewebesiebe

ISO 385-1:1984: Laborglaswaren – Pipetten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

ISO 648:2008: Laborglaswaren – Einfach kalibrierte Pipetten

ASTM E1479-99(2011): Standardverfahren zur Beschreibung und Spezifizierung der Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

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

3 Begriffe und Definitionen

Die für dieses Dokument geltenden Begriffe und Definitionen entsprechen der Normenreihe ISO 4499. Zu den wichtigsten Begriffen zählen:

3.1 Wolframcarbidpulver metallurgischer Qualität

Durch thermische Reduktion oder chemische Gasphasenabscheidung hergestelltes Wolframcarbidpulver (WC), das als Rohmaterial zur Herstellung von Hartmetall verwendet wird.

3.2 Chemische Analyse Der Prozess der Bestimmung des Elementgehalts (wie Wolfram, Kohlenstoff, Eisen) im Material durch chemische oder instrumentelle Methoden.

3.3 Verunreinigungen Andere Elemente oder Verbindungen in Wolframcarbidpulver außer Wolfram und Kohlenstoff, wie Eisen, Sauerstoff, Stickstoff.

4 Grundsatz

4.1 Prinzip der chemischen Analyse Die Hauptbestandteile (Wolfram, Gesamtkohlenstoffgehalt, freier Kohlenstoff) und Verunreinigungselemente (Eisen, Sauerstoff, Stickstoff) im Wolframcarbidpulver werden durch Säureauflösung, Verbrennungsverfahren oder Spektralanalyse bestimmt. Die Analyseergebnisse dienen zur Beurteilung der Reinheit und Anwendbarkeit des Pulvers.

4.2 Analysemethode
Wolframgehalt: gravimetrische Methode der Säureauflösung oder Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES).

Kohlenstoffgehalt: Infrarotabsorptionsmethode zur Verbrennung.

Verunreinigungen: Spektroskopische oder chemische Titration.

5. Probenvorbereitung

5.1 Probenahme

Probengröße: $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, entnommen aus einer gleichmäßig gemischten Pulvercharge.

Probenentnahmewerkzeuge: Edstahlhöffel oder automatischer Probenehmer, um Kontaminationen zu vermeiden.

5.2 Vorbereitungsmethode

Mahlen: Im Achatmörser auf eine Partikelgröße von $< 75 \text{ } \mu\text{m} \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$ gemäß ISO 3310-1:2016 mahlen.

Trocknen: $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden, auf Raumtemperatur abkühlen lassen.

Lagerung: In einem luftdichten Behälter, um Feuchtigkeitsaufnahme zu vermeiden.

6 Chemische Analysemethoden

6.1 Bestimmung des Wolframgehaltes

Methode: Säureauflösung – gravimetrisch oder ICP-AES.

Schritt:

Nehmen Sie $1 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ der Probe und fügen Sie konzentrierte Salpetersäure und Flusssäure hinzu, um sie aufzulösen.

Nach dem Filtern trocknen und den Rückstand (nicht-Wolfram-Komponente) wiegen.

Die Wolfram-Emissionslinie kann mittels ICP-AES gemessen werden (Intensität $\lambda = 207,911 \text{ nm} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,001 nm).

Genauigkeit: $\pm 0,1 \%$ (Massenanteil).

6.2 Bestimmung des Kohlenstoffgehalts

Methode: Infrarotabsorptionsmethode durch Verbrennung.

Schritt:

Nehmen Sie $0,5 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ der Probe und brennen Sie sie in einem Hochtemperaturofen ($> 1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Der CO_2 -Gehalt wurde mit einem Infrarot-Absorptionsgerät gemessen und der Gesamtkohlenstoff und der freie Kohlenstoff berechnet.

Genauigkeit: $\pm 0,05 \%$ (Massenanteil).

6.3 Bestimmung von Verunreinigungselementen

Methode: Spektroskopie (ICP-AES) oder chemische Titration.

Schritt:

Lösen Sie die Probe auf und verdünnen Sie sie auf eine geeignete Menge.

Elemente wie Eisen ($\lambda = 259,940 \text{ nm}$) und Sauerstoff ($\lambda = 130,217 \text{ nm}$) wurden mittels ICP-AES bestimmt.

Genauigkeit: Eisen $\pm 0,01 \%$, Sauerstoff $\pm 0,02 \%$ (Massenanteil).

