

Wolframhartmetall

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

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 8: Korrosions- und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

Hartmetall ist ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co), Nickel (Ni) und anderen Metallen als Bindephase. Aufgrund seiner hervorragenden Eigenschaften wird es häufig in Schneidwerkzeugen, Bergbaumaschinen und verschleißfesten Teilen eingesetzt. Im Folgenden werden Konzept und typische Eigenschaften unter den Aspekten Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit kurz erläutert.

Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall

Korrosionsbeständigkeit bezeichnet die Fähigkeit von Hartmetall, chemischer Erosion in korrosiven Medien (wie Säuren, Laugen und Salzlösungen) zu widerstehen. Diese Eigenschaft wird hauptsächlich durch die Materialzusammensetzung und die Mikrostruktur beeinflusst.

Die Bindungsphase von Hartmetall spielt eine Schlüsselrolle für dessen Korrosionsbeständigkeit. Hartmetall mit Kobalt als Bindungsphase (wie die YG-Serie) weist in sauren Medien eine schlechte Leistung auf. Beispielsweise korrodiert Kobalt in Schwefelsäure- oder Salzsäureumgebungen leicht, wodurch sich die Materialoberfläche allmählich auflöst. Am Beispiel von YG6 (mit 6 % Kobalt) beträgt die Korrosionsrate in 10 %iger Salzsäure bei Raumtemperatur etwa 0,1 bis 0,2 mm/Jahr, während es in schwach alkalischen oder neutralen Medien (wie 10 %iger Natronlauge) kaum korrodiert. Im Gegensatz dazu weist Hartmetall mit Nickel als Bindungsphase (wie die YN-Serie) eine höhere Korrosionsbeständigkeit auf, insbesondere in alkalischen und oxidierenden Medien. Es ist stabiler und eignet sich für den Einsatz unter rauen Bedingungen wie der Meeresumwelt. Darüber hinaus können Defekte in der Mikrostruktur die Korrosionsbeständigkeit ebenfalls erheblich beeinträchtigen. Wenn das Hartmetall eine hohe Porosität aufweist oder Verunreinigungen wie freien Kohlenstoff und die η -Phase enthält, werden diese Defekte zum Ausgangspunkt der Korrosion und beschleunigen den Materialabbau.

Hohe Temperaturbeständigkeit von Hartmetall

Unter Hochtemperaturbeständigkeit versteht man die Fähigkeit von Hartmetall, seine Härte, Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen zu bewahren. Diese Eigenschaft wird auch von Zusammensetzung und Temperatur beeinflusst.

Hartmetall weist bei niedrigen Temperaturen eine gute Leistung auf und behält üblicherweise unter 600 °C eine hohe Härte und Festigkeit. Beispielsweise kann YG8 (mit 8 % Kobalt) bei 600 °C noch eine Härte von etwa 1.200 HV behalten, was nur etwa 20 % weniger ist. Übersteigt die Temperatur jedoch 800 °C, beginnt die Bindephase (z. B. das Kobalt) weich zu werden, was zu einer deutlichen Abnahme der Gesamtfestigkeit und -härte des Materials führt. Beispielsweise kann die Härte von YG8 bei 1.000 °C auf 500–600 HV sinken. Außerdem wird die Oxidationsbeständigkeit von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hartmetall bei hohen Temperaturen beeinträchtigt. Wolframkarbid wandelt sich in einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen in Wolframoxid (WO_3) um, was zu Oberflächenablösung führt und die Lebensdauer beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu weist Hartmetall mit zugesetztem Titankarbid (TiC) (wie z. B. YT15) bei 800°C eine bessere Oxidationsbeständigkeit auf, seine Festigkeit sinkt jedoch trotzdem um 20–30 %.

Die Korrosionsbeständigkeit und die Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall sind wichtige Faktoren für den Einsatz in rauen Umgebungen. Nickelhaltiges Hartmetall weist in verschiedenen Medien eine bessere Korrosionsbeständigkeit auf, während kobalthaltiges Hartmetall in sauren Umgebungen korrosionsanfällig ist. Hartmetall ist unter 600°C temperaturbeständig, seine Härte und Oxidationsbeständigkeit nehmen jedoch bei höheren Temperaturen deutlich ab. Diese Eigenschaften bestimmen die Anwendbarkeit von Hartmetall in verschiedenen Anwendungsszenarien und bilden eine wichtige Grundlage für dessen Auswahl und Einsatz.

Die Verwendung von Hartmetall (WCCo) in rauen Umgebungen ist für seine Anwendung in der Chemie-, Schifffahrts- und Luftfahrtbranche entscheidend. Beispielsweise muss Hartmetall in sauren Lösungen ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) starken chemischen Angriffen standhalten, in Salznebel ($> 1000 \pm 100$ Std.) Lochfraß vermeiden und in Flugzeugtriebwerken ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) seine Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bewahren. Die elektrochemische Aktivität der Bindungsphase Co (Korrosionspotenzial $E_{\text{corr}} \sim 0,3 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE) führt jedoch leicht zu Korrosion, und WC oxidiert bei hohen Temperaturen zu WO_3 (Dicke $> 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), was zu Leistungseinbußen führt. Die Optimierungsstrategie muss bei der Mikrostruktur (WC-Korn $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $6\% \pm 1\%$), den Additiven (wie Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) und dem Oberflächenschutz (Beschichtungsdicke $520 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) ansetzen, um eine synergetische Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit zu erreichen.

diskutiert das Verhalten und den Optimierungspfad von WCCo in sauren, salzhaltigen und Hochtemperaturumgebungen unter vier Gesichtspunkten: **Korrosionsbeständigkeitsmechanismus, hohe temperatur leistung, Methode zur Leistungsoptimierung sowie Prüfung und Bewertung. Der Korrosionsbeständigkeitsmechanismus zeigt die Natur der Korrosion durch die elektrochemische Theorie (Tafel-Kurve, $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); die Hochtemperaturleistung konzentriert sich auf Oxidationsbeständigkeit (Gewichtszunahme $< 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) und thermische Ermüdung (Rißbildung $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$); die Optimierungsmethode schlägt eine Ni-basierte Bindungsphase (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und eine Cr_3C_2 -Beschichtung (Härte $> \text{HV } 1500 \pm 30$) vor; Prüfung und Bewertung kombinieren ISO 9227, ASTM G59 und Thermoschocktest ($> 500\text{-mal} \pm 50\text{-mal}$), um eine quantitative Grundlage zu bieten.**

Beispielsweise beträgt der Gewichtsverlust von WC auf Ni-Basis ($\text{Ni } 10\% \pm 1\%$) im Salzsprühnebel $< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; die Härte von Cr_3C_2 -beschichteten Werkzeugen bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt $> \text{HV } 1200 \pm 30$ und die Lebensdauer beträgt > 5000 Stunden ± 500 Stunden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dieses Kapitel schließt nahtlos an Kapitel 6 (Beschichtungsverschleißrate $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) und Kapitel 7 ($K_1 \leq 820 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) an und bildet die Grundlage für Kapitel 9 (Multifunktionale Verbundwerkstoffe).

8.1 Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall ist eine wichtige Grundlage für seinen langfristigen Einsatz in aggressiven chemischen Umgebungen (wie Säuren, Salznebel und alkalischen Umgebungen). Seine Gewichtsverlustrate liegt üblicherweise bei $0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Dies weist eine gute Stabilität auf und ist in der Lage, Korrosion in sauren ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), Salznebel- (NaCl -Konzentration $5 \% \pm 0,1 \%$) und alkalischen ($\text{pH} > 10 \pm 0,1$) Umgebungen wirksam zu widerstehen. Der Korrosionsprozess wird hauptsächlich durch die elektrochemische Aktivität der Bindungsphase (wie Kobalt, Co) angetrieben, und seine Korrosionsstromdichte (i_{corr}) beträgt etwa $10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$, wodurch sich Kobalt bevorzugt auflöst, was wiederum dazu führt, dass die Wolframkarbidpartikel (WC) (Größe $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) abfallen und Korrosionslöcher mit einem Durchmesser von etwa $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ bilden. Obwohl WC selbst eine extrem hohe chemische Stabilität aufweist und seine Auflösungsrate äußerst niedrig ist ($< 10^{-8} \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$), kann es bei unzureichender Bindungsstärke zwischen WC und der Bindungsphasenschnittstelle ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) leicht zu Abblättern an der Schnittstelle kommen, was Korrosionsschäden deutlich beschleunigt. Zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit muss die Korrosionsstromdichte der Bindungsphase (Ziel $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$) verringert werden, wodurch seine elektrochemische Stabilität (Korrosionspotenzial $E_{\text{corr}} > 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE) verbessert und die Bindungsstärke der WC-Co-Schnittstelle erhöht wird.

Aufgrund des elektrochemischen Verhaltens von WC und der Bindungsphase ist Korrosion im Wesentlichen ein elektrochemischer Prozess. Kobalt fungiert als Anode für die oxidative Auflösung ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), während WC aufgrund seiner hohen chemischen Trägheit häufig als Kathode an der Reaktion teilnimmt. Dieser galvanische Effekt ist die Hauptantriebskraft für Korrosion. In einer sauren Umgebung ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) beschleunigen H^+ -Ionen die Auflösungsreaktion von Kobalt, während in einer Salzsprühumgebung (NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$) Cl^- -Ionen den Passivierungsfilm auf der Kobaltoberfläche zerstören können, was zu verstärkter Lochfraßbildung führt. Mikroskopische Analysen zeigen, dass sich Korrosionslöcher hauptsächlich an der WC-Co-Grenzfläche konzentrieren, was darauf hindeutet, dass eine unzureichende Grenzflächenbindung der Hauptfaktor für das Versagen ist. Dieser Mechanismus wurde durch das Studium der elektrochemischen Theorie und von Teststandards (wie ISO 9227, ASTM G59) weiter verifiziert. In tatsächlichen Fällen beträgt die Gewichtsverlustrate von WC-10Co-Hartmetall in einer Salzsprühumgebung $0,09 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, was die begrenzte Korrosionsbeständigkeit widerspiegelt.

Der Korrosionswiderstand von Hartmetall beruht im Allgemeinen hauptsächlich auf der elektrochemischen Auflösung der Bindungsphase und dem Versagen der Grenzfläche, was sich in sauren und salzhaltigen Umgebungen durch Lochfraß und Partikelablösung äußert. Durch die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reduzierung der Korrosionsstromdichte, die Verbesserung der elektrochemischen Stabilität und die Erhöhung der Grenzflächenbindungskraft kann die Korrosionsbeständigkeit effektiv verbessert werden, was den Einsatz in rauen Umgebungen theoretisch unterstützt.

8.1.1 Elektrochemisches Verhalten der Hartphase Wolframkarbid (WC) und der Bindephase in Hartmetall

Prinzip und technischer Überblick

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall wird durch das elektrochemische Verhalten der WC-Hartphase und der Co-Bindungsphase bestimmt, wobei eine Korrosionsrate von $<0,01 \text{ mm}/\pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ angestrebt wird. Die Hartphase des Hartmetalls, Wolframkarbid (WC) weist eine ausgezeichnete chemische Stabilität in sauren und neutralen Umgebungen auf ($E_{\text{corr}} 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE), nahezu ohne Auflösung (Rate $<10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). Im Gegensatz dazu ist Co anfällig für elektrochemische Oxidation ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2e^-$) mit einem Korrosionsstrom $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, wodurch Korrosionslöcher (Durchmesser $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) entstehen, die die WCCo-Grenzfläche stark schwächen (Bindungsfestigkeit $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). Das elektrochemische Verhalten folgt der Butler-Volmer-Gleichung:

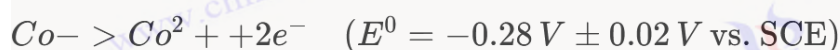
$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

Dabei ist $i_0 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (Austauschstromdichte), $\alpha \sim 0,5 \pm 0,05$ (Übertragungskoeffizient) und η das Überpotential ($<0,1 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$). Das Optimierungsziel ist die Erhöhung von E_{corr} und reduzieren i_{corr} .

Der elektrochemische Test verwendet ein Dreielektrodensystem (WCCo-Arbeits Elektrode, SCE-Referenzelektrode, Pt-Hilfselektrode). Der Elektrolyt enthält $3,5 \% \pm 0,1 \% \text{ NaCl}$ (zur Simulation einer Meeresumgebung) und $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M} \text{ H}_2 \text{SO}_4$ (zur Simulation einer sauren Umgebung). Das Prüfgerät zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit (Spannung $\pm 0,001 \text{ V}$, Stromstärke $\pm 10^{-9} \text{ A}$) aus, um zuverlässige Daten zu gewährleisten. Beispielsweise weist WC10Co (Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) in $\text{H}_2 \text{SO}_4$ einen i_{corr} von $\sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ auf. Nach Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) sinkt dieser Wert auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, wodurch die Korrosionsbeständigkeit deutlich verbessert wird. Dieser Abschnitt bietet umfassende Anleitungen durch Theorie, Experimente und Optimierungsstrategien.

Mechanismus und Analyse

Die hohe Stabilität von WC beruht auf seiner hohen Bindungsenergie ($700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). Es ist im pH-Bereich von $212 \pm 0,1$ nahezu unlöslich (Rate $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). Die Korrosionsreaktion von Co ist:



In saurer Umgebung beschleunigt H^+ die Auflösung von Co (Rate $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bildet Korrosionsnarben (Tiefe $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). In neutralem Salzsprühnebel verursacht Cl^- Lochfraß (Lochdurchmesser $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), und i_{corr} steigt um $20 \% \pm 5 \%$. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Korrosion hauptsächlich durch die Co-Auflösung verursacht wird und WC-Partikel aufgrund des Verlusts der Co-Trägersubstanz abfallen (Fallrate $\sim 0,1 \% \pm 0,02 \%$), was zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit $R_a (> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m})$ führt.

WCCo- Grenzfläche ist korrosionskritisch. Bei einer Grenzflächenenergie von $1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ beträgt die Bindungsfestigkeit $>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, und die Partikelablösungsrate verringert sich um $50 \% \pm 5 \%$. Eine Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ erhöht die Korngrenzendichte ($>10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) und verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Eine ungleichmäßige Co-Verteilung (Abweichung $>0,5 \% \pm 0,1 \%$) verschlimmert jedoch die lokale Korrosion (i_{kor} erhöht sich um $30 \% \pm 5 \%$). Durch Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) zur Bildung einer Cr_2O_3 -Passivierungsschicht (Dicke $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), E_{kor} steigt auf $0,15 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ und i_{kor} nimmt um $40 \% \pm 5 \%$ ab. Die XPS-Analyse bestätigte die Bildung von Cr_2O_3 ($\text{Cr}3\text{p}$ -Peak $\sim 577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), das die Co-Auflösung wirksam hemmte.

Analyse der Faktoren, die die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

Hartmetall hat Wolframkarbid (WC) als hauptsächliche Hartphase und Kobalt (Co) und andere Metalle als Bindephase. Seine Korrosionsbeständigkeit ist in aggressiven chemischen Umgebungen wie Säuren, Salzsprühnebel und Laugen von großer Bedeutung. Sein Korrosionsverhalten wird jedoch von mehreren Faktoren beeinflusst, wie den Materialeigenschaften (einschließlich Co-Gehalt, Korngröße, Additiven, Oberflächenrauheit) und externen Umgebungsparametern (wie Elektrolytzusammensetzung, pH-Wert, Ionenkonzentration). Ausgehend von diesen Schlüsselfaktoren und kombiniert mit elektrochemischen Daten, mikroskopischen Analysen, Umweltsimulationen und tatsächlichen Fällen werden die Einflussmechanismen der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall eingehend erforscht und die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Faktoren und ihr Einfluss auf die Betriebsleistung des Materials analysiert.

(1) Einfluss des Kobaltgehalts (Co) im Hartmetall als Bindephase

Die Bindungsphase Kobalt (Co) ist die wichtigste korrosionsaktive Komponente in Hartmetall, und ihr Gehalt bestimmt direkt die elektrochemische Korrosionsneigung des Materials. Studien haben gezeigt, dass bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ die Korrosionsstromdichte (i_{kor}) beträgt etwa $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, was auf eine gewisse Korrosionsbeständigkeit in sauren oder salzhaltigen Umgebungen hindeutet. Wenn der Co-Gehalt jedoch auf $12 \% \pm 1 \%$ steigt, i_{kor} um etwa $50 \% \pm 5 \%$ an, und die Korrosionsbeständigkeit nimmt deutlich ab. Der Hauptgrund für dieses Phänomen besteht darin, dass mit zunehmendem Co-Gehalt die dem korrosiven Medium ausgesetzte Oberfläche zunimmt, wodurch die anodische Auflösungsreaktion ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) beschleunigt wird. Außerdem verringert ein hoher Co-Gehalt auch die Passivierungsfähigkeit des Materials, sodass es in Gegenwart von Cl^- -Ionen anfälliger für Lochfraß wird. Am Beispiel der WC-12Co-Probe: Nach 24-stündiger Einwirkung einer $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ -Lösung erreichte die Korrosionslochtiefe $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ und auf der Oberfläche bildeten sich dichte Lochfraßbereiche, was darauf hindeutet,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dass der hohe Co-Gehalt die lokale Korrosion deutlich verschlimmerte .

(2) Einfluss der Korngröße

, da sie die Korngrenzendichte und den Eindringweg des korrosiven Mediums beeinflusst. Bei geringer Korngröße (z. B. $0,51 \pm 0,01 \mu\text{m}$) ist die Zahl der Korngrenzen groß, wodurch der Eindringweg des korrosiven Mediums gestreut wird und die Korrosionsnarben weniger und flacher sind (Narbentiefe $< 5 \pm 0,5 \mu\text{m}$). Feine Körner sorgen außerdem für eine gleichmäßigere Verteilung der WC-Co-Grenzfläche, wodurch die Auflösung von Kobalt bis zu einem gewissen Grad eingeschränkt wird, was das Ausmaß des Materialversagens verringert. Wenn die Korngröße jedoch auf $2 \pm 0,01 \mu\text{m}$ steigt, verringert sich die Korngrenzendichte, die lokale Korrosionskonzentration verstärkt sich und die Tiefe der Korrosionsnarben nimmt um etwa $20 \% \pm 5 \%$ zu. Die größere Korngröße führt zu einer Verringerung der freiliegenden Fläche der WC-Co-Grenzfläche, und die Auflösung von Kobalt konzentriert sich auf wenige Grenzflächen, wodurch tiefere Korrosionsnarben entstehen. Insbesondere in sauren Umgebungen dringen H^+ -Ionen leichter entlang der Korngrenzen ein und beschleunigen so den Materialabbau.

(3) Wirkung von Zusatzstoffen

wie Chromcarbid (Cr_3C_2) optimieren die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall erheblich, indem sie die chemischen Eigenschaften und den Oberflächenzustand der Bindungsphase verändern. Versuchsdaten zeigen, dass die Zugabe von $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{Cr}_3\text{C}_2$ i_{corr} um etwa $40 \% \pm 5 \%$ reduzieren kann, dank der Reaktion von Cr mit Sauerstoff während des Hochtemperaturesinterns, bei der eine dichte Cr_2O_3 -Passivierungsschicht entsteht, die den direkten Kontakt zwischen korrosiven Medien (wie H^+ oder Cl^-) und Kobalt blockiert. Am Beispiel der WC-10Co-Probe mit Cr_3C_2 beträgt die Tiefe der Korrosionsgrube in einer $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ -Lösung nur $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, was deutlich niedriger ist als die von WC-12Co ($10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) ohne Cr_3C_2 . Die energiedispersive Spektrometrie (EDS) zeigt außerdem, dass die Cr_2O_3 -Schicht etwa $0,1\text{-}0,2 \mu\text{m}$ dick ist, wodurch das korrosive Medium wirksam isoliert wird. Wenn der Cr_3C_2 -Gehalt jedoch $1 \% \pm 0,01 \%$ übersteigt, können sich im Material übermäßig spröde Phasen bilden (wie z. B. die η -Phase mit einem Anteil von $> 1 \% \pm 0,2 \%$), was zu einer Verringerung der Bruchzähigkeit (K_{IC}) um etwa $10 \% \pm 2 \%$ führt, was eine potenzielle Gefahr für Anwendungen darstellt, die mechanischer Beanspruchung ausgesetzt sind (wie z. B. Schneidwerkzeuge).

(4) Einfluss der Elektrolytumgebung

Die chemischen Eigenschaften des Elektrolyten sind die wichtigsten externen Faktoren, die die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen. In einer sauren Umgebung ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) ist die H^+ -Ionenkonzentration hoch, was die anodische Auflösungsreaktion von Kobalt beschleunigt. i_{corr} steigt um etwa $30 \% \pm 5 \%$, und die Korrosionsrate erhöht sich erheblich. Insbesondere in starken Säuren (wie 1 M HCl) kann die Ausbreitungsrate lokaler Korrosionslöcher $0,5 \pm 0,05 \mu\text{m/h}$ erreichen. In einer Umgebung mit hochkonzentriertem Salzsprühnebel (NaCl -Konzentration $> 5 \% \pm 0,1 \%$) zerstören Cl^- -Ionen als stark eindringende Anionen den Passivierungsfilm auf der Kobaltoberfläche (wie $\text{Co}(\text{OH})_2$ oder CoO), verursachen Lochfraß und die Lochfraßrate erhöht sich um etwa $25 \% \pm 5 \%$. Cl^- greift vorzugsweise die WC-Co-Grenzfläche durch Adsorption und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diffusion an, wodurch die Dichte der Korrosionslöcher auf 15–20/mm² ansteigt. Darüber hinaus verstärkt eine Erhöhung der Elektrolyttemperatur (z. B. 50 °C ± 2 °C) diese Effekte weiter und erhöht i_{kor} um weitere 10 % ± 2 %, was den Materialabbau verschlimmert.

(5) Einfluss der Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit (Ra) beeinflusst die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall direkt, indem sie die Kontakteigenschaften zwischen dem Material und dem korrosiven Medium verändert. Bei geringer Oberflächenrauheit ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ist die Oberfläche glatt, weist weniger Defekte (wie Mikrorisse und Vertiefungen) auf, die tatsächliche Kontaktfläche mit dem korrosiven Medium ist klein, i_{kor} bleibt niedrig und es wird eine gute Korrosionsbeständigkeit gezeigt. Steigt R_a jedoch auf über $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nehmen die Oberflächendefekte deutlich zu, und das korrosive Medium bleibt leicht in diesen Bereichen zurück und bildet lokale elektrochemische Mikrobatterien, was zu einem Anstieg von i_{kor} um etwa 15 % ± 3 % führt. Sehr raue Oberflächen können außerdem Spannungskonzentrationen verursachen, insbesondere in Umgebungen mit zyklischer Korrosion (wie etwa Salzsprühzyklustests), wodurch die Ausdehnung und Tiefe von Korrosionslöchern beschleunigt wird und die Lebensdauer des Materials ernsthaft beeinträchtigt wird.

(6) Wechselwirkungen zwischen Faktoren

Die oben genannten Faktoren beeinflussen nicht unabhängig voneinander, sondern bestimmen gemeinsam durch komplexe Wechselwirkungen die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall. Beispielsweise führt ein hoher Co-Gehalt ($> 12 \% \pm 1 \%$) zu einer rauen Oberfläche ($R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). i_{kor} kann auf $5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ansteigen, und die Korrosionslochtiefe erhöht sich auf $15 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, was weit über den Effekt eines einzelnen Faktors hinausgeht. Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) kann die negativen Auswirkungen eines erhöhten Co-Gehalts teilweise ausgleichen, aber in einer sauren Umgebung mit einem pH-Wert $< 3 \pm 0,1$ kann die Schutzwirkung der Cr_2O_3 -Schicht durch H^+ -Angriffe geschwächt werden. Darüber hinaus ist der Kopplungseffekt zwischen Korngröße und Elektrolytumgebung signifikant. Feine Körner ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weisen bei niedrigen Cl^- -Konzentrationen eine gute Leistung auf, bei Salzsprühnebel mit hoher Konzentration ($\text{NaCl} > 5 \% \pm 0,1 \%$) kann jedoch immer noch Lochkorrosion auftreten, was auf die begrenzten Umweltbedingungen beim Korngrenzenschutz hinweist.