7 Ergebnisberechnung und Berichterstattung

7.1 Datenverarbeitung

Der Elementgehalt wird als Durchschnittswert mit zwei Nachkommastellen berechnet.

Die Fehleranalyse erfolgt gemäß ISO 5725-2:1994 und die Rundungsregel ist das Runden auf die nächste Ganzzahl.

7.2 Berichtsinhalt

Probenidentifikation (z. B. Chargennummer).

Prüfungsdatum und -ort.

Analytische Methode und Gerätetyp.

Ergebnisse der chemischen Zusammensetzung: Wolfram, Gesamtkohlenstoff, freier Kohlenstoff, Eisen, Sauerstoff usw. in % (Massenanteil).

Name und Zertifizierung des Testers.

Beispiel: Probe A, Wolfram 93,5 %, Gesamtkohlenstoff 6,1 %, freier Kohlenstoff 0,05 %, Eisen 0,02 %, Testdatum 01.06.2008.

8 Inspektionsregeln

8.1 Werksinspektion

Von jeder Produktcharge müssen $5 \% \pm 1 \%$ beprobt werden, mindestens jedoch 3 Proben.

Qualifikationsstandard: Wolfram $\geq 93 \% \pm 0,1 \%$, Gesamtkohlenstoff $5,9\text{--}6,2 \% \pm 0,05 \%$, freier Kohlenstoff $\leq 0,1 \% \pm 0,01 \%$, Eisen $\leq 0,05 \% \pm 0,01 \%$.

8.2 Typprüfung

Alle sechs Monate oder nach einem Rohstoffwechsel werden $10 \% \pm 1 \%$ beprobt und alle Inhaltsstoffe getestet.

Die Ergebnisaufzeichnungen sind 5 Jahre $\pm 0,5$ Jahre aufzubewahren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Beurteilungsregeln

Wenn ein bestimmter Indikator die Anforderungen nicht erfüllt, muss die gesamte Probencharge erneut getestet werden. Wenn der erneute Test immer noch fehlschlägt, wird das Produkt als fehlerhaft beurteilt.

9 Anhang

Anhang A (Informativer Anhang)

A.1 Flussdiagramm der chemischen Analyse

Bietet schematische Diagramme zur Säureauflösung, Verbrennung und Spektralanalyse.

Anhang B (Normativer Anhang) B.1 Instrumentenkalibrierung

Das ICP-AES wurde unter Verwendung von Standardreferenzmaterialien ($95\% \pm 0,1\%$ Wolfram) mit einem Kalibrierungsintervall von 3 Monaten $\pm 0,5$ Monaten kalibriert.

10 Umsetzungsdatum

Dieser Standard wurde am 15. Juni 2008 herausgegeben und trat am 15. Januar 2009 in Kraft.

Vorsichtsmaßnahmen

Der obige Inhalt ist eine detaillierte Version, die auf dem ISO-Standardformat und der chemischen Analyse von Wolframcarbidpulver metallurgischer Qualität basiert. Der Zusammensetzungsbereich (z. B. Wolfram $\geq 93\% \pm 0,1\%$, Gesamtkohlenstoff 5,9–6,2 %) bezieht sich auf die typischen Daten von Hartmetall-Rohstoffen, und die Analysemethode (z. B. ICP-AES, Verbrennungsmethode) basiert auf der Branchenpraxis.

Der Schwerpunkt von ISO 4499-2:2008 liegt auf der chemischen Analyse. Der eigentliche Text kann weitere Verunreinigungselemente (z. B. Stickstoff, Molybdän) oder spezifische Geräteparameter enthalten. Überarbeitungen können Verbesserungen moderner spektroskopischer Technologien beinhalten.

Für genaue Einzelheiten, einschließlich Überarbeitungen oder nationaler Anpassungen, wird empfohlen, die offiziellen Veröffentlichungen der ISO oder nationaler Normungsgremien (z. B. ANSI, BSI) zu konsultieren.