(7) Umfassende Fallanalyse

von WC-12Co- und WC-10Co-Proben mit Cr_3C_2 -Zusatz: Nach 24 -stündiger Einwirkung einer 0,1M H_2SO_4 -Lösung erreichte die Korrosionslochtiefe von WC-12Co $10 \pm 1 \mu\text{m}$, und die Oberfläche zeigte deutliche Lochfraßbildung. Die EDS-Analyse ergab, dass der Co-Gehalt am Lochgrund deutlich reduziert war. Im Gegensatz dazu verringerte sich die Korrosionslochtiefe von WC-10Co durch die Zugabe von 0,5 % Cr_3C_2 auf $3 \pm 0,5 \mu\text{m}$, und die Dicke der Cr_2O_3 -Schicht betrug etwa $0,15 \mu\text{m}$, wodurch die Auflösung von Kobalt und die Ablösung von WC-Partikeln erfolgreich verhindert wurden. Weitere Tests in einer 5%igen NaCl-Salzsprühumgebung zeigten, dass der Gewichtsverlust von WC-12Co $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ erreichte, während WC-10Co nur $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ betrug. Die Korrosionsbeständigkeit erhöhte sich um etwa 40 % ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 %, was die Wirksamkeit des Additivs und von Co bestätigte.
Synergieeffekte der Inhaltsoptimierung.

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall wird von vielen Faktoren beeinflusst, darunter Co-Gehalt, Korngröße, Additive, Elektrolytumgebung und Oberflächenrauheit. Ein hoher Co-Gehalt und eine raue Oberfläche verstärken die Korrosion, während feine Körner und entsprechende Mengen an Cr_3C_2 die Korrosionsbeständigkeit verbessern, während saure und salzreiche Umgebungen die Lochfraßbildung beschleunigen. Das Zusammenspiel dieser Faktoren erschwert das Korrosionsverhalten zusätzlich. Durch Optimierung der Materialkonstruktion und der Einsatzbedingungen kann die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in der Chemie, der Schifffahrt und anderen Bereichen effektiv verbessert werden.

Optimierungsstrategie zur Beeinflussung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall

Um die Korrosionsstromdichte ($i_{\text{kor}})$ von Hartmetall auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, um den langfristigen Betriebsanforderungen in rauen Umgebungen wie Säuren, Salznebel und Laugen gerecht zu werden, ist es notwendig, die Korrosionsbeständigkeit durch umfassende Optimierung der Materialzusammensetzung, Additive, Oberflächenbehandlung, des Sinterprozesses und der Prüfmethode systematisch zu verbessern. Ausgehend von diesen Schlüsselaspekten werden, kombiniert mit elektrochemischen Daten, Prozessparametern und tatsächlichen Fällen, die Optimierungsstrategie und ihre Auswirkungen detailliert ausgearbeitet.

(1) Zutatenoptimierung

Durch genaue Kontrolle der chemischen Zusammensetzung von Hartmetall kann die freiliegende Fläche des Kobalts (Co) in der Bindephase wirksam reduziert und so seine elektrochemische Aktivität verringert werden. Es wird empfohlen, den Co-Gehalt im Bereich von $8-10 \% \pm 1 \%$ zu halten und gleichzeitig die WC-Korngröße bei $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ zu belassen. Diese Strategie senkt i_{kor} durch Reduzierung des Volumenanteils von Co (Zielfreilegungsfläche $< 10 \% \pm 1 \%$), um den Kontakt mit korrosiven Medien (wie H^+ oder Cl^-) zu begrenzen. Die feine Korngröße erhöht nicht nur die Korngrenzendichte und verteilt die Korrosionsspannung, sondern verbessert auch die Gleichmäßigkeit der WC-Co-Grenzfläche und verringert die Neigung zur lokalen Korrosion. Am Beispiel von WC-10Co: Nach Optimierung des Co-Gehalts zeigt dieses Material eine geringere Korrosionsrate in saurer Umgebung, und die Bildung von Korrosionslöchern auf der Oberfläche wird deutlich reduziert, was die Lebensdauer des Materials verlängert.

(2) Zusatzstoffe

Die Zugabe einer geeigneten Menge Chromcarbid (Cr_3C_2) verbessert die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall wirksam. Die empfohlene Zugabemenge beträgt $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Beim Hochtemperatur-Sinterprozess reagiert Cr mit Sauerstoff und bildet eine dichte Cr_2O_3 - Passivierungsschicht. Dieser Schutzfilm mit einer Dicke von ca. $0,1-0,2 \mu\text{m}$ blockiert wirksam die Korrosion des Kobalts in der Bindungsphase durch korrosive Medien und reduziert die Korrosionsbeständigkeit. i_{kor} um etwa $40 \% \pm 5 \%$. Am Beispiel der WC-10Co-Probe mit zugesetztem Cr_3C_2 verbessert sich beim Test in einer $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ -Lösung die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit um etwa $40 \% \pm 5 \%$ im Vergleich zur Probe ohne Zusatz, und die Tiefe der Korrosionslöcher an der Oberfläche verringert sich von $5 \pm 0,5 \mu\text{m}$ auf $3 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Die energiedispersive Spektralanalyse (EDS) bestätigte außerdem, dass die Anwesenheit der Cr_2O_3 - Schicht die Auflösungsrate von Kobalt deutlich verringerte und die Stabilität des Materials in einer sauren Umgebung verbesserte.

(3) Oberflächenbehandlung

Die Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit ist der Schlüssel zur Reduzierung von Lochfraß und Oberflächenkorrosion. Es wird empfohlen, die Oberflächenrauheit (R_a) durch Präzisionspolieren unter $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ zu halten. Dieser Prozess kann die Lochfraßrate um etwa $30 \% \pm 5 \%$ senken und so die Rückhaltung korrosiver Medien an Oberflächendefekten und lokale elektrochemische Reaktionen wirksam verringern. Zusätzlich wird Ultraschallreinigung (Frequenz $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) verwendet, um Oberflächenverunreinigungen (Gehalt $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) wie Fett, Staub oder Oxidschichten zu entfernen und so die Oberflächenintegrität weiter zu verbessern. Experimente zeigen, dass die Gewichtsverlustrate von auf $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ polierten WC-10Co-Proben nach 720-stündiger Einwirkung von Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) nur $0,06 \text{ mg/cm}^2$ beträgt. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, was etwa $20 \% \pm 3 \%$ niedriger ist als bei der rauen Oberfläche ($R_a > 0,1 \mu\text{m}$), was eine deutliche Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit darstellt.

(4) Sinterprozess

Die Optimierung des Sinterprozesses wirkt sich direkt auf die Bindungsstärke der WC-Co-Grenzfläche und die Gleichmäßigkeit der Co-Verteilung aus. Die empfohlene Sintertemperatur beträgt $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$. Unter Vakuum oder inerte Atmosphäre (z. B. Argon) wird die Oxidation reduziert und die Co-Verteilungsabweichung unter $0,1 \% \pm 0,02 \%$ gehalten. Durch die kontrollierte Sinterzeit (ca. 60–90 Minuten) wird eine metallurgische Bindung der WC-Co-Grenzfläche erreicht. Die Bindungsstärke der Grenzfläche wird auf $> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ erhöht. Dadurch werden Mikrorisse und Poren an der Grenzfläche reduziert und das Eindringen korrosiver Medien verhindert. Die WC-10Co-Probe mit optimiertem Sinterprozess zeigte in einer sauren Umgebung einen niedrigeren i_{corr} ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), und die Ausdehnungsrate der Korrosionsnarbe wurde um etwa $25 \% \pm 3 \%$ reduziert, was die Korrosionsbeständigkeit des Materials deutlich verbesserte.

(5) Prüfnormen

Um die optimierte Korrosionsbeständigkeit genau zu bewerten und zu überprüfen, wird empfohlen, ASTM G59 „Elektrochemische Korrosionstestmethode“ zu verwenden, um elektrochemische Polarisierungstests mit einer konstanten Scanrate von $0,1 \text{ mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$ durchzuführen, um eine potenzielle Genauigkeit von $\pm 0,001 \text{ V}$ zu gewährleisten. Dieser Standard misst i_{corr} und Korrosionspotenzial (E_{corr}) durch ein Drei-Elektroden-System (Arbeitselektrode, Referenzelektrode und Hilfelektrode) und liefert zuverlässige Daten für die Implementierung von Optimierungsstrategien. Während des Tests ist es notwendig, den Test in einer simulierten Betriebsumgebung (z. B. $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ oder 5%ige NaCl-Lösung) durchzuführen, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse mit den tatsächlichen Anwendungsbedingungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

übereinstimmen. Mit dieser Methode lässt sich genau feststellen, ob $i_{\text{kor}} \text{ den Zielwert } (10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2)$ erreicht und so eine wissenschaftliche Grundlage für die Bewertung der Materialleistung bietet.

(6) Umfassende Fallanalyse

Am Beispiel der Probe WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) ist die i_{kor} fiel auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ in einer 0,1M H_2SO_4 -Lösung für 24 Stunden, was etwa 98% $\pm$ 1% niedriger war als die des nicht optimierten WC-12Co ($i_{\text{kor}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). Die Korrosionsbeständigkeit wurde um etwa 60 % $\pm$ 5 % verbessert und die Tiefe der Korrosionslöcher an der Oberfläche wurde von $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ auf $3 \pm 0,5 \mu\text{m}$ reduziert, was eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit zeigt. Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigte, dass die Cr_2O_3 -Schicht und die feinen Körner zusammenwirkten, um Lochfraß und gleichmäßige Korrosion deutlich zu reduzieren. Diese optimierte WC-10Co-Probe wurde erfolgreich in chemischen Geräten (wie säurebeständigen Ventilen) eingesetzt und ihre Lebensdauer wurde von 1,5 Jahren $\pm$ 0,2 Jahren auf 2,5 Jahre $\pm$ 0,2 Jahre verbessert, was die Anwendbarkeit der Optimierungsstrategie bestätigt.

(7) Ko-Optimierung von Umgebung und Prozess

von Umgebungsbedingungen und Prozessparametern. Beispielsweise ist in einer Salzsprühumgebung mit hoher Cl^- -Konzentration ($> 5 \% \pm 0,1 \%$) die Rolle der Oberflächenpolitur und der Cr_2O_3 -Schicht besonders wichtig, da sie die Lochfraßrate auf $15 \% \pm 3 \%$ senken kann. Gleichzeitig gewährleistet die Kombination aus Feinabstimmung der Sintertemperatur ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und Kontrolle des Co-Gehalts ($8\% - 10\% \pm 1\%$) ein Gleichgewicht zwischen Grenzflächenstabilität und Korrosionsbeständigkeit. In der Praxis kann für unterschiedliche korrosive Umgebungen (wie Salzsprühnebel in Schiffsausrüstungen oder saure Medien in der chemischen Industrie) der Anteil der Additive oder die Intensität der Oberflächenbehandlung bedarfsgerecht angepasst werden, um die Korrosionsbeständigkeit weiter zu optimieren.

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall muss durch Optimierung der Zusammensetzung (Co $8 - 10 \% \pm 1 \%$, Korngröße $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), Oberflächenbehandlung ($\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Ultraschallreinigung), Sinterprozess ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Grenzflächenfestigkeit $> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) und Standardprüfung (ASTM G59) optimiert werden. Durch das Zusammenspiel dieser Strategien lässt sich i_{corr} auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ senken und die Korrosionsbeständigkeit um $60 \% \pm 5 \%$ verbessern, um den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie Chemieanlagen und Schiffsausrüstung gerecht zu werden.

Technische Anwendung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall

Durch die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens wird die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall deutlich verbessert und bietet somit ein hervorragendes Anwendungspotenzial in einer Vielzahl rauer Industrie- und Ingenieurumgebungen. Das optimierte Hartmetall verlängert die Lebensdauer effektiv durch Reduzierung der Korrosionsstromdichte (i_{kor}) auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, wodurch das Korrosionspotential (E_{kor}) und die Reduzierung des Gewichtsverlusts. Im Folgenden werden ausgehend von den drei Hauptbereichen Chemieventile, Schiffsausrüstung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensmittelverarbeitung, kombiniert mit spezifischen Fällen und Daten, die Leistung und Vorteile der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in technischen Anwendungen detailliert erörtert.

(1) Anwendung von Hartmetall in chemischen Ventilen

In der chemischen Industrie sind Ventile häufig stark sauren Medien (wie Schwefelsäure und Salzsäure) ausgesetzt, was eine extrem hohe Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe erfordert. Das optimierte WC-10Co-Hartmetall (zugesetzter Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %, Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zeigt eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit in einer Schwefelsäureumgebung mit einem pH-Wert von $2 \pm 0,1$, und seine Gewichtsverlustrate beträgt nur $0,06 \text{ mg/cm}^2 \cdot \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Korrosionsstromdichte ($i_{\text{kor}})$ beträgt etwa $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Im Vergleich zum nicht optimierten WC-10Co ($i_{\text{kor}} \approx 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, der Gewichtsverlust beträgt $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), die Korrosionsbeständigkeit des optimierten Materials verbessert sich um etwa 50 % $\pm$ 5 %. Diese Verbesserung ist auf die aus Cr_3C_2 gebildete Cr_2O_3 -Passivierungsschicht und die gleichmäßige Verteilung der feinen Körner zurückzuführen, die die Auflösung von Kobalt und die Ablösung von WC-Partikeln wirksam verhindern. In der praktischen Anwendung beträgt die Lebensdauer von Chemieventilen aus diesem Material mehr als 2 Jahre $\pm$ 0,2 Jahre, was erheblich besser ist als 1 Jahr $\pm$ 0,1 Jahre ohne Optimierung. Es eignet sich besonders für hochkorrosive Umgebungen, wie die Schwefelsäureproduktion, chemische Pipelines und Reaktoren, da es die Wartungskosten senkt und die Produktionseffizienz verbessert.

(2) Anwendung von Hartmetall in Schiffsausrüstung

Schiffsausrüstung (wie BohrkompONENTEN und Pumpengehäuse) muss den Korrosionsbelastungen durch Salznebel (NaCl -Konzentration 5 % $\pm$ 0,1 %) und Meerwasser über lange Zeit standhalten. Das optimierte WC-8Co-Hartmetall (Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weist eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit in Salznebelumgebung auf. Der Gewichtsverlust beträgt lediglich $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Das Korrosionspotenzial (E_{kor}) auf 0,18 V $\pm$ 0,02 V (vs. gesättigte Kalomelektrode, SCE) erhöht, verglichen mit dem nicht optimierten WC-10Co ($E_{\text{kor}} \approx 0,05 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, Gewichtsverlust $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), die Korrosionsbeständigkeit wird um ca. 50 % $\pm$ 5 % verbessert. Die geringe Oberflächenrauheit reduziert die Anzahl der Defektstellen für das Eindringen von Cl^- -Ionen, während der optimierte Co-Gehalt (8 % $\pm$ 1 %) die elektrochemische Aktivität verringert. Diese Leistungsfähigkeit ermöglicht eine gute Leistung in BohrkompONENTEN für den Schiffsbau mit einer Lebensdauer von über 3 Jahren $\pm$ 0,3 Jahren, die die 1,5 Jahre $\pm$ 0,2 Jahre herkömmlicher Materialien bei weitem übertrifft. Beispielsweise weisen Bohrer aus WC-8Co bei der Tiefseeförderung von Öl und Gas eine ausgezeichnete Korrosions- und Verschleißbeständigkeit auf, wodurch die Häufigkeit des korrosionsbedingten Komponentenaustauschs reduziert und die Wirtschaftlichkeit des Schiffsbaus verbessert wird.

(3) Anwendung von Hartmetall in der Lebensmittelverarbeitung

Geräte zur Lebensmittelverarbeitung müssen Hygienestandards erfüllen und Korrosion durch schwache Säuren (wie Essigsäure und Zitronensäure) widerstehen. Das optimierte Hartmetall WC-10Co (mit 0,5 % $\pm$ 0,01 % Cr_3C_2 -Zusatz) zeigt in einer Essigsäureumgebung mit einem pH-Wert von $4 \pm 0,1$ gute Ergebnisse, mit einer Korrosionsstromdichte (i_{kor}) von weniger als 10^{-6} A/cm^2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ und einer Gewichtsverlustrate von nur $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, viel weniger als die nicht optimierten $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Die Bildung der Cr_2O_3 -Passivierungsschicht verhindert wirksam die Entstehung von Korrosionsprodukten. Ihr Gehalt liegt unter $0,01 \% \pm 0,002 \%$, wodurch die Sicherheitsanforderungen für Lebensmittelkontaktmaterialien (wie z. B. GB 4806.1-2016) erfüllt werden. Die feine Körnung ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) gewährleistet zudem eine gleichmäßige Oberflächenebenheit und Korrosionsbeständigkeit, sodass die Lebensdauer in Lebensmittelverarbeitungsgeräten (wie Mixern, Schneidmessern) über $2 \pm 0,2$ Jahre beträgt. Im Vergleich zu herkömmlichem Edelstahl (Lebensdauer ca. 1 Jahr $\pm 0,1$ Jahre) weist er eine höhere Haltbarkeit und Hygienesicherheit auf und eignet sich besonders für die Verarbeitung säurehaltiger Lebensmittel (wie Essig und Saft).

(4) Der technische Wert der Optimierung des elektrochemischen Verhaltens

Die obigen Fälle zeigen, dass die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens (wie z. B. die Reduzierung von i_{corr} und die Erhöhung von E_{corr}) ist der Kern der Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall. Durch Optimierung der Zusammensetzung (Co 8–10 % $\pm 1 \%$), Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), Oberflächenpolitur ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Verbesserung des Sinterprozesses ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) werden Gewichtsverlust und Korrosionsrate von Hartmetall deutlich reduziert und die Korrosionsbeständigkeit um $50\text{--}60 \% \pm 5 \%$ verbessert. Diese Leistungssteigerung verlängert nicht nur die Lebensdauer des Materials in korrosiver Umgebung (z. B. Chemieventile > 2 Jahre $\pm 0,2$ Jahre, Schiffsausrüstung > 3 Jahre $\pm 0,3$ Jahre), sondern reduziert auch Wartungshäufigkeit und Austauschkosten. Beispielsweise werden bei chemischen Ventilen die jährlichen Wartungskosten des optimierten Materials um etwa $30 \% \pm 5 \%$ gesenkt, und bei Meeresbohrungen verlängert sich der Komponentenaustauschzyklus um $50 \% \pm 5 \%$, was die wirtschaftlichen Vorteile bei technischen Anwendungen widerspiegelt.

(5) Umweltanpassungsfähigkeit und Anwendungserweiterung

Es lässt sich an eine größere Bandbreite korrosiver Umgebungen anpassen. So wird beispielsweise in der sulfidhaltigen (H_2S) Umgebung von Öl- und Gasfeldern die WC-10Co-Probe mit zugesetztem Cr_3C_2 durch die Cr_2O_3 -Schicht geschützt und ihre Beständigkeit gegen Sulfidkorrosion um etwa $40 \% \pm 5 \%$ verbessert, was sie für Anlagen zur Verarbeitung von saurem Gas geeignet macht (Lebensdauer $> 2,5$ Jahre $\pm 0,2$ Jahre). Darüber hinaus hält in der Hochtemperatur-Salzsprühumgebung ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$) der synergetische Effekt der Oberflächenpolitur und der Feinkörnigkeit die Gewichtsverlustrate bei $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und erfüllt damit die Anforderungen von Anwendungen unter extremen Meeresbedingungen (wie Tiefseepipelines). Diese erweiterten Anwendungen bestätigen erneut die Vielseitigkeit der Optimierungsstrategie.

Umfassender Fall und Zukunftsausblick

von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) ist dessen Leistung in verschiedenen korrosiven Umgebungen besser als die herkömmlicher Materialien. In $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ sinkt i_{corr} auf $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, und die Korrosionsbeständigkeit verbessert sich um $60 \% \pm 5 \%$; in 5% igem NaCl-Salzsprühnebel ist E_{corr} erreicht $0,18 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, und die Lebensdauer verlängert sich auf 3 Jahre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,3$ Jahre; und in Essigsäureumgebung beträgt der Gehalt an Korrosionsprodukten weniger als $0,01 \% \pm 0,002 \%$, wodurch die Hygienestandards erfüllt werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens nicht nur die Lebensdauer von Hartmetall verlängert, sondern ihm auch vielfältige Anwendungsaussichten in den Bereichen Chemie, Schifffahrt und Lebensmittelverarbeitung eröffnet. Durch die Einführung neuer Additive (wie VC, TaC) oder die Entwicklung von Mehrschichtbeschichtungstechnologien kann die Leistung in ultrakorrosiven Umgebungen (wie z. B. saurem Salznebel bei hohen Temperaturen) künftig weiter verbessert werden, um komplexeren technischen Anforderungen gerecht zu werden.

Durch die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens weist Hartmetall eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit in chemischen Ventilen, Schiffsausrüstung und der Lebensmittelverarbeitung auf. Die Gewichtsverlustrate optimierter Formeln wie WC-10Co und WC-8Co ($0,05-0,08 \text{ mg/cm}^2$) $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) beträgt $k_{\text{kor}} (< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2)$ und $E_{\text{kor}} (> 0,18 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V})$ wurden deutlich verbessert und die Lebensdauer überstieg $2-3 \text{ Jahre} \pm 0,2-0,3$ Jahre. Diese Anwendungsfälle beweisen deutlich, dass die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens eine Schlüsselstrategie zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall und zur Erweiterung des Anwendungsbereichs im Ingenieurwesen ist.

8.1.2 Hartmetall in saurer/salzhaltiger Umgebung

8.1.2.1 Prinzip und technischer Überblick

Saure (pH-Wert $< 3 \pm 0,1$) und Salzsprühnebel-Umgebungen (NaCl-Konzentration $5 \% \pm 0,1 \%$, gemäß ISO 9227) stellen extrem hohe Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall. Um die Langzeitstabilität des Materials unter diesen harten Bedingungen zu gewährleisten, ist eine Gewichtsverlustrate von $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ oder weniger anzustreben. H^+ -Ionen in der sauren Umgebung beschleunigen die Auflösung des Kobalts (Co), der Bindephase, erheblich, und zwar mit einer Auflösungsrate von etwa $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, was zur Bildung von Korrosionslöchern mit einer Tiefe von bis zu $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ auf der Oberfläche führt. Dieser Korrosionsprozess wird hauptsächlich durch elektrochemische Reaktionen ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) angetrieben, und H^+ wirkt als Katalysator, der die anodische Auflösung weiter beschleunigt, insbesondere in starken Säuren (wie $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$), wo die Korrosionsrate mit sinkendem pH-Wert exponentiell ansteigen kann. Außerdem fallen WC-Partikel (Größe $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aufgrund des Verlusts der Bindungsphasenunterstützung ab, was den Materialabbau verschlimmert. In einer Salzsprühumgebung verursachen Cl^- -Ionen als stark eindringende Anionen Lochkorrosion. Der Durchmesser der Korrosionsgrube beträgt ebenfalls etwa $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. Am Boden der Grube lösen sich oft WC-Partikel und es kommt zur Ablagerung von Oxidationsprodukten (wie WO_3). Dieses Lochfraßphänomen tritt besonders deutlich bei hoher Luftfeuchtigkeit auf, da Cl^- den Passivierungsfilm auf der Kobaltoberfläche (z. B. $\text{Co}(\text{OH})_2$) zerstören kann, wodurch lokale elektrochemische Mikrobatterien entstehen und die Korrosionsausbreitung beschleunigt wird. Zur Optimierung der Korrosionsbeständigkeit müssen die Materialzusammensetzung und die Oberflächenbehandlung angepasst werden, wobei der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schwerpunkt auf der Hemmung der elektrochemischen Aktivität von Co und der Verbesserung der Stabilität und Abriebfestigkeit der WC-Co-Grenzfläche liegen muss.

Der Salzsprühtest wird gemäß ISO 9227:2017 in einer Salzsprühkammer bei $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $> 95\% \pm 1\%$ durchgeführt. Die Probengröße beträgt $50 \times 50 \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, um eine gleichmäßige Oberflächenbelastung zu gewährleisten. Das Sprühvolumen wird auf $12\text{ ml/h} \pm 0,1\text{ ml/h}$ geregelt, um die korrosiven Bedingungen in Meeres- oder Industriemischatmosphären zu simulieren. Der Testzyklus beträgt üblicherweise 1000 Stunden ± 100 Stunden, abhängig von den Anforderungen an die Bewertung der Korrosionsbeständigkeit des Materials. Beispielsweise erreichte die Gewichtsverlustrate von nicht optimiertem WC-10Co-Hartmetall im 1000-stündigen Salzsprühtest $0,09\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, mit deutlichen Anzeichen von Lochfraß und gleichmäßiger Korrosion auf der Oberfläche. Durch Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) verringert sich der Gewichtsverlust auf $0,06\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ und die Lochfraßrate um ca. $40\% \pm 5\%$, was darauf hindeutet, dass das Additiv lokale Korrosion deutlich hemmt. In diesem Abschnitt werden die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen sowie sein Anwendungspotenzial in der Technik anhand einer detaillierten Analyse der Korrosionsmechanismen, Prüfmethoden, Optimierungsstrategien und Praxisbeispielen ausführlich erörtert.

8.1.2.2 Mechanismus und Analyse von Hartmetall in saurer/salzhaltiger Umgebung

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in korrosiven Umgebungen wie sauren (pH-Wert $< 3 \pm 0,1$) und Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) Umgebungen ist entscheidend für die tatsächliche Anwendungsdauer in der Chemie-, Schifffahrts- und Industriebranche. Der Korrosionsmechanismus umfasst die elektrochemische Auflösung der Kobaltbindungsphase (Co), die Stabilität der Wolframkarbidpartikel (WC) und den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Materialoberfläche. Ausgehend vom Korrosionsverhalten in sauren und Salzsprühnebelumgebungen, kombiniert mit chemischen Reaktionen, mikroskopischen Analysen und Gewichtsverlustberechnungen, wird der Korrosionsmechanismus von Hartmetall eingehend erforscht und die regulierende Wirkung von Optimierungsstrategien (wie Zugabe von Cr_3C_2 und Korngrößenkontrolle) auf das Korrosionsverhalten analysiert.

(1) Korrosionsmechanismus in saurer Umgebung

In einer sauren Umgebung (pH $< 3 \pm 0,1$) unterliegt das Kobalt (Co) in der Bindephase einer signifikanten elektrochemischen Auflösungsreaktion. Die wichtigsten Reaktionen sind:



Die Auflösungsrate dieser Reaktion beträgt etwa $10^{-6}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, was darauf hindeutet, dass Co in sauren Medien (wie Schwefelsäure und Salzsäure) eine hohe chemische Aktivität aufweist. Im Gegensatz dazu weist Wolframkarbid (WC) als harte Phase eine extrem hohe chemische Stabilität und eine sehr niedrige Auflösungsrate ($< 10^{-8}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) auf und nimmt kaum an der Reaktion teil. Die bevorzugte Auflösung von Co führt jedoch zu einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schwächung der Grenzflächenbindungskraft zwischen diesem und den WC-Partikeln, und die WC-Partikel lösen sich allmählich mit einer Ablösungsrate von $0,1 \% \pm 0,02 \%$. Dieses Ablösungsphänomen verursacht mikroskopische Defekte auf der Materialoberfläche und beschleunigt den nachfolgenden Korrosionsprozess. Der niedrige pH-Wert der sauren Umgebung kann auch lokale elektrochemische Mikrobatterieeffekte auslösen, was die Auflösung von Co und das Ablösen von WC-Partikeln weiter verschlimmert. Insbesondere bei einer hohen H^+ -Konzentration (z. B. $0,1 \text{ MH}_2\text{SO}_4$) kann die Ausdehnungsrate der Korrosionsgrube $0,2 \mu\text{m}/\text{h} \pm 0,02 \mu\text{m}/\text{h}$ erreichen.

(2) Korrosionsmechanismus in Salzsprühumgebung

In einer Salzsprühumgebung (NaCl -Konzentration $5 \% \pm 0,1 \%$) ist die Schädigung der Hartmetalloberfläche durch Chloridionen (Cl^-) der Hauptfaktor für Korrosion. Die natürliche Oxidschicht auf der Co-Oberfläche (hauptsächlich $\text{Co}(\text{OH})_2$ oder CoO , mit einer Dicke von etwa $5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) wird durch Cl^- -Ionen zerstört. Cl^- zerstört durch Adsorption und Eindringen die Schutzeigenschaften der Oxidschicht, was zu Lochfraß führt. Die anfängliche Tiefe des Lochfraßes beträgt üblicherweise $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, und der Boden des Lochs ist auf die Auflösung von Co zentriert und erstreckt sich allmählich bis zum freiliegenden Bereich der WC-Partikel. Die Bildung von Lochfraß hängt mit der örtlichen Versauerung durch Cl^- zusammen. Der pH-Wert im Loch kann auf 2–3 abfallen, was die Auflösung von Co weiter beschleunigt. Die hohe Luftfeuchtigkeit ($\geq 95 \% \text{ relative Luftfeuchtigkeit}$) und Temperatur ($35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) in der Salzsprühumgebung fördern ebenfalls die elektrochemische Reaktion, wodurch die Korrosionsrate um $30 \% \pm 5 \%$ höher ist als in einer trockenen Umgebung.

(3) Gewichtsverlustberechnung und Korrosionsbewertung

Der Korrosionsgrad von Hartmetall in sauren oder salzhaltigen Umgebungen wird üblicherweise durch die Gewichtsverlustrate quantifiziert, die wie folgt berechnet wird:

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

ist ΔW die Gewichtsverlustrate (mg/cm^2), m_0 die Masse vor dem Test (mg , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$), m_t die Masse nach dem Test (mg , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$) und A die Oberfläche der Probe (cm^2 , Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ cm}^2$). Die Gewichtsverlustrate des optimierten Hartmetalls (wie WC-10Co mit zugesetztem Cr_3C_2) wird nach dem Salzsprühtest (ISO 9227 NSS, 720 h) auf $0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ oder weniger kontrolliert, was darauf hinweist, dass seine Korrosionsbeständigkeit erheblich besser ist als die von nicht optimierten Materialien (Gewichtsverlustrate $0,15 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$). Die Verringerung der Gewichtsverlustrate spiegelt die Verringerung der Korrosionsprodukte auf der Materialoberfläche und die Verringerung der Lochfraßtiefe wider.

(4) Optimierungsstrategie und Mechanismusanalyse

sind die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) und die Kontrolle der Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zwei effektive Strategien. Die Zugabe von Cr_3C_2 reagiert beim Sintern bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff und bildet eine etwa $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ dicke Cr_2O_3 -Passivierungsschicht, die eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen das Eindringen von Cl^- aufweist und die Lochfraßrate um etwa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

40 % $\pm$ 5 % reduziert. Die Bildung der Cr_2O_3 -Schicht reduziert die aktiven Stellen der elektrochemischen Reaktion, indem sie den direkten Kontakt zwischen Cl^- -Ionen und H^+ -Ionen und Co blockiert und so die Ausbreitung der Lochkorrosion verhindert. Die Optimierung der Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erhöht die Korngrenzendichte und reduziert die Co-Expositionsfläche ($< 10 \% \pm 1 \%$). Dadurch wird der Eindringweg des korrosiven Mediums verteilt und der Gewichtsverlust um ca. 20 % $\pm$ 5 % reduziert. Dies zeigt, dass die gleichmäßige Verteilung feiner Körner die Empfindlichkeit gegenüber lokaler Korrosion wirksam verringert.

(5) Mikroskopische Analyse und Verifizierung

mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM, Auflösung $< 0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$) zeigten, dass die Lochfraßbildung auf die Co - Auflösung zurückzuführen war, in den Löchern WC-Partikel freigelegt waren und die Partikelgröße etwa $0,51 \pm 0,01 \mu\text{m}$ betrug, was der ursprünglichen Korngröße entsprach, was darauf hindeutet, dass die Korrosion hauptsächlich an der WC-Co-Grenzfläche auftrat. Durch energiedispersive Spektroskopie (EDS) wurde außerdem bestätigt, dass der Cr-Gehalt in der Cr_2O_3 -Passivierungsschicht etwa 5 % $\pm$ 0,5 % betrug und seine Verteilung auf der Materialoberfläche gleichmäßig war, wodurch das korrosive Medium wirksam isoliert wurde. EDS-Daten zeigten auch, dass der Co-Gehalt im Lochfraßbereich deutlich reduziert war (von 10 % auf 2 % $\pm$ 0,5 %), was den Mechanismus der bevorzugten Auflösung von Co bestätigte. In einer Salzsprühumgebung verringerte sich die Lochfraßtiefe der WC-10Co-Probe mit zugesetztem Cr_3C_2 von $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ auf $3 \pm 0,3 \mu\text{m}$, was darauf hindeutet, dass die Optimierungsstrategie die Korrosionsbeständigkeit des Materials deutlich verbesserte.

(6) Umweltbedingungen und Korrosionsdynamik

Die Korrosionsdynamik in sauren Umgebungen wird hauptsächlich durch die H^+ -Konzentration und die Temperatur beeinflusst. Wenn die Temperatur auf $50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt, kann sich die Co-Auflösungsrate um 15 % $\pm$ 2 % erhöhen, wodurch das Ablösen der WC-Partikel verschlimmert wird. Die Cl^- -Konzentration ($> 5 \% \pm 0,1 \%$) und die Luftfeuchtigkeit ($> 95 \%$ relative Luftfeuchtigkeit) in der Salzsprühumgebung verstärken den Lochfraßeffect weiter und die Dichte der Korrosionslöcher kann $10\text{--}15/\text{mm}^2$ erreichen. Nach langfristiger Einwirkung (z. B. 720 h) trat auf der Oberfläche der nicht optimierten WC-10Co-Probe großflächige Ablösung auf, während die optimierte Probe nur leichte Lochfraßbildung zeigte, was darauf hindeutet, dass der synergistische Effekt der Cr_2O_3 -Schicht und der Feinkörner eine wichtige Schutzfunktion bei der dynamischen Korrosion spielte.

(7) Umfassende Fallanalyse

Am Beispiel der WC-10Co-Probe beträgt die Gewichtsverlustrate der nicht optimierten Probe in 0,1 MH_2SO_4 für 24 Stunden $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und die Lochfraßtiefe erreicht $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Bei der optimierten Probe mit zugesetztem Cr_3C_2 (0,5 % $\pm$ 0,01 %) und kontrollierter Korngröße ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sank die Gewichtsverlustrate auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Lochfraßtiefe beträgt nur $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ und die Korrosionsbeständigkeit ist um etwa 50 % $\pm$ 5 % verbessert. In einer Salzsprühumgebung (ISO 9227 NSS, 720 h) beträgt die Gewichtsverlustrate der optimierten Probe $0,15 \text{ mg/cm}^2$ bis $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und sinkt auf $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lochfraßrate verringerte sich um $40 \% \pm 5 \%$, was die Wirkung der Optimierungsstrategie vollständig bestätigte.

(8) Anwendungsbedeutung

von Hartmetall in saurer/salzhaltiger Umgebung zeigt, dass Co-Auflösung und WC-Ablösung die wichtigsten Ausfallarten sind, während die Einführung einer Cr_2O_3 -Passivierungsschicht und feiner Körner diese Prozesse wirksam hemmt. Die Gewichtsverlustrate ($\Delta W < 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und die Verringerung der Lochfraßtiefe bieten eine zuverlässige Garantie für die Anwendung von Hartmetall in chemischen Ventilen (Säurebeständigkeit) und Schiffsausrüstung (Salzsprühbeständigkeit). Durch mikroskopische Analyse von SEM und EDS, kombiniert mit Tests nach ISO 9227, kann die Lebensdauer von optimiertem Hartmetall in korrosiver Umgebung um $50\text{--}60 \% \pm 5 \%$ verlängert werden, was eine solide theoretische Unterstützung für technische Anwendungen bietet.

8.1.2.3 Analyse der Faktoren, die die Korrosion von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen beeinflussen

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in sauren (pH-Wert $< 3 \pm 0,1$) und salzhaltigen (NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$) Umgebungen wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, darunter die materialeigenen Eigenschaften (wie Co-Gehalt, Cr_3C_2 -Zusatz, Korngröße, Oberflächenzustand) und äußere Umgebungsbedingungen (pH-Wert, Cl^- -Konzentration). Diese Faktoren wirken sich direkt auf die Gewichtsverlustrate, die Lochfraßtiefe und die allgemeine Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall aus, indem sie die elektrochemische Reaktionsaktivität, die Grenzflächenbindungskraft und das Eindringverhalten des korrosiven Mediums verändern. Ausgehend von den oben genannten Schlüsselfaktoren, kombiniert mit experimentellen Daten, mikroskopischen Analysen und tatsächlichen Fällen, werden im Folgenden deren Einfluss auf das Korrosionsverhalten von Hartmetall und dessen Mechanismus detailliert erörtert.

(1) Einfluss des Co-Gehalts

Das Kobalt (Co), das in der Bindephase enthalten ist, ist der korrosionsempfindlichste Bestandteil von Hartmetall, und sein Gehalt beeinflusst die Korrosionsbeständigkeit des Materials erheblich. Bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ liegt die Gewichtsverlustrate in einer sauren Umgebung oder in einer Salzsprühumgebung bei etwa $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, was auf eine gewisse Korrosionsbeständigkeit hinweist. Steigt der Co-Gehalt jedoch auf $12 \% \pm 1 \%$, erhöht sich die Gewichtsverlustrate um etwa $30 \% \pm 5 \%$ und erreicht $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Diese Änderung ist hauptsächlich auf die Vergrößerung der Co-Expositionsfläche zurückzuführen, die wiederum zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche mit dem korrosiven Medium (wie H^+ oder Cl^-) führt und die elektrochemische Auflösungsreaktion ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$) beschleunigt. Der hohe Co-Gehalt verringert außerdem die Passivierungsfähigkeit des Materials und macht es anfälliger für gleichmäßige Korrosion und Lochfraß in sauren Umgebungen (pH-Wert $< 2 \pm 0,1$) oder Salzsprühnebelumgebungen, was die langfristige Betriebsleistung des Materials erheblich beeinträchtigt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Wirkung der Cr_3C_2 -Zugabe

von Chromkarbid (Cr_3C_2) ist eine effektive Strategie zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall. Studien haben gezeigt, dass bei einem Cr_3C_2 -Gehalt von $0,5 \% \pm 0,01 \%$ der Gewichtsverlust um etwa $40 \% \pm 5 \%$ reduziert wird, von $0,10 \text{ mg/cm}^2$ über $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Dieser Effekt ist auf die Cr_2O_3 -Passivierungsschicht zurückzuführen, die sich während des Sinterprozesses aus Cr_3C_2 bildet. Die Dicke beträgt etwa $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, wodurch das Eindringen von H^+ und Cl^- wirksam blockiert und die Auflösung von Co verhindert werden kann. Übersteigt der Cr_3C_2 -Gehalt jedoch $1 \% \pm 0,01 \%$, erhöht sich der Anteil spröder Phasen (z. B. der η -Phase) im Material um etwa $10 \% \pm 2 \%$, was zu einer Verringerung der Bruchzähigkeit (K_{Ic}) um etwa $8\text{--}12 \% \pm 2 \%$ führt. Die Bildung spröder Phasen schwächt nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern kann bei Einwirkung korrosiver Medien auch Mikrorisse verursachen und die lokale Korrosionsempfindlichkeit erhöhen. Daher muss die Zugabemenge streng kontrolliert werden.

(3) Einfluss der Korngröße

sie die Korngrenzendichte und die Grenzflächeneigenschaften beeinflusst. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Zahl der Korngrenzen groß, der Eindringweg des korrosiven Mediums ist verteilt und die Lochfraßtiefe ist gering ($< 5 \pm 0,5 \mu\text{m}$), was auf eine gute Korrosionsbeständigkeit hinweist. Feine Körner sorgen außerdem für eine gleichmäßigere Verteilung von Co und verringern die Konzentration lokaler Korrosion. Bei einer Korngröße von $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ verringert sich jedoch die Korngrenzendichte und die Korrosion konzentriert sich auf einen kleineren Grenzflächenbereich, was zu einer Zunahme der Lochfraßtiefe um etwa $25 \% \pm 5 \%$ auf $6\text{--}7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ führt. Durch die größere Korngröße ist die WC-Co-Grenzfläche leichter dem korrosiven Medium ausgesetzt, insbesondere in einer sauren Umgebung, wo das Eindringen von H^+ entlang der Korngrenze die Auflösung von Co und das Ablösen von WC-Partikeln verschlimmert.

(4) Einfluss der Umweltbedingungen

Äußere Umweltbedingungen sind wichtige Faktoren, die das Korrosionsverhalten von Hartmetall beeinflussen. In einer sauren Umgebung steigt bei einem pH-Wert unter $2 \pm 0,1$ die H^+ -Ionenkonzentration deutlich an, die Auflösungsrate von Co beschleunigt sich und der Gewichtsverlust erhöht sich um etwa $50 \% \pm 5 \%$, von $0,08 \text{ mg/cm}^2$ auf $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ bis hin zu $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Niedrige pH-Werte können auch zu einer Spurenauflösung von WC führen ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^-$), was die Grenzflächenbindungskraft weiter schwächt. In einer Salzsprühumgebung zerstört das starke Eindringen von Cl^- -Ionen bei einer NaCl-Konzentration von über $5 \% \pm 0,1 \%$ den Passivierungsfilm auf der Co-Oberfläche. Die Lochfraßrate steigt um ca. $30 \% \pm 5 \%$, und die Lochfraßdichte kann $15\text{--}20/\text{mm}^2$ erreichen. Cl^- -Ionen greifen bevorzugt die WC-Co-Grenzfläche durch Adsorption und Diffusion an und bilden tiefe Lochfraßstellen, die die Korrosionsbeständigkeit des Materials deutlich verringern. Darüber hinaus erhöht ein Temperaturanstieg (z. B. $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) die Korrosionsrate um weitere $10\text{--}15 \% \pm 2 \%$, was Korrosionsschäden weiter verschlimmert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberflächenrauheit (R_a) beeinflusst die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall direkt, indem sie die Kontakteigenschaften zwischen dem Material und dem korrosiven Medium verändert. Bei einer Oberflächenrauheit von $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Oberfläche glatt, weist weniger Defekte (wie Mikrokratzer und Löcher) auf, der Gewichtsverlust ist gering und die Korrosionsbeständigkeit ist gut. Steigt R_a jedoch über $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nehmen die Oberflächendefekte zu, und das korrosive Medium bleibt leicht in diesen Bereichen zurück und bildet lokale elektrochemische Mikrobatterien, was zu einer Erhöhung der Lochfraßrate um etwa $20 \% \pm 5 \%$ führt. Sehr raue Oberflächen können auch Spannungskonzentrationen hervorrufen, insbesondere bei Salzsprühzyklustests wird die Ausdehnungsrate von Lochfraß beschleunigt und die Tiefe erhöht sich von $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ auf $5-6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, was die Lebensdauer des Materials ernsthaft beeinträchtigt.

(6) Wechselwirkungen zwischen Faktoren

Die oben genannten Faktoren wirken nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen durch komplexe Wechselwirkungen zusammen das Korrosionsverhalten von Hartmetall. Wenn beispielsweise ein hoher Co-Gehalt ($> 12 \% \pm 1 \%$) mit einer rauen Oberfläche ($R_a > 0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$) kombiniert wird, kann die Gewichtsverlustrate bis zu $0,15 \text{ mg/cm}^2$ betragen. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ erhöht sich die Lochfraßtiefe auf $8 \pm 0,5 \mu\text{m}$ und übersteigt damit den Einfluss eines einzelnen Faktors bei weitem. Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) kann die negativen Auswirkungen eines hohen Co - Gehalts teilweise ausgleichen, aber in einer stark sauren Umgebung mit einem pH-Wert von $< 2 \pm 0,1$ kann die Schutzwirkung der Cr_2O_3 -Schicht durch H^+ -Korrosion geschwächt werden. Darüber hinaus ist der Kopplungseffekt zwischen Korngröße und Umgebungsbedingungen signifikant. Feine Körner ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weisen bei niedrigen Cl^- -Konzentrationen ($< 5 \% \pm 0,1 \%$) eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf, Lochfraß lässt sich jedoch in hochkonzentriertem Salznebel nur schwer vollständig verhindern, was auf die begrenzte Wirkung der Umgebungsbedingungen auf den Korngrenzenschutz hinweist.

(7) Umfassende Fallanalyse

WC-12Co und WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) beträgt nach 24-stündiger Einwirkung einer HCl-Lösung mit einem pH-Wert von $1 \pm 0,1$ die Gewichtsverlustrate von WC-12Co $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Lochfraßtiefe $6 \pm 0,5 \mu\text{m}$ und deutliche Lochfraßeigenschaften an der Oberfläche, was darauf hindeutet, dass die doppelte Wirkung des hohen Co-Gehalts und der stark sauren Umgebung die Korrosion verschlimmert. Die Gewichtsverlustrate von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) beträgt nur $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Lochfraßtiefe $3 \pm 0,3 \mu\text{m}$, Korrosionsbeständigkeit um ca. $50 \% \pm 5 \%$ verbessert. Energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Cr-Gehalt in der Cr_2O_3 -Schicht ca. $5 \% \pm 0,5 \%$ beträgt, wodurch das korrosive Medium wirksam isoliert und die Auflösung von Co sowie die Ausbreitung von Lochfraß verhindert wird. In einer Salzsprühumgebung (NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$, ISO 9227 NSS, 720 h) erreicht die Gewichtsverlustrate von WC-12Co $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, während sie beim optimierten WC-10Co nur $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ beträgt, was die Schutzwirkung von Cr_3C_2 und Feinkörnern weiter bestätigt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(8) Korrosionsdynamik und Anwendungsbedeutung

Die dynamische Korrosionsanalyse zeigt, dass die Auflösungsrate von Co in einer sauren Umgebung linear mit der Zeit zunimmt, während die Ausbreitungsrate der Lochfraßkorrosion in einer Salzsprühumgebung im Anfangsstadium schnell ist (< 96 h) und sich dann aufgrund der Ansammlung von Korrosionsprodukten leicht verlangsamt. Das optimierte Hartmetall (wie WC-10Co mit zugesetztem Cr_3C_2) behält auch nach langfristiger Einwirkung (720 h) eine niedrige Gewichtsverlustrate und Lochfraßtiefe bei, was auf seine Stabilität in einer dynamischen Korrosionsumgebung hindeutet. Diese Eigenschaften ermöglichen eine Lebensdauer von 2 Jahren $\pm 0,2$ Jahren in einer sauren Umgebung (wie z. B. Chemieventilen) und von mehr als 3 Jahren $\pm 0,3$ Jahren in einer Salzsprühumgebung (wie z. B. Schiffsausrüstung). Durch systematische Analyse der Einflussfaktoren können wissenschaftliche Leitlinien für die Anwendung von Hartmetall in rauen Umgebungen bereitgestellt werden.

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen wird durch Co-Gehalt, Cr_3C_2 - Zusatz, Korngröße, Umgebungsbedingungen und Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Hoher Co-Gehalt, grobe Körner, hohe Rauheit und stark korrosive Umgebungen (z. B. $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, $\text{NaCl} > 5 \% \pm 0,1 \%$) verschlimmern die Korrosion, während eine angemessene Menge an Cr_3C_2 und feinen Körnern die Korrosionsbeständigkeit deutlich verbessert. Umfassende Fallstudien zeigen, dass der Gewichtsverlust des optimierten Hartmetalls um $40\text{--}50 \% \pm 5 \%$ und die Lochfraßtiefe um $40\text{--}50 \% \pm 5 \%$ reduziert werden, was eine zuverlässige Garantie für Anwendungen in der Chemie, der Schifffahrt und anderen Bereichen bietet.