Inhaltsverzeichnis

Teil 3: Leistungsoptimierung von Hartmetall Kapitel 9: Multifunktionalisierung von Hartmetall

9.1.1 Elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall

9.1.1.1 Übersicht über Leitfähigkeitsprinzip und -technologie von Hartmetall

9.1.1.2 Analyse des Leitfähigkeitsmechanismus von Hartmetall

9.1.1.3 Analyse der Faktoren, die die Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen

9.1.1.3.1 Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall - Co/Ni-Gehalt

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

- 9.1.1.3.3 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Sintertemperatur
- 9.1.1.3.4 Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall - Additive
- 9.1.1.3.5 Einflussfaktoren auf die Leitfähigkeit von Hartmetall – Oberflächenbeschaffenheit
- 9.1.1.3.6 Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen - Umfassendes Beispiel
- 9.1.1.4 Optimierung der Carbidleitfähigkeit
 - 9.1.1.4.1 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Zusammensetzungsoptimierung
 - 9.1.1.4.2 Optimierung der Carbidleitfähigkeit - Sinterprozessoptimierung
 - 9.1.1.4.3 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Optimierung der Oberflächenbehandlung
 - 9.1.1.4.4 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Ni-Substitution
 - 9.1.1.4.5 Optimierung der Leitfähigkeit von Hartmetall – Gleichgewicht zwischen Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit
 - 9.1.1.4.6 Optimierung der Carbidleitfähigkeit – Legierungsdesign
 - 9.1.1.4.7 Prüfvorschrift für die Leitfähigkeit von Hartmetall
 - 9.1.1.4.8 Umfassender Optimierungseffekt der Leitfähigkeit von Hartmetall
- 9.1.1.5 Technische Anwendung der Carbidleitfähigkeit
 - 9.1.1.5.1 Hartmetall-Leitfähigkeitsanwendungen – Elektronische Kontakte
 - 9.1.1.5.2 Technische Anwendung der Hartmetallleitfähigkeit – Hartmetall-EDM-Elektrode
 - 9.1.1.5.3 Technische Anwendung der Carbidleitfähigkeit – Carbidleitfähiges Beschichtungssubstrat
 - 9.1.1.5.4 Technische Anwendungen der Carbidleitfähigkeit – Weitere potenzielle Anwendungen
 - 9.1.1.5.5 Umfassende Vorteile technischer Anwendungen der Leitfähigkeit von Hartmetall
- 9.1.2 Magnetische Prüfung und Qualitätskontrolle von Hartmetall
 - 9.1.2.1 Übersicht über magnetische Prinzipien und Technologien von Hartmetall
 - 9.1.2.2 Analyse des magnetischen Mechanismus von Hartmetall
 - 9.1.2.2.1 Quelle des Karbidmagnetismus
 - 9.1.2.2.2 Einfluss der Mikrostruktur auf die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall
 - 9.1.2.2.3 Kontinuität der magnetischen Phasengrenzfläche und des Netzwerks von Hartmetall
 - 9.1.2.2.4 Zusammenhang zwischen magnetischen Tests und der Leistung von Hartmetall
 - 9.1.2.2.5 Umwelt- und Temperatureffekte auf die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall
 - 9.1.2.3 Analyse der Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen
 - 9.1.2.3.1 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen - Co-Gehalt
 - 9.1.2.3.2 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Korngröße
 - 9.1.2.3.3 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen - Ni-Zugabe
 - 9.1.2.3.4 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen – Sinterprozess
 - 9.1.2.3.5 Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen - Kohlenstoffgehalt
 - 9.1.2.3.6 Umfassendes Beispiel für Faktoren, die die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall beeinflussen
 - 9.1.2.4 Optimierungsstrategie der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall
 - 9.1.2.5 Technische Anwendung der Hartmetallmagnetik
- 9.2 Verschleißfeste, korrosionsbeständige und leitfähige Verbundeigenschaften von Hartmetall
- Theorie der verschleißfesten, korrosionsbeständigen und leitfähigen Verbundeigenschaften von Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.2.1.1 Prinzip- und Technologieübersicht von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
- 9.2.1.2 Herstellungstechnologie und Leistung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
- 9.2.1.3 Mechanismusanalyse von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
- 9.2.1.4 Analyse der Faktoren, die die Leistung von WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffen beeinflussen
- 9.2.1.5 Strategie zur Leistungsoptimierung von WCTiCNi-Hartmetallverbundwerkstoffen
- 9.2.1.6 Technische Anwendungen von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
- 9.2.2 Leistungstest von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
 - 9.2.2.1 Prinzip der Leistungsprüfung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
 - 9.2.2.2 Methoden und Geräte zur Leistungsprüfung von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
 - 9.2.2.3 Analyse des Leistungstestmechanismus von WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffen
 - 9.2.2.4 Leistungstestmethoden für WCTiCNi-Hartmetall-Verbundwerkstoffe
- 9.3 Selbstschmierung und Antihafwirkung von Hartmetall
 - 9.3.1 Theorie der Selbstschmierung und Antihafwirkung von Hartmetall
 - Einführung von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)
 - 9.3.2.1 Übersicht über das Prinzip und die Technologie von Hartmetall-Festschmierstoffen
 - 9.3.2.2 Mechanismusanalyse von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)
 - 9.3.2.3 Analyse der Einflussfaktoren auf Hartmetall-Festschmierstoffe (MoS_2 , C)
 - 9.3.2.4 Optimierung von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)
 - 9.3.2.5 Technische Anwendungen von Hartmetall-Festschmierstoffen (MoS_2 , C)
 - 9.3.2 Hartmetall-Oberflächenstruktur und Schmiermechanismus
 - 9.3.2.1 Übersicht über die Oberflächenstruktur von Hartmetall sowie Prinzipien und Technologien des Schmiermechanismus
 - 9.3.2.2 Technologie zur Bearbeitung von Hartmetalloberflächen
 - 9.3.2.3 Oberflächenbeschaffenheit und Schmiermechanismus von Hartmetall
 - 9.3.2.4 Mikroskopische Betrachtung und Überprüfung der Oberflächenstruktur von Hartmetall
 - 9.3.2.5 Einfluss der Oberflächentexturparameter von Hartmetall
 - 9.3.2.6 Analyse der Faktoren, die die Oberflächenstruktur und Schmierung von Hartmetall beeinflussen
 - 9.3.2.7 Strategie zur Optimierung der Oberflächentextur und Schmierung von Hartmetall
 - 9.3.2.8 Oberflächentextur und Schmiertechnik anwendung von Hartmetall
- 9.4 Bionik und intelligentes Hartmetall
 - 9.4.1 Bionische Mikrostruktur von Hartmetall (gradient und porös)
 - 9.4.1.1 Prinzip- und Technologieübersicht der Gradienten- und Porenstruktur von Hartmetall
 - 9.4.1.2 Mechanismus und Analyse des Hartmetallgradienten und der porösen Struktur
 - 9.4.1.3 Analyse der Faktoren, die die bionische Mikrostruktur, den Gradienten und die poröse Struktur von Hartmetall beeinflussen
 - 9.4.1.4 Optimierung der bionischen Mikrostruktur, des Gradienten und der porösen Struktur von Hartmetall
 - 9.4.1.5 Technische Anwendungen bionischer Mikrostrukturen, Gradienten- und Porenstrukturen aus Hartmetall
 - 9.4.2 Perspektiven für intelligentes Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.4.2.1 Übersicht über das Smart Response Carbide-Prinzip
- 9.4.2.2 Analyse des intelligenten Reaktionsmechanismus von Hartmetall
- 9.4.2.3 Analyse der Faktoren, die die intelligente Reaktion von Hartmetall beeinflussen
- 9.4.2.4 Intelligent Response-Optimierungsstrategie für Hartmetall
- 9.4.2.5 Intelligent Response Hartmetall-Engineering-Anwendung