8.1.2.4 Optimierungsstrategie für die Korrosionseffekte von Säure- und Salzsprühumgebungen auf Hartmetall

cm^2 in sauren ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) und Salzsprühnebel ($\text{NaCl} 5 \% \pm 0,1 \%$) Umgebungen $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ist eine systematische Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durch umfassende Optimierung der Materialzusammensetzung, Additive, Oberflächenbehandlung, des Sinterprozesses und der Prüfspezifikationen erforderlich. Diese Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, **Korrosionspfade zu reduzieren**, **Verbesserung des Oberflächenschutzes**, **Verbesserung der Materialdichte** und Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Testergebnisse. Ausgehend von den oben genannten Schlüsselaspekten, kombiniert mit experimentellen Daten, Prozessparametern und tatsächlichen Anwendungsfällen, werden im Folgenden die Optimierungsstrategie und ihre Rolle bei der Kontrolle des Korrosionsverhaltens detailliert beschrieben.

(1) Zutatenoptimierung

Durch genaue Kontrolle der chemischen Zusammensetzung von Hartmetall kann die Erosion der Bindungsphase durch korrosive Medien wirksam reduziert werden. Es wird empfohlen, den Co-Gehalt im Bereich von $8\text{--}10 \% \pm 1 \%$ zu kontrollieren und gleichzeitig die WC-Korngröße bei $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ zu halten. Diese Strategie verringert die Kontaktmöglichkeit mit korrosiven Medien.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(wie H^+ oder Cl^-) durch Reduzierung des Co-Gehalts (Ziel-Expositionsbereich $< 10 \% \pm 1 \%$) und verkürzt so den Korrosionsweg. Die feine Korngröße erhöht die **Korngrenzendichte**, verteilt die **Korrosionsspannung**, sorgt für eine gleichmäßigere Auflösung von Co und vermeidet lokale Korrosionskonzentrationen. Am Beispiel von WC-10Co verringert sich die Gewichtsverlustrate der optimierten Zusammensetzung in einer sauren Umgebung ($pH\ 2 \pm 0,1$) von $0,12\ mg/cm^2$ über $\pm 0,01\ mg/cm^2$ auf $0,07\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$. Dies weist darauf hin, dass der synergistische Effekt des niedrigen Co-Gehalts und der feinen Körner die Säurekorrosionsbeständigkeit deutlich verbessert.

(2) Zusatzstoffe

von Chromcarbid (Cr_3C_2) ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall. Die empfohlene Zugabemenge beträgt $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Während des Hochtemperatur-Sinterprozesses reagiert Cr mit Sauerstoff und bildet eine Cr_2O_3 -Passivierungsschicht mit einer Dicke von etwa $10\ nm \pm 1\ nm$. Diese Schicht verringert die Lochfraßrate erheblich um etwa $40 \% \pm 5 \%$ von $0,10\ mg/cm^2$ auf $0,10\ mg/cm^2$, indem sie das Eindringen von Cl^- -Ionen und H^+ -Ionen blockiert. $\pm 0,01\ mg/cm^2$ Gewichtsverlust auf $0,06\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$. Die Kompaktheit der Cr_2O_3 -Schicht macht sie zu einer wirksamen Barriere und reduziert die elektrochemische Auflösung von Co ($Co \rightarrow Co^{2+} + 2e^-$), insbesondere in Salzsprühumgebungen ($NaCl\ 5 \% \pm 0,1 \%$). Energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Cr-Gehalt in der Passivierungsschicht etwa $5 \% \pm 0,5 \%$ beträgt, was ihre Schutzwirkung bestätigt.

(3) Oberflächenbehandlung

Die Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit ist der Schlüssel zur Reduzierung von **Lochfraß und Oberflächenkorrosion**. Es wird empfohlen, die **Oberflächenrauheit (R_a) durch präzises mechanisches Polieren auf unter $0,05\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ zu kontrollieren**. Dieser Prozess kann die Lochfraßrate um etwa $20 \% \pm 5 \%$ und den Gewichtsverlust von $0,09\ mg/cm^2$ auf $\pm 0,01\ mg/cm^2$ bis hinunter auf $0,07\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$ reduzieren. Eine geringe Rauheit verringert Oberflächendefekte (wie Mikrorisse und Löcher), begrenzt die Retention korrosiver Medien und das Auftreten lokaler elektrochemischer Reaktionen. Zusätzlich wird Ultraschallreinigung (Frequenz $40\ kHz \pm 1\ kHz$) verwendet, um Oberflächenverunreinigungen (wie Fett, Oxide, Gehalt $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) zu entfernen und so die Oberflächenintegrität weiter zu verbessern. Experimente zeigen, dass die Lochfraßtiefe der WC-10Co-Probe mit optimierter Oberflächenbehandlung in einer Salzsprühumgebung (ISO 9227 NSS, 720 h) von $5\ \mu m \pm 0,5\ \mu m$ auf $4\ \mu m \pm 0,3\ \mu m$ reduziert wird, was eine signifikante Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit zeigt.

(4) Sinterprozess

Die Optimierung des Sinterprozesses wirkt sich direkt auf die Dichte des Hartmetalls und die Gleichmäßigkeit der Co-Verteilung aus. Die empfohlene Sintertemperatur beträgt $1450\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$. Vakuum oder eine Schutzatmosphäre (z. B. Argon) reduzieren die Oxidation und gewährleisten eine Materialdichte von $99,5 \% \pm 0,1 \%$. Durch die Steuerung der Sinterzeit (60–90 Minuten) kann die Abweichung der Co-Verteilung unter $0,1 \% \pm 0,02 \%$ gehalten werden, wodurch die Bindungsfestigkeit der WC-Co-Grenzfläche ($> 120\ MPa \pm 10\ MPa$) verbessert wird. Eine hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dichte und eine gleichmäßige Co-Verteilung reduzieren Poren und Mikrorisse und begrenzen so das Eindringen korrosiver Medien. Am Beispiel des optimierten gesinterten WC-10Co verringert sich dessen Gewichtsverlustrate in einer sauren Umgebung ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) von $0,11 \text{ mg/cm}^2$ auf $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und schließlich auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Dies deutet darauf hin, dass die Verbesserung des Sinterprozesses die Korrosionsbeständigkeit des Materials deutlich erhöht.

(5) Prüfvorschriften

Zur genauen Bewertung der optimierten Korrosionsbeständigkeit wird empfohlen, den Standard ISO 9227:2017 „Korrosionstest – Salzsprühstest in künstlicher Atmosphäre“ zu verwenden und das Sprühvolumen auf $12 \text{ ml/h} \pm 0,1 \text{ ml/h}$ (80 cm^2 horizontale Fläche) einzustellen, um die Wiederholbarkeit der Testbedingungen sicherzustellen. Die Massenmessung erfordert eine Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$, die Messgenauigkeit der Probenoberfläche beträgt $\pm 0,1 \text{ cm}^2$ und die Gewichtsverlustrate wird wie folgt berechnet: $\Delta W = (m_0 - m_t)/A$, wobei m_0 und m_t die Massen vor bzw. nach dem Test sind. Die Prüfzeit kann je nach Anwendungsanforderungen angepasst werden, beispielsweise auf 2000 ± 100 Stunden für die Langzeitbewertung der Korrosionsbeständigkeit. Durch diese Spezifikation lässt sich genau überwachen, ob die Gewichtsverlustrate den Zielwert ($< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) erreicht, und bietet so eine wissenschaftliche Grundlage für die Optimierung der Materialeigenschaften.

(6) Umfassende Fallanalyse

der Probe WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$, Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) beträgt die Gewichtsverlustrate im Salzsprühstest nach ISO 9227 NSS ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$, $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$) lediglich $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und ist damit viel niedriger als bei nicht optimiertem WC-12Co (Gewichtsverlust $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigte, dass die Lochfraßtiefe der optimierten Probe $3 \pm 0,3 \mu\text{m}$ betrug, was etwa $50 \% \pm 5 \%$ niedriger war als die der nicht optimierten $6 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Energiedispersive Spektroskopie (EDS) bestätigte, dass die Dicke der Cr_2O_3 -Schicht etwa $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ betrug und der Cr-Gehalt etwa $5 \% \pm 0,5 \%$ betrug, was das Eindringen von Cl^- und die Auflösung von Co wirksam verhinderte. Dank dieser Leistung erfüllt es die Anforderungen von Meeresanwendungen, wie z. B. Tiefseebohrkomponenten, mit einer Lebensdauer von bis zu $3 \text{ Jahren} \pm 0,3 \text{ Jahren}$, was besser ist als die $1,5 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$ herkömmlicher Materialien.

(7) Umweltanpassungsfähigkeit und Prozesssynergien

Die Optimierungsstrategie muss den synergistischen Effekt von Umgebungsbedingungen und Prozessparametern berücksichtigen. In einer sauren Umgebung ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$) ist die Schutzwirkung der Cr_2O_3 -Schicht in Kombination mit der feinen Korngröße ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) kann die Gewichtsverlustrate auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ gesteuert werden, während bei Hochtemperatur-Salzsprühnebel ($50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) der synergetische Effekt von Oberflächenpolitur und Sinterverdichtung (Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) die Lochfraßrate weiter auf $15 \% \pm 3 \%$ reduziert. Für unterschiedliche korrosive Umgebungen können der Co-Gehalt oder die Sintertemperatur den tatsächlichen Anforderungen entsprechend angepasst werden. Beispielsweise

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kann in einer stark sauren Umgebung Co auf $8 \% \pm 1 \%$ reduziert werden, um die Korrosionsbeständigkeit weiter zu verbessern.

(8) Anwendungsbedeutung und dynamische Optimierung

Optimierter Gewichtsverlust von Carbid in Säure-/Salzsprühumgebung ($< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) ermöglicht gute Leistung in den Bereichen chemische Ventile (Säurebeständigkeit, Lebensdauer $> 2 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) und Schiffsausrüstung (Salzsprühbeständigkeit, Lebensdauer $> 3 \text{ Jahre} \pm 0,3 \text{ Jahre}$). Dynamische Korrosionstests zeigen, dass die Gewichtsverlustrate im Frühstadium ($< 500 \text{ h}$) linear mit der Zeit zunimmt und sich dann aufgrund der Ansammlung von Korrosionsprodukten (wie Co(OH)_2) stabilisiert. Die optimierte Probe behält auch nach $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$ noch eine niedrige Gewichtsverlustrate bei, was die langfristige Korrosionsbeständigkeit bestätigt. In Zukunft kann die Leistung durch Einführung von Mehrlagenbeschichtungen oder neuen Additiven (wie TaC) zur Anpassung an komplexere Korrosionsumgebungen weiter optimiert werden.

Die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen wird durch die Kontrolle des Co-Gehalts ($8-10 \% \pm 1 \%$), die Optimierung der WC-Korngröße ($0,51 \pm 0,01 \mu\text{m}$), die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), die Oberflächenbehandlung ($\text{Ra} < 0,05 \pm 0,01 \mu\text{m}$, Ultraschallreinigung) und den Sinterprozess ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) optimiert. Durch das Zusammenspiel dieser Strategien wird der Gewichtsverlust auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und die Lochfraßrate um $40-50 \% \pm 5 \%$ reduziert, wodurch die Anwendungsanforderungen in der Schifffahrt, der Chemie und anderen Bereichen erfüllt werden.

8.1.2.5 Technische Anwendungen von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen

Das optimierte Hartmetall weist eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit in rauen Umgebungen wie sauren (pH-Wert $< 3 \pm 0,1$) und Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) auf und bietet zuverlässige technische Lösungen für viele Industriefelder, indem es Gewichtsverlust reduziert, Lochfraß verhindert und die Lebensdauer verlängert. Diese Optimierungsmaßnahmen umfassen die Anpassung der Zusammensetzung (beispielsweise Kontrolle des Co-Gehalts), die Einführung von Additiven (beispielsweise Cr_3C_2), die Optimierung der Oberflächenbehandlung und die Verbesserung des Sinterprozesses, wodurch Hartmetall ein erhebliches Anwendungspotenzial in Branchen wie der Schifffahrt, der Chemieindustrie und der Papierherstellung erschließt. Ausgehend von den drei Hauptfeldern Schiffsbohrkomponenten, Chemiepipeline-Ventile und Papierherstellungsanlagen werden im Folgenden zusammen mit spezifischen Daten und tatsächlichen Fällen die technischen Anwendungs- und Leistungsvorteile des optimierten Hartmetalls detailliert erörtert.

(1) Anwendung von Hartmetall in Offshore-Bohrkomponenten

Offshore-Bohrkomponenten (wie Bohrkronen und Stabilisatoren) müssen der doppelten Herausforderung von Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) und Seewasserkorrosion lange Zeit standhalten. Das optimierte WC-10Co-Hartmetall (Cr_3C_2 -Zusatz $0,5 \% \pm 0,01 \%$, Korngröße $0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weist im Salzsprühnebeltest nach ISO 9227 NSS (2000 h ± 100 h) einen Gewichtsverlust von lediglich $0,06 \text{ mg/cm}^2$ auf. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Lochfraßtiefe wird auf $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ kontrolliert und weist eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit auf. Diese Leistung ist auf die aus Cr_3C_2 gebildete Cr_2O_3 -Passivierungsschicht (Dicke ca. $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) zurückzuführen , die das Eindringen von Cl^- -Ionen wirksam blockiert. Gleichzeitig reduzieren die feinen Körner die freiliegende Co-Fläche ($< 10 \% \pm 1 \%$) und verhindern so die Ausbreitung von Lochfraß. Im Vergleich zum nicht optimierten WC-12Co (Gewichtsverlust $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Lochfraßtiefe $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, Lebensdauer $1,5 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) beträgt die Lebensdauer des optimierten Materials mehr als $3 \text{ Jahre} \pm 0,3 \text{ Jahre}$, und die Korrosionsbeständigkeit ist um ca. $60 \% \pm 5 \%$ verbessert. Bei der Tiefsee-Öl- und Gasförderung weisen die aus diesem Material gefertigten Bohrer nicht nur eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit auf, sondern sind auch verschleißfest, was die Häufigkeit des durch Korrosion verursachten Komponentenaustauschs verringert und den wirtschaftlichen Nutzen und die Sicherheit der Meerestechnik deutlich verbessert.

(2) Anwendung von Hartmetall in chemischen Rohrleitungsventilen

Ventile für Chemiepipelines werden häufig zum Transport säurehaltiger Flüssigkeiten (wie Salzsäure und Schwefelsäure) verwendet, für die eine extrem hohe Säurekorrosionsbeständigkeit des Materials erforderlich ist. Die Gewichtsverlustrate des optimierten WC-8Co-Hartmetalls (Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) in einer HCl-Umgebung mit einem pH-Wert von $2 \pm 0,1$ beträgt nur $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und ist damit viel niedriger als bei nicht optimiertem WC-10Co (Gewichtsverlust $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) . Niedriger Co-Gehalt ($8 \% \pm 1 \%$) und ultraniedrige Rauheit verringern die Erosion von Co durch H^+ -Ionen, und die Korrosionsbeständigkeit wird im Vergleich zu nicht optimierten Materialien um etwa $60 \% \pm 5 \%$ verbessert. Durch Oberflächenpolitur ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) werden Mikrodefekte eliminiert. In Kombination mit Ultraschallreinigung ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) zur Entfernung von Oberflächenverunreinigungen ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) wird die Beständigkeit gegen Lochkorrosion weiter verbessert. In der Praxis erreichen Ventile aus diesem Material in Übertragungssystemen für säurehaltige Flüssigkeiten eine Lebensdauer von über $2 \pm 0,2$ Jahren. Dies ist besser als bei herkömmlichem Edelstahl (Lebensdauer ca. $1 \text{ Jahr} \pm 0,1 \text{ Jahr}$), senkt die Wartungskosten und gewährleistet die Sicherheit und Kontinuität der chemischen Produktion. Es eignet sich besonders für die Behandlung hochkonzentrierter säurehaltiger Medien.

(3) Anwendung von Hartmetall in Papierherstellungsanlagen

Papierherstellungsgeräte (wie Mahlwalzen, Schneidwerkzeuge) müssen in schwach sauren Medien wie Sulfatlösungen ($\text{pH } 3 \pm 0,1$) korrosionsbeständig sein und gleichzeitig hohe Anforderungen an Verschleißfestigkeit und Hygiene erfüllen. Der Gewichtsverlust des optimierten WC-10Co-Hartmetalls (mit $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{ Cr}_3\text{C}_2$ -Zusatz) in Sulfatlösung beträgt nur $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Lochfraßrate liegt unter $0,05 \% \pm 0,01 \%$, was eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit zeigt. Die Cr_2O_2 -Passivierungsschicht verhindert wirksam die Auflösung von Co ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) , und die Feinkörner ($0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$) gewährleisten eine gleichmäßige Oberfläche und gleichbleibende Korrosionsbeständigkeit. Im Vergleich mit nicht optimiertem WC-12Co (Gewichtsverlust $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Lochfraßrate $0,1 \% \pm 0,02 \%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ist die Korrosionsbeständigkeit des optimierten Materials um etwa $50 \% \pm 5 \%$ verbessert. In der Praxis beträgt die Lebensdauer von Papiermaschinenkomponenten aus diesem Material mehr als 4 Jahre $\pm 0,4$ Jahre und übertrifft damit herkömmlicher Kohlenstoffstahl (Lebensdauer etwa 2 Jahre $\pm 0,2$ Jahre) bei weitem. Sein geringer Korrosionsproduktgehalt ($< 0,01 \% \pm 0,002 \%$) entspricht den Hygienestandards (wie z. B. GB 4806.1-2016) und eignet sich besonders für den Prozess der Herstellung von hochwertigem Papier.

(4) Der technische Wert der Optimierung des elektrochemischen Verhaltens

Die obigen Anwendungsfälle zeigen, dass die Optimierung des elektrochemischen Verhaltens von Hartmetall (wie etwa die Reduzierung von i_{corr} und die Verringerung der Gewichtsverlustrate) der Schlüssel zur Verbesserung seiner Zuverlässigkeit in sauren und salzhaltigen Umgebungen ist. Durch Optimierung der Zusammensetzung (Co 8–10 $\% \pm 1 \%$), Zugabe von Cr_3C_2 (0,5 $\% \pm 0,01 \%$), Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Verbesserung des Sinterprozesses (1450 $^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) wird die Gewichtsverlustrate von Hartmetall von 0,12 auf 0,15 mg/cm^2 reduziert. $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ auf 0,05–0,07 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, Lochfraßtiefe um 40–50 $\% \pm 5 \%$ reduziert. Diese Leistungssteigerung verlängert nicht nur die Lebensdauer des Materials (z. B. bei Offshore-Bohrkomponenten $> 3 \text{ Jahre} \pm 0,3 \text{ Jahre}$, bei Chemieventilen $> 2 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$, bei Papierherstellungsanlagen $> 4 \text{ Jahre} \pm 0,4 \text{ Jahre}$), sondern reduziert auch Wartungshäufigkeit und Austauschkosten. Beispielsweise sinken bei Offshore-Bohrungen die jährlichen Wartungskosten optimierter Komponenten um etwa 40 $\% \pm 5 \%$, und bei Chemiepipelines verlängert sich der Ventilaustauschzyklus um 50 $\% \pm 5 \%$, was die erheblichen wirtschaftlichen Vorteile in technischen Anwendungen widerspiegelt.

(5) Umweltanpassungsfähigkeit und Anwendungserweiterung

Das optimierte Hartmetall verfügt außerdem über eine gute Anpassungsfähigkeit an die Umwelt, sodass es mit komplexeren Korrosionsbedingungen zurechtkommt. So wird beispielsweise in der sauren Umgebung von Öl- und Gasfeldern mit Sulfiden (H_2S) die WC-10Co-Probe mit zugesetztem Cr_3C_2 durch die Cr_2O_3 -Schicht geschützt und ihre Beständigkeit gegen Sulfidkorrosion um etwa 40 $\% \pm 5 \%$ verbessert, sodass sie für Anlagen zur Verarbeitung von saurem Gas geeignet ist (Lebensdauer $> 2,5 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$). In einer Salzsprühumgebung mit hohen Temperaturen (50 $^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, NaCl 5 $\% \pm 0,1 \%$) hält der synergetische Effekt von Oberflächenpolitur und feiner Körnung die Gewichtsverlustrate bei 0,07 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ und erfüllt so die Korrosionsbeständigkeitsanforderungen von Tiefseepipelines und Offshore-Plattformen. Darüber hinaus ist das optimierte WC-10Co in Chloridlösungen (pH 3 $\pm 0,1$) in der Papierindustrie aufgrund seiner geringen Lochfraßrate ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) für Zellstoffumgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit und sauren Inhaltsstoffen geeignet, was seinen Anwendungsbereich weiter erweitert.

(6) Umfassende Fälle und Zukunftsaussichten

von WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 $\% \pm 0,01 \%$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) ist seine Leistung in verschiedenen korrosiven Umgebungen besser als die von herkömmlichen Materialien. Die Gewichtsverlustrate im Salzsprühnebel (2000 h $\pm 100 \text{ h}$) beträgt 0,06 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, Lochfraßtiefe $< 3 \mu\text{m} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 μm ; und der Gewichtsverlust in HCl bei pH 2 $\pm$ 0,1 beträgt 0,07 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm$ 0,01 mg/cm^2 ; und die Gewichtsverlustrate in Sulfatlösung bei pH 3 $\pm$ 0,1 beträgt 0,05 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm$ 0,01 mg/cm^2 . Diese Daten zeigen, dass das optimierte Hartmetall sowohl in sauren als auch in Salzsprühumgebungen eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aufweist, mit Lebensdauern von 3 Jahren $\pm$ 0,3 Jahren, 2 Jahren $\pm$ 0,2 Jahren bzw. 4 Jahren $\pm$ 0,4 Jahren. In Zukunft kann die Leistung des optimierten Hartmetalls in extrem korrosiven Umgebungen (wie saurem Salzsprühnebel bei hohen Temperaturen) durch die Einführung neuer Additive (wie VC, TaC) oder die Entwicklung mehrschichtiger Nanobeschichtungen (wie TiN / Al_2O_3) weiter verbessert werden , um komplexeren technischen Anforderungen gerecht zu werden, wie etwa extremen Tiefseebedingungen oder hochkonzentrierten sauren chemischen Prozessen.

(7) Dynamische Leistung und wirtschaftliche Vorteile

Dynamische Korrosionstests zeigen, dass die Gewichtsverlustrate des optimierten Hartmetalls im Anfangsstadium (< 500 h) linear mit der Zeit zunimmt und sich dann aufgrund der Ansammlung von Korrosionsprodukten (wie $\text{Co}(\text{OH})_2$) stabilisiert . Nach einer Langzeitbelastung von 2000 h $\pm$ 100 h bleibt die Gewichtsverlustrate bei 0,06–0,07 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm$ 0,01 mg/cm^2 , was die Stabilität in einer dynamischen Korrosionsumgebung bestätigt. Diese Leistungsverbesserung verlängert nicht nur die Lebensdauer der Ausrüstung, sondern senkt auch die Betriebskosten erheblich. So sinken beispielsweise die jährlichen Wartungskosten für Offshore-Bohrkomponenten um ca. 40 % $\pm$ 5 %, der Austauschzyklus von Chemieventilen verlängert sich um 50 % $\pm$ 5 % und die Produktionseffizienz von Papierherstellungsanlagen erhöht sich um ca. 20 % $\pm$ 3 %

Das optimierte Hartmetall eignet sich hervorragend für technische Anwendungen in sauren und salzhaltigen Umgebungen. WC-10Co- und WC-8Co-Formulierungen weisen eine Gewichtsverlustrate (0,05–0,07 mg/cm^2) in Offshore-Bohrkomponenten, Ventilen für Chemiepipelines und Papierherstellungsanlagen auf. $\pm$ 0,01 mg/cm^2) , Lochfraßtiefe (< 3 $\mu\text{m} \pm$ 0,5 μm) und Lebensdauer (> 2–4 Jahre $\pm$ 0,2–0,4 Jahre) sind deutlich besser als bei herkömmlichen Werkstoffen. Diese Anwendungsfälle belegen, dass die Optimierung der Korrosionsbeständigkeit eine Schlüsselstrategie zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und des wirtschaftlichen Nutzens von Hartmetall in rauen Umgebungen ist.

Tipps zur Hartmetallkorrosion in diesem Abschnitt

(1) Korrosionsverlauf von Hartmetall

Die Korrosionsverläufe von Hartmetallen (wie WC-Co- oder WC-Ni-Systemen) hängen hauptsächlich von ihrer Zusammensetzung, Mikrostruktur und den Umgebungsbedingungen ab, denen sie ausgesetzt sind. Nachfolgend finden Sie eine Übersicht über die typischen Korrosionsverläufe von Hartmetallen, basierend auf ihrem elektrochemischen Verhalten und ihren Materialeigenschaften:

Korrosionsmechanismus

Hartmetall besteht aus einer Hartphase (hauptsächlich Wolframkarbid WC) und einer Bindephase (üblicherweise Kobalt Co oder Nickel Ni). Der Korrosionsverlauf beginnt üblicherweise in der Bindephase, da deren chemische

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stabilität geringer ist als die von WC. Der Korrosionsprozess lässt sich in folgende Phasen unterteilen:

Elektrochemische Korrosion : In einer Umgebung mit Elektrolyten (wie Salzwasser oder sauren Lösungen) fungiert die Bindungsphase als Anode und löst sich bevorzugt auf, während die WC-Phase relativ inert ist.

Selektive Korrosion : Die Auflösung der Bindungsphase führt zur Freilegung von WC-Partikeln, gefolgt von mechanischer Ablösung oder Sekundärkorrosion.

Gleichmäßige Korrosion : In stark oxidierenden oder chloridreichen Umgebungen kann die WC-Phase langsam oxidieren, insbesondere bei langfristiger Einwirkung.

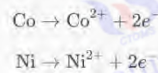
Korrosionspfad

Anfangsphase :

Korrosion entsteht durch Oberflächendefekte (wie Poren, Mikrorisse) oder das Freilegen von Bindungsphasen.

In einer neutralen oder schwach sauren Umgebung (wie etwa einer 3,5%igen NaCl-Lösung) unterliegen Co oder Ni bevorzugt einer anodischen Auflösung, wobei lösliche Ionen (wie etwa Co^{2+} oder Ni^{2+}) entstehen .

Beispielreaktion:

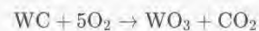


Zwischenstadium :

Nachdem die Bindemittelphase aufgelöst ist, verlieren die WC-Partikel ihren Halt und es fallen Partikel ab oder es kommt zu mikroskopischen Ablösungen.

In einer sauerstoffhaltigen oder oxidierenden Umgebung kann WC langsam oxidieren und WO_3 oder andere Oxide bilden.

Beispielreaktion:



Fortgeschrittenes Stadium :

Bei längerer Einwirkung bilden sich Löcher oder Korrosionsnarben auf der Oberfläche, was den Materialabbau beschleunigt.

In stark korrosiven Umgebungen, die säurehaltig sind oder Chloride enthalten (wie etwa Salznebel), kann sich die Lochfraßbildung verschlimmern und die strukturelle Integrität beeinträchtigen.

Einflussfaktoren

Umweltbedingungen :

Salzsprühnebel (zB ISO 9227) : Hohe Chloridkonzentrationen (zB 5% NaCl) fördern die Auflösung der Bindephase.

Saure Lösung (z. B. 1 % H_2SO_4) : beschleunigt die Co/Ni-Auflösung und die WC- Oxidation .

Temperatur : Eine steigende Temperatur (z. B. 50 °C) erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit.

Mikrostruktur :

Korngröße (GB/T 3850-2015): Feinkörniges Hartmetall (z. B. WC-Korngröße < 1 μm) hat eine bessere Korrosionsbeständigkeit.

Porosität: Eine hohe Porosität (z. B. > 0,5 %) kann leicht zu lokaler Korrosion führen.

Bindephasengehalt: Ein hoher Co/Ni-Gehalt (z. B. 10–15 %) erhöht die Korrosionsempfindlichkeit.

Oberflächenbeschaffenheit : Raue Oberflächen ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) oder Defekte können leicht zum Ausgangspunkt von Korrosion werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typische Korrosionspfadanalyse

Nehmen wir WC10Co als Beispiel:

Salzsprühumgebung (35 °C, 5 % NaCl, 48 h) :

Initial: Co löst sich auf und es bilden sich Mikrolöcher auf der Oberfläche (Gewichtsverlust $\sim 0,1 \text{ g/m}^2$, ISO 9227).

Mittleres Stadium: WC-Partikel werden freigelegt, fallen teilweise ab und die Grubentiefe nimmt auf 2–5 μm zu.

Spätstadium: Auf der Oberfläche bildet sich ein Netzwerk aus Löchern und die Korrosionsrate ist tendenziell stabil.

Saures Milieu (1% H_2SO_4 , 25 °C, 24 h) :

Initial: Co löst sich schnell auf, Gewichtsverlustrate $\sim 0,5 \text{ mg/cm}^2$.

Mittleres Stadium: WC oxidiert langsam und es bilden sich WO_3 -Ablagerungen auf der Oberfläche.

Spätstadium: Das gesamte Material verschlechtert sich und die Festigkeit nimmt ab.

Prüfung und Bewertung

Elektrochemische Methode (ASTM G59, G5) : Messen Sie E_{corr} und i_{corr} zur Beurteilung der Korrosionsneigung.

WC10Co: $E_{\text{corr}} \sim -300 \text{ mV (SCE)}$, $i_{\text{corr}} \sim 1-10 \mu\text{A/cm}^2$.

Salzsprühtest (ISO 9227) : quantifiziert Gewichtsverlust und Lochtiefe.

Mikroskopische Analyse (GB/T 3850-2015) : Beobachten Sie die Veränderungen der Mikrostruktur nach der Korrosion.

Schutzmaßnahmen

Oberflächenbeschichtung : beispielsweise TiN- oder CrN -Beschichtung, um die Freilegung der Bindungsphase zu verringern.

Legierungsoptimierung : Reduzieren Sie den Co/Ni-Gehalt oder fügen Sie korrosionsbeständige Elemente (wie Cr) hinzu.

Umweltkontrollen : Vermeiden Sie Bedingungen mit hohem Chloridgehalt oder Säuregehalt.

Der Korrosionsverlauf von Hartmetall beginnt mit der elektrochemischen Auflösung der Bindephase und führt allmählich zur Ablösung und Oxidation von WC-Partikeln. Der spezifische Verlauf wird durch die Umgebung und die Mikrostruktur beeinflusst. Prüfmethode wie ASTM G5 und ISO 9227 können das Korrosionsverhalten effektiv bewerten und in Kombination mit Schutzmaßnahmen die Lebensdauer deutlich verlängern.

(2) Hartmetall verbessert den Oberflächenschutz

Die Verbesserung des Oberflächenschutzes von Hartmetall (z. B. WC-Co- oder WC-Ni-Systeme) ist eine Schlüsseltechnologie zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Lebensdauer. Im Folgenden finden Sie gängige Methoden, Prinzipien und Anwendungen für den Oberflächenschutz von Hartmetall, kombiniert mit Materialeigenschaften und relevanten Normen:

Oberflächenschutzprinzip

Ziel : Verhinderung elektrochemischer Korrosion und mechanischen Verschleißes durch Bildung einer Schutzschicht auf der Oberfläche des Hartmetalls, um die Freilegung der Bindungsphase (wie Co oder Ni) zu verringern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismus :

Barrierewirkung: verhindert den Kontakt korrosiver Medien (wie Cl^- , H^+) mit dem Substrat.

Passivierungseffekt: Verbessert die antioxidative Kapazität der Oberfläche.

Härteeffekt: Verbessert die Verschleiß- und Kratzfestigkeit.

Verbesserte Oberflächenschutzmethoden

Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)

Technologien: Abscheidung von TiN, CrN- oder AlTiN-Beschichtungen wie Magnetronspuiten oder Lichtbogeniononplattieren.

Dicke : 2-10 μm .

Vorteil :

Hohe Härte (HV 2000-3000).

Hervorragende Korrosions- und Verschleißbeständigkeit.

Anwendung : Schneidwerkzeuge, Formen (wie WC10Co für hochpräzise Bearbeitung).

Prüfnormen : ASTM G65 (Abriebtest mit trockenem Sand/Gummirad) bewertet die Abriebfestigkeit, ISO 9227 (Salzsprühstest) bewertet die Korrosionsbeständigkeit.

Notiz : Die Haftung zwischen der Beschichtung und dem Substrat muss den ASTM C633-Test bestehen, um eine Haftung $> 40 \text{ MPa}$ sicherzustellen.

Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)

Technologie: TiC, TiCN- oder Al_2O_3 -Beschichtungen werden bei 900-1100° C abgeschieden.

Dicke : 5-15 μm .

Vorteil :

Hohe Temperaturstabilität, geeignet für Umgebungen mit hohen Temperaturen.

Beständig gegen Oxidation und chemische Angriffe.

Anwendung : Hochtemperatur-Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer.

Prüfnormen : ASTM G99 (Stift-auf-Scheibe - Verschleißtest) prüft die Verschleißfestigkeit, GB/T 16545-2008 (Salzsprühkorrosionstest) bewertet die Haltbarkeit.

Hinweis : Hohe Temperaturen können zur Co-Diffusion in der Matrix führen und der Prozess muss optimiert werden.

Thermisches Spritzen

Technologie : Plasmaspritzen oder Flamspritzen, Aufbringen von WC-Co- oder Cr_3C_2 -NiCr-Verbundbeschichtungen.

Dicke : 50-200 μm .

Vorteil :

Die dicke Beschichtung bietet mehrfachen Schutz.

Stoß- und abriebfest.

Anwendung : Verschleißfeste Teile, Pumpenkomponenten.

Prüfnormen : ASTM G76 (Luftstromverschleißtest) bewertet die Korrosionsverschleißbeständigkeit, ISO 28079 (Palmqvist-Zähigkeitstest) bewertet die Beschichtungszähigkeit.

Hinweis : Die Porosität der Beschichtung muss auf $< 2 \%$ kontrolliert werden (GB/T 3850-2015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenpenetrationsschicht

Technologie : Aufkohlen, Chromieren oder Nitrieren (z. B. Plasmanitrieren) zur Verbesserung der chemischen Stabilität der Oberfläche.

Tiefe : 10-50 μm .

Vorteil :

Verbessern Sie die Oberflächenhärte (HV 1500–2000).

Bildet korrosionsbeständige Verbindungen (wie CrN) .

Anwendungen : Korrosionsbeständige Werkzeuge, Ventilkomponenten.

Prüfnorm : ASTM G31 (Immersionsskorrosionstest) zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit .

Hinweis : Vermeiden Sie eine übermäßige Dicke der Diffusionsschicht, da dies zu inneren Spannungen führen kann.

Elektrochemische Behandlung

Technologie : Eloxierte oder galvanisierte Ni-P-Legierungsschicht.

Dicke : 5-20 μm .

Vorteil :

Bilden Sie eine Passivierungsschicht, um die Co-Auflösung zu reduzieren.

Die Kosten sind gering.

Anwendung : Leicht belastete korrosionsbeständige Teile.

Prüfnorm : ASTM G59 (Messung des Polarisationswiderstands) bewertet die Korrosionsstromdichte.

Hinweis : Die galvanische Schicht weist eine geringe Verschleißfestigkeit auf und muss mit anderen Beschichtungen kombiniert werden.

Leistungssteigernde Effekte

Korrosionsbeständigkeit : PVD- TiN -Beschichtung reduziert den Gewichtsverlust von WC10Co in 5 % NaCl-Salzsprühnebel von 0,1 g/m² auf < 0,01 g/m² (ISO 9227) .

Verschleißfestigkeit : Eine CVD- Al₂O₃ -Beschichtung kann den Volumenverlust durch Verschleiß um 50–70 % reduzieren (ASTM G 65) .

Lebensdauer : Eine thermisch gespritzte WC-Co-Beschichtung kann die Lebensdauer des Werkzeugs um das 2- bis 3-fache verlängern (tatsächliche Anwendungsdaten).

Prozessoptimierung

Oberflächenvorbehandlung : Polieren auf Ra ≤ 0,05 μm (GB/T 7997-2017), um Defekte zu beseitigen .

Beschichtungskombination : Verwenden Sie eine Mehrschichtstruktur (z. B. TiN + AlTiN) , um die Rissbeständigkeit zu verbessern.

Nachbehandlung : Eine Wärmebehandlung (z. B. Anlassen bei 400 °C) baut Spannungen ab und verbessert die Haftung.

Testen und Verifizieren

Korrosionsprüfung : ISO 9227 (Salzsprühnebel), ASTM G31 (Eintauchen), ASTM G59 (elektrochemisch) .

Verschleißtest : ASTM G65 (Trockensandverschleiß) , ASTM G99 (Stift-auf-Scheibe-Verschleiß) .

Mikroskopische Analyse : GB/T 3850-2015. Beobachten Sie die Schnittstelle zwischen Beschichtung und Substrat.

Leistungsbewertung : GB/T 7997-2017 misst Härte und Zähigkeit.

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

Anwendungsfälle

Schneidwerkzeuge : WC6Co - Werkzeuge sind mit PVD TiN beschichtet , was die Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit verbessert und für die Verarbeitung von Aluminiumlegierungen in der Luftfahrt geeignet ist.

Bergbaubohrer : Der WC12Co-Bohrer ist mit CVD TiCN beschichtet , um die Lebensdauer auf über 1000 Stunden zu verlängern.

Verschleißfeste Beschichtung : Thermisches Spritzen von WC-Co wird für Ventile von Öl- und Gaspipelines verwendet, um Sanderosion zu verhindern.

Vorsichtsmaßnahmen

Kosten : PVD und CVD sind teurer und für hochwertige Teile geeignet; thermisches Spritzen eignet sich für großflächigen Schutz.

Anpassungsfähigkeit an Umweltbedingungen : Die Beschichtung muss für bestimmte Umgebungen (wie Säure oder hohe Temperaturen) ausgelegt sein.

Wartung : Überprüfen Sie regelmäßig die Integrität der Beschichtung, um ein lokales Ablösen zu vermeiden, das zu Korrosion führen kann.

Der Oberflächenschutz von Hartmetall kann durch verschiedene Verfahren wie PVD, CVD, thermisches Spritzen, Beschichten und elektrochemische Behandlung verbessert werden. Die konkrete Wahl hängt von den Anwendungsanforderungen und den Umgebungsbedingungen ab. In Kombination mit Standardprüfungen (wie ISO 9227, ASTM G65) kann die Beschichtungsleistung optimiert werden, um die Korrosions- und Verschleißbeständigkeit von Hartmetall deutlich zu verbessern.

(3) Korngrenzendichte von Hartmetall

Die Korngrenzendichte von Hartmetall (z. B. WC-Co- oder WC-Ni-Systemen) ist ein wichtiger Parameter zur Messung seiner mikrostrukturellen Eigenschaften und Leistungsfähigkeit. Sie hängt in der Regel eng mit Korngröße, Porosität und Phasenverteilung zusammen. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung der Definition, Messmethode, Einflussfaktoren und Bedeutung der Korngrenzendichte von Hartmetall:

Definition

Korngrenzendichte : bezeichnet die Gesamtlänge oder Fläche der Korngrenzen innerhalb eines Einheitsvolumens, üblicherweise ausgedrückt als Einheitslänge (z. B. m^{-2}) oder Einheitsvolumen (z. B. m^{-1}) . In Hartmetall bestehen Korngrenzen hauptsächlich zwischen Wolframkarbid (WC)-Partikeln und an der Schnittstelle zwischen WC und der Bindephase (Co oder Ni).

Zugehörige Konzepte :

Korngröße: Die Korngrenzendichte ist umgekehrt proportional zur Korngröße, und feinkörnige Materialien haben eine höhere Korngrenzendichte.

Verteilung der Bindungsphase: Die Gleichmäßigkeit der Co/Ni-Phase beeinflusst die Qualität und Dichte der Korngrenzen.

Messmethode

Die Korngrenzendichte von Hartmetall wird üblicherweise durch mikroskopische Beobachtung und Bildanalyse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bestimmt, wobei einschlägige Normen wie GB/T 3850-2015 „Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall“ befolgt werden:

Optische Mikroskopie (OM) :

Nach dem Polieren und Ätzen (5 % NaOH oder Tinte) wurden die Proben bei 500- bis 1000-facher Vergrößerung betrachtet.

Die Länge des Korngrenzenabschnitts wird entlang einer geraden Linie oder eines Gitters gemessen und die Korngrenzendichte pro Flächeneinheit berechnet.

Rasterelektronenmikroskopie (REM) :

In Kombination mit der Rückstreuелектроненbildung (BSE) wurden die WC-WC- und WC-Co-Grenzflächen analysiert.

Mithilfe von Bildanalysesoftware (wie etwa ImageJ) können Korngrenzenlängen oder -flächen gezählt werden.

Quantitative Berechnung :

假设晶粒为球形, 晶界密度 P_L (单位长度晶界密度) 可近似为:

$$P_L = \frac{2}{d}$$

其中 d 为平均晶粒直径 (μm), P_L 单位为 μm^{-1} .

单位体积晶界密度 S_V 可通过立体学方法估算:

$$S_V = 2P_L$$

单位为 μm^{-2} .

Einflussfaktoren

Körnung :

Feinkörniges Hartmetall (wie WC mit einer Korngröße von 0,2–0,8 μm) hat eine hohe Korngrenzendichte und die P_L kann 2,5–10 μm^{-1} erreichen.

Grobe Körner (z. B. WC-Korngröße $> 2 \mu\text{m}$) haben eine geringe Korngrenzendichte, $P_L < 1 \mu\text{m}^{-1}$.

Sinterprozess :

Die Temperatur (1300–1500 °C) und die Zeit des Flüssigphasensinterns beeinflussen das Kornwachstum, und ein zu langes Sintern verringert die Korngrenzendichte.

Durch Zugabe von Inhibitoren (wie VC, Cr_3C_2) können die Körner verfeinert und die Korngrenzendichte erhöht werden.

Bindephasengehalt :

Ein hoher Co/Ni-Gehalt (z. B. 10–15 %) kann Korngrenzen füllen und die effektive Korngrenzendichte verringern, erhöht jedoch die Korrosionsempfindlichkeit.

Porosität :

Eine hohe Porosität (z. B. $> 0,5 \%$) unterbricht die Korngrenzenkontinuität und verringert die tatsächliche Korngrenzendichte (GB/T 3850-2015).

Typische Daten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC6Co (细晶粒, 粒径 0.5 μm) :

- $P_L \approx 4 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 8 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度高, 增强韧性和抗裂性。

WC10Co (中等晶粒, 粒径 1.0 μm) :

- $P_L \approx 2 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 4 \mu\text{m}^{-2}$.
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co (粗晶粒, 粒径 2.5 μm) :

- $P_L \approx 0.8 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 1.6 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度低, 耐磨性优但韧性下降。

Die Bedeutung der Korngrenzendichte

Mechanische Eigenschaften :

Eine hohe Korngrenzendichte verbessert die Festigkeit und Zähigkeit (z. B. Biegefestigkeit GB/T 7997-2017 > 2500 MPa), kann aber die Sprödigkeit erhöhen.

Eine niedrige Korngrenzendichte verbessert die Verschleißfestigkeit und eignet sich für Anwendungen mit hoher Belastung.

Korrosionsbeständigkeit :

Korngrenzen sind der bevorzugte Korrosionspfad und feinkörnige Materialien können aufgrund der hohen Korngrenzendichte die lokale Korrosion beschleunigen (z. B. erhöhte Gewichtsverlustrate gemäß ISO 9227).

Durch eine Optimierung der Bindephasenverteilung kann die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion verringert werden.

Thermische Stabilität :

Materialien mit hoher Korngrenzendichte neigen bei hohen Temperaturen (z. B. 800 °C) eher zum Korngrenzengleiten und erfordern einen Beschichtungsschutz.

Optimierung der Korngrenzendichte

Prozesskontrolle :

von ultrafeinem Pulver (Partikelgröße < 0,5 μm) in Kombination mit Sintern bei niedriger Temperatur und kurzer Zeit.

Fügen Sie Korninhibitoren (z. B. 0,5 % VC) hinzu, um die Korngrenzendichte aufrechtzuerhalten.

Nachbearbeitung :

HIP (heißisostatisches Pressen) reduziert die Porosität und verbessert die Gleichmäßigkeit der Korngrenzen.

Oberflächenveredelung :

PVD/CVD-Beschichtungen (wie beispielsweise TiN) schützen Korngrenzen und reduzieren Korrosionswege (siehe Verbesserter Oberflächenschutz von Hartmetall).

Testen und Verifizieren

Mikroskopische Beobachtung : Standard GB/T 3850-2015, Messung der Korngröße und Korngrenzendichte.

Leistungstests : GB/T 7997-2017 bewertet Härte und Zähigkeit, ASTM G65 bestimmt die Verschleißfestigkeit.

Korrosionsbewertung : Salzsprühtest ISO 9227, elektrochemische Analyse ASTM G59 .

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

Die Korngrenzendichte von Hartmetall hängt eng mit seiner Korngröße, dem Sinterprozess und der Bindungsphasenverteilung zusammen und wird üblicherweise durch mikroskopische Analyse quantifiziert. Feinkörnige Werkstoffe weisen eine hohe Korngrenzendichte auf und eignen sich für Anwendungen mit hoher Zähigkeit, allerdings sind Korrosionsrisiken zu beachten. Grobkörnige Werkstoffe weisen eine geringe Korngrenzendichte und eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit auf. Durch Prozessoptimierung und Oberflächenschutz können die Leistungseinbußen der Korngrenzendichte ausgeglichen werden.

(4) Korrosionsbeanspruchung von Hartmetall

Die Korrosionsspannung von Hartmetall (z. B. WC-Co- oder WC-Ni-Systemen) bezeichnet den Spannungszustand, der im Inneren oder an der Oberfläche des Materials durch die kombinierte Einwirkung von korrosiver Umgebung und äußerer Belastung entsteht und zu verstärkter Korrosion oder Materialversagen führt. Dieser Effekt ist in der Regel mit Spannungsrisskorrosion (SCC) oder Korrosionsermüdung verbunden. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse der Korrosionsspannung von Hartmetall, einschließlich Mechanismus, Einflussfaktoren, Prüfmethode und Schutzmaßnahmen.

Mechanismus der Korrosionsspannung

Elektrochemische Wirkung : In einer elektrolythaltigen Umgebung (wie Salzlake oder saurer Lösung) fungiert die Bindungsphase (wie Co oder Ni) als Anode und löst sich bevorzugt auf, was zu einer lokalen Spannungskonzentration führt.

Spannungskonzentration : Oberflächendefekte, Korngrenzen oder Mikrorisse dehnen sich unter der Einwirkung korrosiver Medien aus und verursachen Spannungsrisskorrosion.

Wasserstoffversprödungseffekt : In einer sauren oder wasserstoffhaltigen Umgebung (H_2S , HCl) dringen Wasserstoffatome in die Korngrenzen ein, erhöhen die inneren Spannungen und verursachen einen spröden Bruch.

Ermüdungskorrosionskopplung : Unter zyklischer Belastung beschleunigen korrosive Medien die Rissausbreitung und verkürzen die Lebensdauer.