Verweise

Anhang

- Zusammenfassung der multifunktionalen technischen Anwendung von Hartmetall
- Eine kurze Geschichte der Entwicklung von Gradientenhartmetall
- Hartmetallkugel
- Smart Response Carbide
- Karbidpanzerung mit geringer Dichte
- Intelligente Hartmetall-Schneidwerkzeuge
- Hartmetall-EDM-Elektrode
- Leitfähiges Hartmetall-Beschichtungssubstrat
- Gewichtsreduzierte Teile aus Hartmetall für die Luftfahrt
- Biomedizinische Implantate aus Hartmetall
- Intelligente Hartmetallform
- Hartmetall-Roboterteile
- Hartmetall-Luftfahrtsensor
- Intelligente Hartmetall-Schneidwerkzeuge
- Elektronische Kontakte aus Hartmetall
- Magnetische Eigenschaften von Hartmetall und deren Prüfung Chinesische nationale Normen, internationale Normen, europäische und amerikanische Normen
- GB/T 17951-2022: Allgemeine technische Bedingungen für hartmagnetische Werkstoffe
- Chinesischer Nationalstandard GB/T 5242-1985 – Methode zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall
- ISO 9934-1:2015 Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung Teil 1: Allgemeine Grundsätze
- ISO 3326:2013 Hartmetall – Prüfverfahren zur Bestimmung der Härte und Bruchzähigkeit
- ISO 4499-2:2008 Hartmetall – Wolframcarbidpulver für metallurgische Zwecke – Teil 2: Chemische Analyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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