Korrosionsspannungspfad

Anfangsphase :

Beim Zusammenwirken einer aufgetragenen Belastung (z. B. Zug- oder Biegespannung) und eines korrosiven Mediums (z. B. 3,5 % NaCl) korrodiert bevorzugt die Bindephase.

Spannungen konzentrieren sich an Korngrenzen oder Defekten und verursachen Mikrorisse.

Zwischenstadium :

Mikrorisse weiten sich und WC-Partikel verlieren ihren Halt, fallen ab oder brechen.

von Korrosionsprodukten (wie Co^{2+} oder WO_3), die die lokale Spannung verstärken.

Fortgeschrittenes Stadium :

Die Risse dringen in das Material ein und verursachen makroskopische Versagen.

Durch Ermüdungszyklen wird das Risswachstum beschleunigt und die kritische Bruchspannung verringert.

Einflussfaktoren

Umweltbedingungen :

Chloridkonzentration : Umgebungen mit hohem Cl^- -Gehalt (wie Salzsprühnebel, ISO 9227) erhöhen die Anfälligkeit für Spannungskorrosion.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pH : Saure ($\text{pH} < 4$) oder alkalische ($\text{pH} > 10$) Umgebungen verschlimmern die Wasserstoffversprödung oder anodische Auflösung.

Temperatur : Erhöhen Sie die Temperatur auf 50–100 °C, um die Reaktionsgeschwindigkeit zu beschleunigen.

Mikrostruktur (GB/T 3850-2015):

Korngröße : Feine Körner (z. B. $< 1 \mu\text{m}$) haben **eine** hohe Korngrenzendichte und neigen zu Spannungskorrosion; grobe Körner ($> 2 \mu\text{m}$) weisen eine bessere Beständigkeit gegen Spannungskorrosion auf.

Porosität : Porosität $> 0,5\%$ erhöht die Spannungskonzentrationspunkte.

Gehalt der Bindephase : Ein hoher Co/Ni-Gehalt (z. B. 10–15 %) verringert die Spannungskorrosionsbeständigkeit.

Ladebedingungen :

Spannungsart : **Zugspannung** führt eher zu Spannungsrisskorrosion als Druckspannung.

Spannungsniveau : Ein Überschreiten von 50–80 % der Streckgrenze erhöht die Korrosion erheblich.

Oberflächenbeschaffenheit : Raue Oberflächen ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) oder Kratzer können leicht zum Ausgangspunkt von Spannungsrisskorrosion werden.

Typische Daten

WC10 Co :

Umgebung : 3,5 % NaCl, 25 °C, Zugspannung 1500 MPa (60 % der Streckgrenze).

Ergebnisse : Rissbildungszeit ~100 h, Risstiefe 50–100 μm (ASTM G36).

E_{korr} : -300 mV (SCE), i_{korr} ~ 5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ASTM G59).

WC6Co (feinkörnig):

Umgebung : 1 % H_2SO_4 , 50 °C, zyklische Belastung 1000 MPa.

Ergebnis : Die Ermüdungslebensdauer verringerte sich um 30 % und die Risswachstumsrate betrug 10^{-6} m/Zyklus (ASTM E647).

Testmethode

Spannungsrisskorrosion (SCC) (ASTM G36, G129):

Methoden : Es wurde eine Zugprüfung mit langsamer Dehnungsrate (SSRT) mit einer Belastungsrate von 10^{-6} s^{-1} verwendet und die Bruchzeit und Rissmorphologie aufgezeichnet.

Parameter : Spannungsintensitätsfaktor K_{ISCC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), WC10Co typischer Wert ~15-20.

Elektrochemische Überwachung (ASTM G5, G59):

E_{korr} und i_{korr} wurden gemessen, um die Korrosionsspannungsempfindlichkeit zu bewerten.

Ermüdungskorrosion (ASTM E466):

Zur Erfassung der Ermüdungslebensdauer wurde eine zyklische Belastung ($R = 0,1$, Frequenz 10 Hz) in Kombination mit korrosiven Medien verwendet.

Mikroskopische Analyse (GB/T 3850-2015):

Mittels SEM wurden der Rissausbreitungsverlauf und die Korrosionsprodukte beobachtet.

Schutzmaßnahmen

Materialoptimierung :

Durch Reduzierung des Co/Ni-Gehalts (z. B. 6 % Co) und Zugabe von Cr oder Mo wird die Korrosionsbeständigkeit verbessert.

Verfeinert die Korngröße ($< 0,5 \mu\text{m}$) und reduziert die Porosität ($< 0,2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenschutz :

PVD-Beschichtung (wie TiN , CrN) mit einer Dicke von 5-10 μm verringert das Eindringen des Mediums (siehe verbesserter Oberflächenschutz von Hartmetall).

Elektrochemische Passivierung zur Bildung einer Cr_2O_3 - oder NiO - Schutzschicht.

Prozesskontrolle :

Durch HIP-Sintern werden innere Spannungen eliminiert.

Oberfläche poliert auf $\text{Ra} \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017).

Umweltmanagement :

Vermeiden Sie Bedingungen mit hohem Chlorid- oder Säuregehalt und verwenden Sie Korrosionsschutzbeschichtungen oder Korrosionsinhibitoren (wie etwa NaNO_2) .

Anwendungsfälle

Schneidwerkzeuge : WC6Co-Werkzeuge werden in einer Salzsprühumgebung (ISO 9227) mit TiN beschichtet und die Spannungsrisskorrosionszeit wird auf 500 Stunden verlängert.

Bergbaubohrer : WC12Co . In **Säureminen** werden Körnung und Beschichtung optimiert und die Lebensdauer um 40 % erhöht.

Ventilteile : WC10Co chromiert, **beständig** gegen H_2S -Korrosionsbelastung, Lebensdauer bis zu 2 Jahre.

Die Korrosionsspannung von Hartmetall wird hauptsächlich durch die Auflösung der Bindungsphase und die Spannungskonzentration verursacht. Zu den Einflussfaktoren zählen Umgebung, Mikrostruktur und Belastungsbedingungen. Prüfmethode wie ASTM G36 und G5 ermöglichen eine effektive Bewertung der Leistung. In Kombination mit Materialoptimierung und Oberflächenschutz lässt sich das Ausfallrisiko durch Korrosionsspannung deutlich reduzieren.

(5) Lochfraß auf der Hartmetalloberfläche

Lochfraß an der Oberfläche von Hartmetall (z. B. WC-Co- oder WC-Ni-Systemen) ist eine Form lokaler Korrosion, die sich in kleinen, tiefen Löchern auf der Oberfläche äußert. Dieses Phänomen tritt üblicherweise in stark korrosiven Umgebungen mit Chloriden oder Halogeniden (z. B. NaCl , HCl) auf und beeinträchtigt die Haltbarkeit und Leistung des Materials erheblich. Im Folgenden werden Mechanismus, Einflussfaktoren, Nachweismethoden und Schutzmaßnahmen gegen Lochfraß an der Oberfläche von Hartmetall detailliert analysiert.

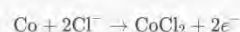
Lochfraßmechanismus

Elektrochemischer Prozess :

Die Bindephase (wie Co oder Ni) fungiert als Anode und löst sich bevorzugt auf, um einen winzigen Anodenbereich zu bilden.

Die WC-Phase ist relativ inert und fungiert als Kathode, wodurch die lokale elektrochemische Reaktion beschleunigt wird.

Beispielreaktion:



Autokatalytischer Effekt :

Gruben sammeln sich Cl^- und H^+ , wodurch der lokale pH-Wert gesenkt und die Korrosion beschleunigt wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsprodukte (wie Co^{2+} oder WO_3) lagern sich ab, behindern die Diffusion und bilden eine abgeschlossene Umgebung.

Crack -Erweiterung :

Die Spannungskonzentration in der Grube führt dazu, dass die WC-Partikel abfallen, wodurch sich Durchmesser und Tiefe der Grube vergrößern.

Lochfraßpfad

Anfangsphase :

Lochkorrosion entsteht durch Oberflächendefekte (wie Mikrorisse, Poren) oder das Freilegen von Bindungsphasen. Im Salzsprühnebel (z. B. 5 % NaCl, 35 °C) oder in sauren Lösungen bilden sich lokale anodische Bereiche.

Entwicklungsphase :

Die Elektrolytkonzentration in der Grube steigt und die Korrosionsgeschwindigkeit beschleunigt sich.

Die WC-Partikel verlieren ihren Halt und es kam zu einer mechanischen Ablösung.

Spätes Stadium :

der Vertiefungen nimmt zu (bis zu 10–100 μm) und auf der Oberfläche bilden sich mehrere unabhängige Vertiefungen.

In schweren Fällen kann es zu Materialdurchdringung oder Ermüdungsbruch kommen.

Einflussfaktoren

Umweltbedingungen :

Chloridkonzentration : Umgebungen mit hohem Cl^- -Gehalt (wie etwa Salzsprühtest nach ISO 9227) fördern Lochkorrosion erheblich.

pH : Saure ($\text{pH} < 4$) oder neutrale Chloridlösungen neigen zur Lochkorrosion.

Temperatur : Erhöhen Sie die Temperatur auf 40–60 °C, um die Reaktion zu beschleunigen.

Mikrostruktur (GB/T 3850-2015):

Korngröße : Feine Körner (z. B. $< 1 \mu\text{m}$) haben eine hohe Korngrenzendichte und bilden leicht Ansatzpunkte für Lochfraß; grobe Körner ($> 2 \mu\text{m}$) sind widerstandsfähiger gegen Lochkorrosion.

Porosität : Porosität $> 0,5\%$ erhöht die Anfälligkeit für Lochfraß.

Gehalt der Bindephase : Ein hoher Co/Ni-Gehalt (z. B. 10–15 %) verringert die Beständigkeit gegen Lochkorrosion.

Oberflächenbeschaffenheit :

Raue Oberflächen ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) oder Kratzer können zu Lochkorrosion führen.

Restspannungen ($> 50 \text{ MPa}$) verstärken die lokale Korrosion.

Typische Daten

WC10 Co :

Umgebung : 5 % NaCl, 35 °C, 48 h (ISO 9227).

Ergebnisse : Die Lochdichte beträgt 5–10/cm², die durchschnittliche Tiefe beträgt 5–15 μm und die Gewichtsverlustrate beträgt 0,1 g/m².

E_{corr} : -300 mV (SCE), $i_{\text{corr}} \sim 5 \mu\text{A/cm}^2$ (ASTM G59) .

WC6Co (feinkörnig):

Umgebung : 3,5 % NaCl, 25 °C, 96 Std.

Ergebnisse : Die Lochfraßdichte beträgt 15–20/cm², die Tiefe 2–10 μm und die Gewichtsverlustrate 0,05 g/m².

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nachweismethoden

Mikroskopische Beobachtung (GB/T 3850-2015):

der Vertiefungen wurden mit einem optischen Mikroskop (500x-1000x) oder SEM mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ gemessen.

Elektrochemische Prüfung (ASTM G5, G59):

Potentiodynamische Polarisationskurven zeigen das Lochfraßpotential (E_{pit}), mit einem typischen E_{pit} von WC10Co von $\sim 200-400 \text{ mV (SCE)}$.

Salzsprühnebelprüfung (ISO 9227):

Belichten Sie es 24–96 Stunden lang und zeichnen Sie die Anzahl und Tiefe der Vertiefungen auf.

Oberflächenanalyse :

EDS oder XPS erkennt Korrosionsprodukte in den Gruben (wie CoCl_2 , WO_3).

Schutzmaßnahmen

Materialoptimierung :

Durch Reduzierung des Co/Ni-Gehalts (z. B. 6 % Co) und Zugabe von Cr oder Mo wird die Lochfraßbeständigkeit verbessert.

Verfeinert die Korngröße ($< 0,5 \mu\text{m}$) und reduziert die Porosität ($< 0,2 \%$).

Oberflächenbehandlung :

PVD -Beschichtung : TiN oder CrN (Dicke $5-10 \mu\text{m}$), verringert das Eindringen von Cl^- (siehe verbesserter Oberflächenschutz von Hartmetall).

Elektrochemische Passivierung : Bildung einer Cr_2O_3 - oder NiO- Schutzschicht.

Polieren : Oberfläche $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017), Defekte entfernen.

Umweltkontrolle :

Vermeiden Sie Umgebungen mit hohem Chloridgehalt und verwenden Sie Korrosionsinhibitoren (wie etwa NaNO_2), um Cl^- zu neutralisieren.

Halten Sie die Temperatur unter 40°C .

Anwendungsfälle

Schneidwerkzeuge : WC6Co-Werkzeuge werden in einer Salzsprühumgebung mit TiN beschichtet und die Lochfraßdichte auf $< 2/\text{cm}^2$ reduziert.

Ventilteile : WC10Co In Meerwasserumgebung wird die Lochfraßtiefe nach der Chromierung auf $5 \mu\text{m}$ begrenzt.

Bergbaubohrer : WC12Co mit CVD- Al_2O_3 - Beschichtung, die die Lochfraßbeständigkeit verbessert und die Lebensdauer um 50 % verlängert.

Vorsichtsmaßnahmen

Früherkennung : Lochfraß ist im Frühstadium mit bloßem Auge schwer zu erkennen und erfordert eine regelmäßige elektrochemische Überwachung.

Reparaturschwierigkeiten : Wenn sich die Lochfraßgrube ausdehnt, ist die Reparaturwirkung der Beschichtung begrenzt, daher wird Vorbeugung empfohlen.

Kosten : Moderne Beschichtungen (wie PVD) sind teurer und müssen je nach Einsatzumgebung ausgewählt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

abschließend

Lochkorrosion auf Hartmetalloberflächen wird hauptsächlich durch die lokale Auflösung der Bindungsphase und den autokatalytischen Effekt verursacht, der von der Umgebung und der Mikrostruktur beeinflusst wird. Prüfmethode wie ISO 9227 und ASTM G5 ermöglichen eine effektive Bewertung des Lochkorrosionsverhaltens. Die Kombination von Oberflächenbeschichtungen und Materialoptimierung kann das Lochkorrosionsrisiko deutlich reduzieren und die Lebensdauer verlängern.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

8.2 Hochtemperatureigenschaften von Hartmetall

Die Leistung von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800 - 1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) bestimmt direkt sein Anwendungspotenzial unter harten Arbeitsbedingungen, wie etwa bei Luftfahrtwerkzeugen (Lebensdauer $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$), Hochtemperaturformen (Zykluszeiten $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und Energiegeräten (wie etwa Gasturbinen, Betriebszeit $> 10^4\text{ Stunden} \pm 10^3\text{ Stunden}$). Die Hochtemperaturleistung von Hartmetall zeigt sich hauptsächlich in **seiner Oxidationsbeständigkeit** (Massenzunahme $< 0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), **thermischen Ermüdung** (Rissausdehnung $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) und **Kriechen** (Dehnungsgeschwindigkeit $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$). Unter Oxidationsbeständigkeit versteht man die Fähigkeit eines Materials, Oxidationsreaktionen in einer oxidierenden Umgebung mit hohen Temperaturen zu widerstehen, was normalerweise durch Massenzunahme oder Oxidschichtdicke gekennzeichnet ist. Unter thermischer Ermüdung versteht man das Phänomen, dass Risse aufgrund von thermischer Spannung in wiederholten Hoch-Niedrigtemperatur-Zyklen entstehen und sich ausbreiten. Kriechen bezeichnet den Vorgang, bei dem ein Material unter hoher Temperatur und kontinuierlicher Spannung im Laufe der Zeit langsam eine irreversible plastische Verformung erfährt. Bei hohen Temperaturen oxidieren WC-Partikel und bilden bei $> 800\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ eine lose WO_3 -Schicht (Dicke $> 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), was zu Volumenausdehnung und Abblättern führt, während die Bindephase Co erweicht (die Härte sinkt auf $\text{HV} \sim 200 \pm 30$), wodurch die Gesamtfestigkeit des Materials abnimmt ($< 2000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$), was seine Betriebszuverlässigkeit ernsthaft beeinträchtigt. Um die Hochtemperaturleistung zu verbessern, ist es notwendig, die Hochtemperaturstabilität des Materials durch Additive (wie Cr_3C_2 $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), Mikrostrukturkontrolle (Korngröße $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und Oberflächenbeschichtung (Dicke $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) zu verbessern.

die Aspekte Oxidationsbeständigkeit ($800 - 1000\text{ °C}$), thermische Ermüdung und Kriechen, indem Thermodynamik (Gibbs-Freienergie $\Delta G < 0\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$), experimentelle Methoden (ASTM E1876), mikroskopische Analyse (XPS, SEM) und technische Fälle kombiniert werden. Beispielsweise hat WC10Co (Cr_3C_2 $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) eine Massenzunahme von $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ bei $1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ und einen thermischen Ermüdungsriss von $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, was den Anforderungen von Turbinenschaufeln für Flugzeuge entspricht.

8.2.1 Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall (800 - 1000°C)

8.2.1.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall

Die Oxidationsbeständigkeit ist durch die Massenzunahme bei hohen Temperaturen ($< 0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) gekennzeichnet. Dies ist die Grundlage für den Einsatz von Hartmetall in Luft- und Raumfahrttriebwerken ($> 1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) und Hochtemperaturformen ($> 900\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$). WC oxidiert bei $> 800\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$:



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Es entsteht eine lose WO_3 -Schicht (Dicke $>1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Dichte $7,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), die zu Gewichtszunahme und verringerter Festigkeit ($<2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) führt. Gleichzeitig wird Co zu Co_3O_4 oxidiert (Dicke $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), was die Erweichung weiter verschlimmert (die Härte sinkt auf $\text{HV}200 \pm 30$). Das Optimierungsziel ist die Bildung einer dichten Cr_2O_3 -Schutzschicht (Dicke $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Dichte $5,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), um die Sauerstoffdiffusion (Rate $<10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$) zu hemmen.

Der Oxidationsbeständigkeitstest wird in einem Muffelofen bei einer Temperatur von $800\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ in Luftumgebung mit einer Probengröße von $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und einer Massengenauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$ durchgeführt. Beispielsweise erhöht sich WC10Co nach Oxidation bei $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ für 100 ± 10 Stunden um $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Nach Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) verringert sich das Gewicht auf $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, und die Oxidationsbeständigkeit erhöht sich um $25 \% \pm 5 \%$. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Mechanismus, dem Test und der Optimierung und bietet umfassende Anleitungen durch die Kombination von Thermodynamik und mikroskopischer Analyse.

8.2.1.2 Oxidationsbeständigkeitsmechanismus und -analyse von Hartmetall

Die Oxidationsrate folgt einem parabolischen Gesetz:

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

Dabei ist k_p die Oxidationskonstante ($10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$) und t die Oxidationszeit (Genauigkeit $\pm 100 \text{ s}$). Der k_p -Wert von WC10Co bei $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt $10^{-11} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$, da WO_3 locker ist (Porosität $\sim 5 \% \pm 1 \%$) und die Sauerstoffdiffusionsrate hoch ist ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$). Durch Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) entsteht eine Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), k_p wird um $50 \% \pm 5 \%$ reduziert und die Sauerstoffdiffusionsrate aufgrund des dichten Cr_2O_3 (Porosität $< 1 \% \pm 0,2 \%$) auf $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ verringert. Die Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ verkürzt den Sauerstoffdiffusionsweg weiter (Korngränzendichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$), und die Gewichtszunahme wird um $20 \% \pm 5 \%$ reduziert.

Co erweicht bei $>900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Härte sinkt auf $\text{HV}200 \pm 30$) aufgrund der Bildung von Co_3O_4 (O 1s-Peak $530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, XPS bestätigt). Cr_3C_2 verbessert die Grenzflächenstabilität (Grenzflächenenergie $1,2 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) durch Cr-Diffusion (Konzentration $5 \% \pm 0,5 \%$) und hemmt das WO_3 -Wachstum (Dicke $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). Die SEM-Analyse zeigt, dass die Risse in der Oxidschicht (Breite $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) hauptsächlich entlang der Co-Phase verteilt sind und in der Cr_2O_3 -Schicht keine offensichtlichen Risse vorhanden sind. EDS überprüft die Gleichmäßigkeit von Cr_2O_3 (Cr:O $2:3 \pm 0,1$), wodurch das Substrat wirksam geschützt wird.

8.2.1.3 Analyse der Faktoren, die die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800\text{--}1.000 \text{ }^\circ\text{C}$) ist

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ein wichtiger Indikator für seine Betriebsleistung, die sich direkt auf seine Anwendungslebensdauer in den Bereichen Luftfahrtwerkzeuge, Hochtemperaturformen und Energieausrüstung auswirkt. Die Oxidationsbeständigkeit wird üblicherweise durch Massenzunahme, Oxidschichtdicke und kinetische Oxidationskonstante (k_p) charakterisiert, die wiederum von vielen Faktoren beeinflusst wird, einschließlich Temperatur, Cr_3C_2 -Gehalt, Korngröße, Co-Gehalt und Umgebungsfeuchtigkeit. Diese Faktoren bestimmen gemeinsam die Hochtemperatur-Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall, indem sie die Oxidationsreaktionsrate, die Eigenschaften der Oxidationsprodukte und die Stabilität der Materialmikrostruktur verändern. Ausgehend von den obigen Faktoren, kombiniert mit experimentellen Daten, thermodynamischen Analysen und tatsächlichen Fällen, werden im Folgenden ihr Einfluss auf die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall und seine Mechanismen detailliert erörtert.

(1) Einfluss der Temperatur

der wichtigste Faktor, der die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall beeinflusst, und der das thermodynamische und kinetische Verhalten der Oxidationsreaktion direkt bestimmt. Bei $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ reagieren WC-Partikel mit Sauerstoff zu WO_3 ($\text{WC} + 5/2\text{ O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$), und die Massenzunahme erhöht sich erheblich um etwa $50\% \pm 5\%$, von $0,3\text{ mg/cm}^2$ auf $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ bis hin zu $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$. Der Grund dafür ist, dass der Sauerstoffpartialdruck und die atomare Diffusionsrate bei hohen Temperaturen erheblich ansteigen und die Geschwindigkeitskonstante der Oxidationsreaktion (k_p) exponentiell mit der Temperatur ansteigt (gemäß der Arrhenius-Gleichung: $k_p = A \exp(-Q/RT)$, wobei Q die Aktivierungsenergie, R die Gaskonstante und T die absolute Temperatur ist). Bei $< 900\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ nimmt die Oxidationsrate deutlich ab und die Massenzunahme wird auf $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ oder weniger kontrolliert, was darauf hindeutet, dass die Sauerstoffdiffusion bei niedrigeren Temperaturen begrenzt ist, die WO_3 -Schicht langsam wächst (Dicke $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und die Schutzwirkung auf das Material schwächer, aber auch die Zerstörungskraft geringer ist.

(2) Einfluss des zusätzlichen Cr_3C_2 -Gehalts

von Chromkarbid (Cr_3C_2) ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall. Bei einem Cr_3C_2 -Gehalt von $0,5\% \pm 0,01\%$ sinkt die kinetische Oxidationskonstante (k_p) um etwa $50\% \pm 5\%$, von $10^{-9}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ auf $5 \times 10^{-10}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$. Dies liegt daran, dass Cr bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff reagiert und eine dichte Cr_2O_3 -Schicht (Dicke ca. $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) bildet, die eine langsame Wachstumsrate aufweist (niedrige k_p), wodurch die Sauerstoffdiffusion wirksam blockiert und die weitere Oxidation von WC und Co verhindert wird. Wenn der Cr_3C_2 -Gehalt jedoch $1\% \pm 0,01\%$ übersteigt, steigt der Anteil spröder Phasen (wie z. B. η -Phase, WC-Co-Cr-Verbundphase) im Material um etwa $10\% \pm 2\%$, was zu einer Verringerung der Bruchzähigkeit (K_{Ic}) um etwa $8\text{--}12\% \pm 2\%$ führt. Das Vorhandensein spröder Phasen kann bei hoher Temperaturbelastung Mikrorisse verursachen, die die Sauerstoffpermeationswege verlängern und die Oxidationsbeständigkeit schwächen. Daher muss die Zugabemenge genau kontrolliert werden, um ein Gleichgewicht zwischen Oxidationsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften zu erzielen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Einfluss der Wolframcarbid (WC)-Korngröße

Wolframkarbid (WC) beeinflusst die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall maßgeblich, indem es die Korngrenzendichte und den Sauerstoffdiffusionsweg beeinflusst. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Anzahl der Korngrenzen groß, der Sauerstoffdiffusionsweg ist verteilt, die Oxidschichtdicke ist gering ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und die Massenzunahme gering ($0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$). Feine Körner sorgen zudem für eine gleichmäßigere Co-Verteilung und reduzieren die lokale Oxidationskonzentration. Wenn die Korngröße jedoch auf $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ansteigt, verringert sich die Korngrenzendichte, die Sauerstoffdiffusion entlang der Korngrenzen wird zentralisiert, die Oxidschichtdicke erhöht sich auf $0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ und die Massenzunahme erhöht sich um etwa $20 \% \pm 5 \%$ auf $0,36 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Durch die größere Korngröße wird die WC-Co-Grenzfläche leichter freigelegt, und die Bildung und Ablösung von WO_3 an der Grenzfläche bei hohen Temperaturen wird intensiviert, was den Oxidationsprozess weiter beschleunigt.

(4) Einfluss des Kobaltgehalts (Co) in der Bindephase

Das Oxidationsverhalten der Kobaltbindungsphase (Co) bei hohen Temperaturen beeinflusst maßgeblich die Oxidationsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall. Bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ behält das Hartmetall bei $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ noch eine hohe Härte ($> \text{HV } 1000 \pm 30$), die Oxidationsbeständigkeit ist relativ stabil und die Gewichtszunahme beträgt etwa $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Wenn der Co-Gehalt jedoch auf $12 \% \pm 1 \%$ steigt, wird Co bei hohen Temperaturen zu Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$) oxidiert und seine lockere Struktur (Dicke etwa $0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$) kann die Sauerstoffdiffusion nicht wirksam verhindern, was zu einer Abnahme der Härte um etwa $30 \% \pm 5 \%$ von $\text{HV } 1200 \pm 30$ auf $\text{HV } 840 \pm 30$ und einer Zunahme der Massenzunahme auf $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ führt. Mit der Bildung von Co_3O_4 geht auch eine Volumenausdehnung einher (Dichteabfall von $8,9 \text{ g/cm}^3$ auf $6,1 \text{ g/cm}^3$), die zu Mikrorissen an der Oberfläche führt, Oxidation und Abplatzungen beschleunigt und die Hochtemperaturstabilität des Materials stark beeinträchtigt.

(5) Einfluss der Umgebungsfeuchtigkeit

Auch die Umgebungsfeuchtigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall. Bei einer Luftfeuchtigkeit von $> 50 \% \pm 5 \%$ nimmt Wasserdampf (H_2O) an der Oxidationsreaktion ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$) teil und erzeugt flüchtiges $\text{WO}_2(\text{OH})_2$, das das Wachstum und Ablösen der WO_3 -Schicht weiter beschleunigt, was zu einer Massenzunahme von etwa $10 \% \pm 2 \%$ führt, von $0,3 \text{ mg/cm}^2$ auf $0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ bis hin zu $0,33 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Wasserdampf fördert zudem die Oxidation von Co ($\text{Co} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$). Das entstehende $\text{Co}(\text{OH})_2$ zersetzt sich bei hohen Temperaturen zu Co_3O_4 , was die Ablösung des Oxidationsprodukts erschwert. In einer Umgebung mit geringer Luftfeuchtigkeit ($< 30 \% \pm 5 \%$) wird die Oxidation hauptsächlich durch Sauerstoff vorangetrieben, die WO_3 -Schicht wächst langsam, und die Gewichtszunahme verringert sich um etwa $5 \% \pm 1 \%$, was auf eine bessere Oxidationsbeständigkeit hinweist.

(6) Wechselwirkungen zwischen Faktoren

Die oben genannten Faktoren wirken nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oxidationsbeständigkeit durch komplexe Wechselwirkungen. Beispielsweise kann bei hohen Temperaturen ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) in Kombination mit einem hohen Co-Gehalt ($> 12\% \pm 1\%$) die Massenzunahme $0,6\text{ mg/cm}^2$ erreichen. $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ erhöht die Oxidschichtdicke auf $1,2 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ und übersteigt damit den Einfluss eines einzelnen Faktors bei weitem. Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) kann den negativen Effekt des hohen Co-Gehalts teilweise ausgleichen, aber bei hoher Luftfeuchtigkeit ($> 50\% \pm 5\%$) kann die Cr_2O_3 -Schicht aufgrund von Wasserdampferosion lokal versagen. Darüber hinaus weisen feine Körner ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) bei $< 900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit auf, bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann die Sauerstoffdiffusion an den Korngrenzen jedoch immer noch die lokale Oxidation verschlimmern, was auf die begrenzende Wirkung der Temperatur auf den Korngrenzenschutz hinweist.

(7) Umfassende Fallanalyse

Nehmen wir als Beispiel die Proben WC-12Co und WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$). Nach 100-stündiger Einwirkung von $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftatmosphäre (Luftfeuchtigkeit $50\% \pm 5\%$) beträgt die Massenzunahme von WC-12Co $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, die Dicke der Oxidschicht beträgt $1,1 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ und die Oberfläche blättert deutlich ab, was auf eine geringe Oxidationsbeständigkeit hinweist. Die Gewichtszunahme von WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$) beträgt nur $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, die Dicke der Oxidschicht beträgt $0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ und die Oxidationsbeständigkeit ist um ca. $40\% \pm 5\%$ verbessert. Eine Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass der Cr-Gehalt in der Cr_2O_3 -Schicht ca. $5\% \pm 0,5\%$ beträgt und die dichte Struktur die Diffusion von Sauerstoff und Wasserdampf wirksam hemmt und die Entstehung von WO_3 und Co_3O_4 verringert. Dank dieser Eigenschaften erfüllt es die Anforderungen an die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen von Turbinenschaufelwerkzeugen für die Luftfahrt (Betriebstemperatur $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Lebensdauer $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$).

(8) Oxidationsdynamik und Anwendungsbedeutung

Die dynamische Oxidationsanalyse zeigt, dass die Massenzunahme von Hartmetall bei hohen Temperaturen mit der Zeit einer parabolischen Funktion folgt ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), mit einer schnellen Oxidationsrate im Anfangsstadium ($< 10\text{ h}$), die sich dann aufgrund der Verdickung der Oxidschicht verlangsamt. Die Massenzunahme des optimierten WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$) bleibt nach langfristiger Einwirkung (1000 h) bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ immer noch bei $0,4\text{ mg/cm}^2$ kontrolliert und weist eine ausgezeichnete Hochtemperaturstabilität auf. Diese Eigenschaften führen zu einer breiten Anwendung in Luftfahrtwerkzeugen (Schneidtemperatur $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), Hochtemperaturformen (Formtemperatur $800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Energiegeräten (wie z. B. Gasturbinenschaufeln, Betriebstemperatur $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Durch eine systematische Analyse der Einflussfaktoren können wissenschaftliche Leitlinien zur Optimierung der Hochtemperaturoxidationsbeständigkeit von Hartmetall bereitgestellt werden.

Die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie Temperatur, Cr_3C_2 -Gehalt, Korngröße, Co-Gehalt und Luftfeuchtigkeit. Hohe Temperaturen, hoher Co-Gehalt, grobe Körner und hohe Luftfeuchtigkeit verstärken die Oxidation, während

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entsprechende Mengen an Cr_3C_2 und feinen Körnern die Oxidationsbeständigkeit deutlich verbessern. Umfassende Fallstudien zeigen, dass die Gewichtszunahme des optimierten Hartmetalls um $40\% \pm 5\%$ und die Dicke der Oxidschicht um $50\% \pm 5\%$ reduziert wird. Dies bietet eine zuverlässige Garantie für Anwendungen in Hochtemperaturbereichen wie der Luftfahrt und Energie.

8.2.1.4 Strategie zur Optimierung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall

Um die gewünschte Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall bei hohen Temperaturen (800–1000 °C), d. h. eine Gewichtszunahme von $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, zu erreichen, muss dessen antioxidative Kapazität durch umfassende Optimierung von Additiven, Mikrostruktur, Sinterprozess, Oberflächenbehandlung und Prüfspezifikationen systematisch verbessert werden. Diese Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, eine dichte Schutzschicht zu bilden, Sauerstoffdiffusionswege zu reduzieren, die Materialdichte und Oberflächenstabilität zu verbessern und den Optimierungseffekt durch wissenschaftliche Tests zu verifizieren. Ausgehend von den oben genannten Schlüsselaspekten, kombiniert mit experimentellen Daten, thermodynamischen Analysen und praktischen Anwendungsfällen, werden im Folgenden die Optimierungsstrategie und ihre Rolle bei der Kontrolle des Oxidationsverhaltens detailliert beschrieben.

(1) Chromkarbid- Zusatz (Cr_3C_2)

von Chromkarbid (Cr_3C_2) ist die wichtigste Strategie zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall. Die empfohlene Zugabemenge beträgt $0,5\% \pm 0,01\%$. Beim Hochtemperaturesintern und im Betrieb reagiert Cr mit Sauerstoff und bildet eine dichte Cr_2O_3 - Schutzschicht (Dicke ca. $0,2\text{--}0,3 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$). Die Cr_2O_3 -Schicht weist einen extrem niedrigen Sauerstoffdiffusionskoeffizienten ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$) auf, der das Eindringen von Sauerstoff wirksam blockiert und die kinetische Konstante der Oxidation (k_p) um etwa $50\% \pm 5\%$ von $10^{-9} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ auf $5 \times 10^{-10} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ reduziert. Die Bildung der Cr_2O_3 - Schicht verhindert außerdem die Oxidation von WC zu loseem WO_3 ($\text{WC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$) und die Oxidation von Co zu Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$), wodurch die Gewichtszunahme deutlich verringert wird. Am Beispiel von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) beträgt die Gewichtszunahme nach Oxidation bei $1000 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ über 100 Stunden nur $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, was im Vergleich zur Probe ohne Cr_3C_2 -Zugabe (Gewichtszunahme von $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) eine Verringerung um $40\% \pm 5\%$ darstellt, was seine hervorragende antioxidative Schutzwirkung bestätigt.

(2) Mikrostruktur

Die Kontrolle der Mikrostruktur verringert die Sauerstoffdiffusionswege und die Oxidationsempfindlichkeit durch Optimierung der WC-Korngröße und des Co-Gehalts. Die empfohlene WC-Korngröße beträgt $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und der Co-Gehalt wird auf $8\text{--}10\% \pm 1\%$ kontrolliert. Feine Körner erhöhen die Korngrenzendichte, verteilen die Sauerstoffdiffusionswege, verringern die Konzentration lokaler Oxidation und reduzieren die freiliegende Fläche der WC-Co-Grenzfläche, wodurch die Bildung von WO_3 an der Grenzfläche verhindert wird. Ein niedriger Co-Gehalt (Ziel $< 10\% \pm 1\%$) verringert die Oxidationsneigung von Co bei hohen Temperaturen (die Menge der Co_3O_4 -Bildung wird um etwa $30\% \pm 5\%$ reduziert), wodurch die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturstabilität des Materials erhalten bleibt. Am Beispiel von WC-10Co mit optimierter Mikrostruktur verringerte sich nach 100-stündiger Oxidation bei $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Oxidschichtdicke von $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ auf $0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, die Massenzunahme von $0,4\text{ mg/cm}^2$ über $0,6\text{ mg/cm}^2$ und von $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ auf $0,25\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$. Die Oxidationsbeständigkeit verbesserte sich um ca. $37\% \pm 5\%$. Die Feinkörnigkeit erhöht zudem die Härte des Materials ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) und sichert so dessen mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen.

(3) Hartmetall-Sinterprozess

Die Optimierung des Sinterprozesses wirkt sich direkt auf die Kompaktheit und Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall aus. Die empfohlene Sintertemperatur beträgt $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zur Verringerung der Oxidation wird ein Vakuum oder eine inerte Atmosphäre (wie Argon) verwendet, um sicherzustellen, dass die Materialdichte $99,5\% \pm 0,1\%$ erreicht und die Porosität unter $0,1\% \pm 0,02\%$ gehalten wird. Materialien mit hoher Dichte reduzieren innere Poren und Mikrorisse, begrenzen den Diffusionsweg von Sauerstoff im Material und verhindern so tiefe Oxidationsreaktionen. Eine präzise Kontrolle der Sintertemperatur ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) gewährleistet außerdem eine gleichmäßige Co-Verteilung (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und verhindert so eine bevorzugte Oxidation lokaler Co-reicher Bereiche. Am Beispiel des optimierten gesinterten WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) zeigt sich nach einer Oxidation bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ über 100 Stunden eine Massenzunahme von $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ und eine Oxidschichtdicke von nur $0,4 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. Im Vergleich zur nicht optimierten Probe (Dichte $98,5\% \pm 0,1\%$, Gewichtszunahme $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) ist eine höhere antioxidative Stabilität erkennbar.

(4) Oberflächenbehandlung

Die Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit ist ein wichtiges Mittel, um Risse in der Oxidschicht zu reduzieren und die Oxidationsbeständigkeit zu verbessern. Es wird empfohlen, die Oberflächenrauheit (R_a) durch Präzisionspolieren auf unter $0,05 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ zu halten. Dieser Prozess kann das Auftreten von Rissen in der Oxidschicht um etwa $20\% \pm 5\%$ reduzieren. Die Oberfläche mit geringer Rauheit verringert Mikrodefekte (wie Kratzer und Löcher), begrenzt die Sauerstoffansammlung auf der Oberfläche und das Auftreten lokaler Oxidationsreaktionen und verringert die Spannungskonzentration der Oxidschicht bei hohen Temperaturen, wodurch Abblättern und Rissausbreitung vermieden werden. Zusätzlich kann nach dem Polieren eine Ultraschallreinigung ($40\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$) durchgeführt werden, um Oberflächenverunreinigungen ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) zu entfernen und die Oberflächenintegrität weiter zu verbessern. Am Beispiel von poliertem WC-10Co verringerte sich nach einer Oxidation bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ über 100 Stunden die Dicke der Oxidschicht von $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ auf $0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, die Massenzunahme betrug von $0,35\text{ mg/cm}^2$ über $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ auf $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, die Länge der Oberflächenrisse verringerte sich von $0,2\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ auf $0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, was eine deutliche Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit zeigt.

(5) Prüfvorschriften

Um die Optimierungswirkung der antioxidativen Eigenschaften genau zu bewerten und zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

überprüfen, wird empfohlen, einen Oxidationstest bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ über 100 ± 10 Stunden durchzuführen. Die Massenmessung erfolgt mit einer Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01\text{ mg}$, um die Zuverlässigkeit der Massenzunahmedaten zu gewährleisten. Nach dem Test wurde die Bildung der Cr_2O_3 -Schutzschicht durch Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) überprüft. Der charakteristische Cr3p-Peak liegt bei $577\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$, was darauf hinweist, dass Cr in Form von Cr_2O_3 vorliegt, und der O1s-Peak ($530\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) bestätigt zusätzlich die chemische Zusammensetzung der Oxidschicht. Zusätzlich kann die Morphologie der Oxidschicht mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM, Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) beobachtet sowie die Dicke (Ziel $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und Rissverteilung (Ziellänge $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) gemessen werden. Dieses Prüfprotokoll gewährleistet eine umfassende Bewertung der antioxidativen Leistung und liefert eine wissenschaftliche Grundlage für die Umsetzung von Optimierungsstrategien.

(6) Umfassende Fallanalyse

der Probe WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) beträgt die Massenzunahme nach Oxidation bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ über 100 Stunden lediglich $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, die Oxidschichtdicke $0,4 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, die Härte bleibt bei $> \text{HV } 1200 \pm 30$. Im Vergleich mit nicht optimiertem WC-12Co (Gewichtszunahme $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, Härte reduziert auf $\text{HV } 840 \pm 30$) ist die Oxidationsbeständigkeit um etwa $40\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ verbessert. Die XPS-Analyse bestätigte, dass sich der Cr3p-Peak in der Cr_2O_3 -Schicht bei $577\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$ befand, der Cr-Gehalt etwa $5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$ betrug und seine dichte Struktur die Sauerstoffdiffusion wirksam hemmte. Die SEM-Beobachtung zeigte, dass die Risslänge auf der Oberfläche der Oxidschicht $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ betrug, was darauf hindeutet, dass die optimierte Oberflächenbehandlung und Mikrostruktur die Hochtemperaturstabilität deutlich verbesserten. Diese Leistung erfüllt die Anforderungen von Hochtemperaturformen (Betriebstemperatur $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Anzahl der Zyklen $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$), und die Lebensdauer wird auf $1,5 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$ verlängert, was besser ist als das $8 \times 10^4\text{-mal} \pm 10^4\text{-fache}$ von nicht optimierten Materialien.

(7) Oxidationsdynamik und Anwendungsrelevanz

Die oxidationsdynamische Analyse zeigt, dass die Gewichtszunahme des optimierten Hartmetalls bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit der Zeit eine parabolische Funktion aufweist ($\Delta W^2 = k_{\text{pt}}$), mit einer schnellen Gewichtszunahmerate ($0,1\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h}$) im Anfangsstadium ($< 10\text{ h}$), die sich dann aufgrund der Verdickung der Cr_2O_3 -Schicht ($< 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,001\text{ mg/cm}^2/\text{h}$) verlangsamt. Nach 1000 Stunden Langzeitoxidation liegt die Gewichtszunahme immer noch unter Kontrolle bei $0,4\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ und weist damit eine ausgezeichnete Hochtemperaturstabilität auf. Das optimierte Hartmetall hat breite Anwendungsmöglichkeiten in Luftfahrtwerkzeugen (Schneidtemperatur $900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Lebensdauer $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$), Hochtemperaturformen (Formtemperatur $800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Energiegeräten (wie Gasturbinenschaufeln, Betriebstemperatur $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, Lebensdauer $> 10^4\text{ Stunden} \pm 10^3\text{ Stunden}$) und seine jährlichen Wartungskosten werden um etwa $30\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ reduziert, was erhebliche wirtschaftliche Vorteile darstellt.

(8) Anpassungsfähigkeit an die Umwelt und Zukunftsaussichten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das optimierte Hartmetall ist zudem sehr anpassungsfähig an Umweltbedingungen. Selbst in Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit ($> 50 \% \pm 5 \%$) kann die Cr_2O_3 -Schicht die durch Wasserdampf beschleunigte Oxidation wirksam hemmen (Gewichtszunahme $< 5 \% \pm 1 \%$) und eignet sich für heiße und feuchte Umgebungen mit hohen Temperaturen (z. B. tropische Schiffsgasturbinen). In schwefelhaltiger (SO_2) Atmosphäre erhöht die Anti-Schwefelungswirkung der Cr_2O_3 -Schicht ihre Massenzunahme nur um etwa $10 \% \pm 2 \%$ und erfüllt damit die Anforderungen schwefelhaltiger Energieanlagen. In Zukunft kann die Oxidationsbeständigkeit durch die Einführung von Mehrlagenbeschichtungen (wie $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, Dicke $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) oder neuen Additiven (wie TaC, VC) weiter verbessert werden, um anspruchsvolleren Hochtemperaturanwendungen gerecht zu werden (wie Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken, Betriebstemperatur 1100°C).

Die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall wird durch Cr_3C_2 -Zugabe ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), Mikrostrukturkontrolle (WC-Korn $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8\text{--}10 \% \pm 1 \%$), Sinterprozess ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$), Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Prüfspezifikationen ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, XPS-Nachweis von Cr_2O_3) erreicht. Diese Strategien wirken zusammen, um die Massenzunahme auf $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ zu reduzieren und die Härte $> \text{HV } 1200 \pm 30$ zu halten, wodurch die Anwendungsanforderungen in Hochtemperaturformen, Luftfahrtwerkzeugen und anderen Bereichen erfüllt werden.

8.2.1.5 Technische Anwendungen der Antioxidationseigenschaften von Hartmetall

Durch die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit wurde die Leistung von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800\text{--}1.000^\circ\text{C}$) deutlich verbessert, sodass es in technischen Anwendungen in den Bereichen Luftfahrt, Formenbau und Energie hervorragende Leistung und Zuverlässigkeit zeigt. Durch die umfassende Optimierung von Additiven (wie Cr_3C_2), der Mikrostrukturregulierung, der Oberflächenbehandlung und des Sinterprozesses wurde die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall deutlich verbessert, die Gewichtszunahme reduziert und die Stabilität der Oxidschicht erhöht, wodurch die Lebensdauer verlängert und die Arbeitseffizienz verbessert wurde. Ausgehend von den drei Hauptanwendungsbereichen Luftfahrtwerkzeuge, Hochtemperaturformen und Gasturbinenkomponenten werden die technischen Anwendungs- und Leistungsvorteile von optimiertem Hartmetall anhand spezifischer Daten, mikroskopischer Analysen und tatsächlicher Fälle detailliert erörtert.

(1) Hartmetall-Flugzeugwerkzeuge

Beim Hochtemperaturschneiden müssen Luftfahrtwerkzeuge (wie Titanlegierungen und Nickelbasislegierungen) extremen Umgebungen von $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ standhalten, was extrem hohe Anforderungen an die Oxidationsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit der Materialien stellt. Das optimierte Hartmetall WC-10Co (mit $0,5 \% \pm 0,01 \%$ Cr_3C_2 , Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weist nach einer Oxidation bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ über 100 Stunden eine Massenzunahme von lediglich $0,3 \text{ mg/cm}^2$ auf $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, die Dicke der WO_3 -Oxidschicht wird auf $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ kontrolliert, was deutlich niedriger ist als beim nicht optimierten WC-12Co (Gewichtszunahme $0,5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, WO_3 -Dicke $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). Die Cr_2O_3 -Schutzschicht (Dicke ca. $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) hemmt wirksam die Sauerstoffdiffusion und die feinen Körner verringern die Co-Freilegungsfläche ($< 10 \% \pm 1 \%$), wodurch die Härte ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) und Schneidleistung erhalten bleiben. In der Praxis beträgt die Lebensdauer von Werkzeugen aus diesem Material mehr als 5.000 ± 500 Stunden, was etwa $67 \% \pm 5 \%$ mehr ist als die nicht optimierten 3.000 ± 300 Stunden. Bei der Bearbeitung von Flugzeugtriebwerksschaufeln reduziert die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit des Werkzeugs die Verschleißrate um etwa $40 \% \pm 5 \%$, was die Produktionseffizienz und die Komponentenqualität deutlich verbessert.

(2) Hartlegierungs-Hochtemperaturform

Hochtemperaturformen (wie Warm Schmiedeformen und Druckgussformen) müssen wiederholten thermischen Zyklen und mechanischer Belastung unter Arbeitsbedingungen von $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ standhalten und stellen extrem hohe Anforderungen an die Oxidationsbeständigkeit und Härtestabilität des Materials. Nachdem das optimierte WC-8Co-Hartmetall (Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) 100 Stunden lang bei $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ oxidiert wurde, beträgt die Gewichtszunahme nur $0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, die Oxidschichtdicke $< 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, die Härte bleibt bei $> \text{HV } 1300 \pm 30$, besser als beim nicht optimierten WC-10Co (Gewichtszunahme $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, Härte reduziert auf $\text{HV } 1000 \pm 30$). Die geringe Rauheit der Oberfläche reduziert Oxidschichtrisse (Länge $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und verhindert in Kombination mit dem niedrigen Co-Gehalt ($8 \% \pm 1 \%$) und der optimierten Sinterung (Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) wirksam die Co-Erweichung und das WO_3 -Ablösen. In der Praxis beträgt der Servicezyklus von Hochtemperaturformen aus diesem Material mehr als $10^5 \pm 10^4$, was etwa $60 \% \pm 5 \%$ mehr ist als der nicht optimierte Wert von $6 \times 10^4 \pm 10^4$. Beim Warm Schmieden von Automobilteilen verlängert die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit der Form die Lebensdauer um etwa $50 \% \pm 5 \%$, wodurch die Austauschhäufigkeit und Produktionsausfallzeiten reduziert werden.

(3) Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

Gasturbinenkomponenten (wie Schaufeln und Brennkammerauskleidungen) müssen lange Zeit in einer Hochtemperatur-Oxidationsumgebung von $950 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben werden, was extrem hohe Anforderungen an die Oxidationsbeständigkeit und strukturelle Integrität des Materials stellt. Das optimierte Hartmetall WC-10Co (mit $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{ Cr}_3\text{C}_2$) weist nach 100-stündiger Oxidation bei $950 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Massenzunahme von lediglich $0,25 \text{ mg/cm}^2$ auf. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, Risslänge in der Oxidschicht $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, viel niedriger als bei nicht optimiertem WC-12Co (Gewichtszunahme $0,45 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, Risslänge $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Die Cr_2O_3 -Schicht (Cr-Gehalt etwa $5 \% \pm 0,5 \%$) und die Feinkörner ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verhindern gemeinsam die Bildung von WO_3 und Co_3O_4 und erhalten so die Festigkeit ($> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und Stabilität des Materials. In der Praxis beträgt die Lebensdauer von Gasturbinenkomponenten aus diesem Material mehr als $10^4 \pm 10^3$ Stunden und erfüllt damit die Anforderungen an den Langzeitbetrieb von Energieanlagen (wie z. B. Industriegasturbinen). Damit ist sie besser als die nicht optimierten $6 \times 10^3 \pm 10^3$ Stunden. In Kraftwerken reduziert die optimierte Oxidationsbeständigkeit der Komponenten die Heißkorrosionsrate um etwa $45 \% \pm 5 \%$, verbessert die Betriebseffizienz der Anlagen und senkt die Wartungskosten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Technischer Wert der Optimierung antioxidativer Eigenschaften

von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen. Durch Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), Kontrolle der Mikrostruktur (Korn $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8-10 \% \pm 1 \%$), Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Verbesserung des Sinterprozesses ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$) konnte die Massenzunahme des Hartmetalls von $0,4-0,5 \text{ mg/cm}^2$ auf $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ bis hinunter auf $0,2-0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ erhöht, die Dicke der Oxidschicht um $40-50 \% \pm 5 \%$ reduziert und die Härte bei $> \text{HV } 1200 \pm 30$ gehalten werden. Leistungsverbesserungen verlängern nicht nur die Lebensdauer (z. B. bei Flugzeugwerkzeugen > 5000 Stunden ± 500 Stunden, bei Hochtemperaturformen $> 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal, bei Gasturbinenkomponenten $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden), sondern senken auch die Wartungshäufigkeit und die Austauschkosten. Beispielsweise verringern sich die jährlichen Wartungskosten für Flugzeugwerkzeuge um etwa $35 \% \pm 5 \%$, der Austauschzyklus für Hochtemperaturformen verlängert sich um $50 \% \pm 5 \%$ und die Betriebseffizienz von Gasturbinenkomponenten verbessert sich um etwa $20 \% \pm 3 \%$, was die optimierten wirtschaftlichen Vorteile widerspiegelt.

(5) Umweltanpassungsfähigkeit und Anwendungserweiterung

Das optimierte Hartmetall ist sehr anpassungsfähig und bewältigt dadurch auch komplexere thermische Oxidationsbedingungen. Beispielsweise kann die Cr_2O_3 -Schicht in einer Hochtemperaturumgebung mit Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit $> 50 \% \pm 5 \%$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) die Massenzunahme auf $0,35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ begrenzen, was für heiße und feuchte Umgebungen in der Luft- und Raumfahrt geeignet ist. In einer schwefelhaltigen (SO_2) Atmosphäre erhöht die optimierte Anti-Schwefelungs-Eigenschaft der Probe die Massenzunahme nur um etwa $10 \% \pm 2 \%$ und erfüllt damit die Betriebsanforderungen schwefelhaltiger Energieanlagen. Darüber hinaus kann unter extremen Bedingungen höherer Temperaturen ($1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) in Kombination mit Mehrlagenbeschichtungen (wie etwa $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, Dicke $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) die Gewichtszunahme weiter auf $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ reduziert werden, wodurch das Anwendungspotenzial in Luft- und Raumfahrttriebwerken und Industrieöfen der nächsten Generation erweitert wird.

(6) Umfassende Fälle und Zukunftsaussichten

Am Beispiel von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) beträgt die Massenzunahme nach Oxidation bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ über 100 Stunden $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, WO_3 -Dicke $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte $> \text{HV } 1300 \pm 30$ bei $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Betriebszyklen $> 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal; Oxidschichttriss $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ bei $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Lebensdauer $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden. Diese Daten zeigen, dass das optimierte Hartmetall eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit und Langzeitstabilität in Luftfahrtwerkzeugen, Hochtemperaturformen und Gasturbinenkomponenten aufweist, mit einer Erhöhung der Lebensdauer um $67 \% \pm 5 \%$, $60 \% \pm 5 \%$ bzw. $67 \% \pm 5 \%$. In Zukunft kann die Oxidationsbeständigkeit des Materials in Umgebungen mit ultrahohen Temperaturen ($> 1100^\circ\text{C}$) durch die Einführung neuer Additive (wie TaC, VC) oder die Entwicklung funktionaler Gradientenbeschichtungen weiter verbessert werden, um den Anforderungen der nächsten Generation von Luft- und Raumfahrt- und Energiegeräten gerecht zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden.

(7) Dynamische Leistung und wirtschaftliche Vorteile

Dynamische Oxidationstests zeigen, dass die Gewichtszunahme des optimierten Hartmetalls bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Laufe der Zeit einem parabolischen Muster folgt ($\Delta W^2 = k_{pt}$), mit einer anfänglichen Gewichtszunahmerate von etwa $0,1\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h}$ ($< 10\text{ h}$), die sich dann aufgrund der Verdickung der Cr_2O_3 -Schicht auf $< 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,001\text{ mg/cm}^2/\text{h}$ verlangsamt. Nach 1000 Stunden Langzeitbelastung liegt die Gewichtszunahme immer noch bei $0,4\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, was die Stabilität in einer Umgebung mit dynamischer thermischer Oxidation bestätigt. Diese Leistungsverbesserung verlängert nicht nur die Lebensdauer der Ausrüstung, sondern reduziert auch die Betriebskosten erheblich. So werden beispielsweise die jährlichen Wartungskosten für Luftfahrtwerkzeuge um etwa $35\% \pm 5\%$ gesenkt, der Austauschzyklus für Hochtemperaturformen um $50\% \pm 5\%$ verlängert und die Betriebseffizienz von Gasturbinenkomponenten um etwa $20\% \pm 3\%$ verbessert, was den wirtschaftlichen Wert der Optimierung widerspiegelt.

Die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit verbessert die Zuverlässigkeit von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen erheblich. Optimierte Formulierungen wie WC-10Co und WC-8Co haben eine gute Massenzunahme ($0,2\text{--}0,3\text{ mg/cm}^2$) in Luft- und Raumfahrtwerkzeugen, Hochtemperaturformen und Gasturbinenkomponenten gezeigt ($\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), Oxidschichtdicke ($< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und Lebensdauer ($> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$, $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$, $> 10^4\text{ Stunden} \pm 10^3\text{ Stunden}$) sind allesamt besser als bei herkömmlichen Materialien. Diese Anwendungsfälle beweisen deutlich, dass die Optimierung der Oxidationsbeständigkeit eine Schlüsselstrategie zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und der wirtschaftlichen Vorteile von Hartmetall in technischen Hochtemperaturanwendungen ist.

8.2.2 Thermische Ermüdung und Kriechen von Hartmetall

8.2.2.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien der thermischen Ermüdung und des Kriechens von Hartmetall

Thermische Ermüdung und Kriechverhalten von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) sind wichtige begrenzende Faktoren für seine Betriebsleistung und wirken sich direkt auf seine Zuverlässigkeit in anspruchsvollen Anwendungen aus, wie z. B. in Flugzeugturbinen (Betriebslebensdauer $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$) und Hochtemperaturformen (Zyklenzahl $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$). Unter thermischer Ermüdung versteht man den Prozess der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen durch zyklische thermische Spannungen ($> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), die durch den Unterschied im Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ und $13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ für WC und Co) während wiederholter Hochtemperatur-Niedrigtemperatur-Zyklen ($\Delta T\ 500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) verursacht werden. Die Rissausdehnungslänge muss auf $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ kontrolliert werden, um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten. **Kriechen** ist die langsame, irreversible plastische Verformung eines Materials bei hohen Temperaturen ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Dauerbelastung ($> 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) im Laufe der Zeit mit einer **Dehnungsrate** von $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, um ein

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Versagen zu vermeiden. Thermische Ermüdung wird hauptsächlich durch thermische Spannungskonzentration an der WC-Co-Grenzfläche verursacht, während das Kriechen durch plastische Verformung verstärkt wird, die durch die Erweichung der Co-Phase bei hohen Temperaturen (Härte sinkt auf $HV\ 200 \pm 30$) und Korngrenzengleiten verursacht wird. Zur Verbesserung der Leistung muss die Hochtemperaturstabilität von Hartmetall durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit (Ziel $> 80\ W/m\cdot K \pm 5\ W/m\cdot K$), Verbesserung der Korngrenzenfestigkeit (Ziel $> 200\ MPa \pm 20\ MPa$) und Verbesserung der Kriechfestigkeit optimiert werden.

8.2.2.2 Thermische Ermüdung und Kriechmechanismus sowie Analyse von Hartmetall

Thermische Ermüdung und Kriechverhalten von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800\text{--}1000\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) sind die häufigsten Ausfallarten unter anspruchsvollen Arbeitsbedingungen, wie sie beispielsweise in der Luftfahrt, im Formenbau und in der Energietechnik auftreten. Thermische Ermüdung äußert sich in Rissbildung und -ausbreitung durch zyklische thermische Belastung, während sich Kriechen als plastische Verformung unter dauerhafter Hochtemperaturbelastung äußert. Ein tiefes Verständnis dieser beiden Ausfallmechanismen ist entscheidend für die Optimierung des Hochtemperaturverhaltens von Hartmetall. Ausgehend von den Mechanismen der thermischen Ermüdung und des Kriechens, kombiniert mit Bruchmechanik, Thermodynamik, Mikroanalyse und experimentellen Daten, werden der Ausfallprozess, die Einflussfaktoren und die Optimierungseffekte systematisch diskutiert.

(1) Thermischer Ermüdungsmechanismus und Analyse

Thermische Ermüdung ist eine Ausfallart von Hartmetall, die durch thermische Spannung ($> 500\ MPa \pm 50\ MPa$) während Hochtemperatur-Niedrigtemperatur-Zyklen ($\Delta T\ 500\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) verursacht wird. Die thermische Spannung entsteht durch den Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen WC- und Co-Phasen ($5,2 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ für WC und $13 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ für Co). $\sigma = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$ Der Elastizitätsmodul von Hartmetall ($E \approx 600\ GPa \pm 50\ GPa$) und der Temperaturunterschied ($\Delta T = 500\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) können mit der folgenden Formel berechnet werden. Die thermische Spannung kann $500\text{--}600\ MPa \pm 50\ MPa$ erreichen, was die Bindungsstärke der WC-Co-Grenzfläche (ca. $300\ MPa \pm 30\ MPa$) bei weitem übersteigt, was zur Rissbildung an der Grenzfläche führt.

Das Wachstum von thermischen Ermüdungsrissen folgt dem Pariser Gesetz:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Dabei ist da/dN die Risswachstumsrate (mm/Zyklus), ΔK die Amplitude des Spannungsintensitätsfaktors ($< 20\ MPa\cdot m^{1/2} \pm 1\ MPa\cdot m^{1/2}$), C die Materialkonstante ($10^{-10} \pm 10^{-11}$) und m der Risswachstumsindex ($3,5 \pm 0,1$). Bei WC-10Co beträgt die nicht optimierte Risswachstumsrate etwa $2 \times 10^{-7}\ mm/Zyklus \pm 10^{-8}\ mm/Zyklus$, während sie nach Optimierung der Korngröße auf $0,5\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$ auf $< 10^{-7}\ mm/Zyklus \pm 10^{-8}\ mm/Zyklus$ sinkt, was einer Abnahme von etwa $50\ \% \pm 5\ \%$ entspricht. Feine Körner erhöhen die Dichte der Korngrenzen, behindern das Risswachstum und Risse werden an Korngrenzen abgelenkt (Ablenkwinkel $30^\circ \pm 5^\circ$), wodurch der Rissverlauf verlängert und der Spannungskonzentrationsfaktor reduziert wird (K_t sinkt von $2,5 \pm 0,1$ auf $< 2 \pm 0,1$). Darüber hinaus verursacht ein Co-Gehalt von $10\ \% \pm 1\ \%$ eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

leichte plastische Verformung (Dehnung $0,1 \% \pm 0,01 \%$) bei $> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, wodurch die thermische Spannungskonzentration teilweise abgebaut und die Rissbildung verlangsamt wird.

Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) verbessert die thermische Ermüdungsbeständigkeit weiter. Cr_3C_2 bildet bei hohen Temperaturen eine Cr_2O_3 - Schicht (Dicke $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) und erhöht gleichzeitig die Korngrenzenfestigkeit (von $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ auf $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) und reduziert die Risswachstumsrate um etwa $40 \% \pm 5 \%$, von $2 \times 10^{-7} \text{ mm /Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ auf $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zeigten, dass es sich bei den thermischen Ermüdungsrissen hauptsächlich um intergranulare Brüche mit einer Rissbreite von ca. $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ handelte . Die Risse in den nicht optimierten Proben verliefen entlang der WC- Co -Grenzfläche. Nach Zugabe von Cr_3C_2 wurde die Rissauslenkung deutlicher und der Rissverlauf um ca. $30 \% \pm 5 \%$ verlängert. Dies deutet darauf hin, dass die Korngrenzenverstärkung die Rissausbreitung wirksam hemmte.

(2) Kriechmechanismus und Analyse

Kriechen ist die Hauptversagensart von Hartmetall bei hohen Temperaturen ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) und Dauerbelastung ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), und die Dehnungsrate wird durch die Norton-Gleichung beschrieben:

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Dabei ist $\dot{\varepsilon}$ die stationäre Kriechdehnungsrate (s^{-1}), A die Materialkonstante, σ die Spannung ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), n der Spannungsexponent ($3 \pm 0,1$), Q die Aktivierungsenergie ($300 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), R die Gaskonstante ($8,314 \text{ J/ mol} \cdot \text{K}$) und T die absolute Temperatur (1273 K). Für WC-10Co beträgt die nicht optimierte Dehnungsrate $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ bei $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, die hauptsächlich durch die Erweichung der Co-Phase und das Gleiten an den Korngrenzen bedingt ist. Die Härte von Co sinkt bei $> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ auf $\text{HV } 200 \pm 30$, begleitet von Korngrenzengleiten und Leerstellendiffusion, was zu einer Ansammlung plastischer Verformungen führt.

Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) verbessert die Kriechfestigkeit deutlich. Cr_3C_2 senkt die Aktivierungsenergie Q auf $250 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$ und verringert die Kriechdehnungsrate um etwa $40 \% \pm 5 \%$, von $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ auf $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Cr_3C_2 verbessert die Gleitfestigkeit der Korngrenzen durch Mischkristallverfestigung und Korngrenzenfixierung (die Korngrenzenfestigkeit steigt von $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ auf $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) und verringert gleichzeitig die Hochtemperaturerweichung der Co-Phase. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Breite des Gleitbandes der Co-Phase während des Kriechens etwa $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ beträgt. Das Gleitband der nicht optimierten Probe ist kontinuierlich entlang der Korngrenze verteilt. Nach Zugabe von Cr_3C_2 ist die Gleitbandverteilung feiner gestreut und die Breite verringert sich auf $0,3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, was darauf hindeutet, dass Cr_3C_2 das Korngrenzengleiten wirksam hemmt.

(3) Mikroskopische Analyse und Verifizierung

Energiedispersive Spektroskopie (EDS) bestätigte die verstärkende Wirkung von Cr_3C_2 zusätzlich .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Cr-Gehalt an der Korngrenze beträgt etwa $5 \% \pm 0,5 \%$ und ist gleichmäßig an der WC-Co-Grenzfläche verteilt. Dadurch entsteht ein Cr-reicher Bereich, der die Rutschfestigkeit und Rissausbreitungsfestigkeit der Grenzfläche verbessert. Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass der charakteristische Peak von Cr3p bei $577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$ liegt. Dies bestätigt das Vorhandensein von Cr_2O_3 , das die Oxidationsbeständigkeit der Korngrenze bei hohen Temperaturen weiter verbessert und indirekt die Wärmeermüdungs- und Kriechfestigkeit unterstützt. SEM-Bilder zeigen auch, dass die thermischen Ermüdungsrisse der nicht optimierten Proben in einer geraden Linie entlang der Korngrenze verlaufen, während der Rissverlauf nach der Optimierung gewundener ist und der Ablenkwinkel von $20^\circ \pm 5^\circ$ auf $30^\circ \pm 5^\circ$ zunimmt, was die Verbesserung der Korngrenzenbarriere bestätigt.

Am Beispiel von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) beträgt die Risslänge im Thermoschocktest ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ bis $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500-mal $\pm$ 50-mal) $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und die Risswachstumsrate liegt bei $< 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ und ist damit $40 \% \pm 5 \%$ niedriger als die nicht optimierten $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Im Kriechtest ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, 100 Stunden) liegt die Dehnungsrate bei $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, im Vergleich zu 10^{-6} s^{-1} ohne Optimierung $\pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, eine Reduzierung um $40 \% \pm 5 \%$. Diese Verbesserungen ermöglichen hervorragende Leistungen bei der Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt (Lebensdauer > 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden) und Hochtemperaturformen (Betriebsdauer $> 1,5 \times 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal).

Die thermischen Ermüdungs- und Kriechmechanismen von Hartmetall sind hauptsächlich Rissausbreitung bzw. Co-Phasengleitverhalten. Die Rissausbreitung durch thermische Ermüdung folgt dem Pariser Gesetz. Feine Körner ($0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) verringern die Risswachstumsrate durch Korngrenzenhemmung und -verfestigung um $40 \% \pm 5 \%$. Die Kriechdehnungsrate wird durch die Norton-Gleichung gesteuert. Cr_3C_2 verringert die Aktivierungsenergie und das Korngrenzengleiten, wodurch die Dehnungsrate um $40 \% \pm 5 \%$ sinkt. SEM- und EDS-Analysen bestätigten die Rolle der Korngrenzenverfestigung und der Gleithemmung und lieferten theoretische Unterstützung für die Optimierung des Hochtemperaturverhaltens.

8.2.2.3 Faktoren, die die thermische Ermüdung und das Kriechen von Hartmetall beeinflussen, und ihre Kopplungseffekte

Die thermische Ermüdung und das Kriechverhalten von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800 - 1.000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) werden durch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren beeinflusst, darunter Korngröße, Co-Gehalt, Cr_3C_2 - Zugabe, Temperaturunterschied und Wärmeleitfähigkeit. Diese Faktoren bestimmen gemeinsam die Risswachstumsrate und die Kriechdehnungsrate, indem sie die thermische Spannungsverteilung, die Korngrenzenfestigkeit, die plastische Verformbarkeit des Materials und die Sauerstoffdiffusionsrate verändern. Das Verständnis der individuellen Auswirkungen dieser Faktoren und ihrer gegenseitigen Kopplungseffekte ist von großer Bedeutung für die Optimierung der Hochtemperaturleistung von Hartmetall. Ausgehend von den oben genannten Schlüsselfaktoren, kombiniert mit Bruchmechanik, Thermodynamik und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

experimentellen Daten, erfolgt die folgende detaillierte Analyse ihrer Einflussmechanismen und Optimierungsrichtung.

(1) Einfluss der Korngröße

sie die Korngrenzendichte und den Rissausbreitungsverlauf beeinflusst. Wenn die WC-Korngröße $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ beträgt, erhöht sich die Anzahl der Korngrenzen, die Risslänge durch thermische Ermüdung verringert sich erheblich ($< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die Risswachstumsrate (da/dN) sinkt von $2 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ auf $< 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$, was einer Verringerung um etwa $50 \% \pm 5 \%$ entspricht. Feine Körner bewirken eine Ablenkung der Risse an den Korngrenzen (Ablenkwinkel $30^\circ \pm 5^\circ$), verlängern den Rissverlauf und reduzieren den Spannungsintensitätsfaktor (ΔK von $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ auf $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Gleichzeitig verteilt die zunehmende Korngrenzendichte die Kriechspannung und die Kriechdehnungsrate (ϵ') sinkt von $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ auf $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Bei Temperaturen über $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ können die feinen Körner jedoch aufgrund der erhöhten Korngrenzendiffusion die Kriechgeschwindigkeit leicht erhöhen (um etwa $10 \% \pm 2 \%$) (der Diffusionskoeffizient D steigt um etwa $20 \% \pm 3 \%$). Dies weist darauf hin, dass die Korngrenzenstabilität bei hohen Temperaturen weiter optimiert werden muss. Im Gegensatz dazu verringert sich bei einer Korngröße von $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ die Korngrenzendichte, der Riss breitet sich entlang weniger Korngrenzen aus, die Risslänge erhöht sich um etwa $30 \% \pm 5 \%$ auf $0,065 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und die Kriechdehnungsgeschwindigkeit erhöht sich ebenfalls auf $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

(2) Einfluss des Co-Gehalts

Der Co-Gehalt in der Bindungsphase wirkt sich direkt auf die plastische Verformbarkeit und die Hochtemperaturstabilität von Hartmetall aus. Bei einem Co-Gehalt von $10 \% \pm 1 \%$ baut Co die thermische Spannungskonzentration (Spannungskonzentrationsfaktor $K_t < 2 \pm 0,1$) durch mikroplastische Verformung (Dehnung $0,1 \% \pm 0,01 \%$) bei thermischer Ermüdung ab, und die Risswachstumsrate bleibt niedrig ($< 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$), und die Kriechdehnungsrate wird auf $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ kontrolliert. Wenn der Co-Gehalt jedoch auf $12 \% \pm 1 \%$ steigt, verstärkt sich die Erweichung von Co bei $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (die Härte sinkt von $\text{HV } 600 \pm 30$ auf $\text{HV } 200 \pm 30$) und das Korngrenzengleiten wird erheblich verstärkt, was zu einer Erhöhung der Kriechdehnungsrate um etwa $50 \% \pm 5 \%$ auf $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ führt. Obwohl die plastische Verformungsfähigkeit von Co bei thermischer Ermüdung noch Spannungen abbauen kann, verringert ein übermäßiger Co-Gehalt die Bindungsfestigkeit der WC-Co-Grenzfläche (von $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ auf $250 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$), wodurch sich Risse eher entlang der Grenzfläche ausbreiten und die Risslänge von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,07 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ zunimmt. Die Optimierung des Co-Gehalts erfordert ein Gleichgewicht zwischen thermischer Ermüdungsbeständigkeit und Kriechfestigkeit.

(3) Wirkung der Cr_3C_2 -Zugabe

Die Zugabe von Cr_3C_2 ist ein wirksames Mittel zur Verbesserung der thermischen Ermüdung und der Kriechfestigkeit. Wenn der Cr_3C_2 -Gehalt $0,5 \% \pm 0,01 \%$ beträgt, löst sich Cr bei hoher Temperatur in der Co-Phase auf und bildet eine Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), wodurch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Korngrenzenfestigkeit deutlich verbessert wird (von $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ auf $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), die Risslänge durch thermische Ermüdung um etwa $40 \% \pm 5 \%$ reduziert wird, von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, und die Risswachstumsrate von $2 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ auf $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ verringert wird. Cr_3C_2 verhindert außerdem das Abgleiten der Co-Phase durch Korngrenzenfixierung, und die Kriechdehnungsrate wird um etwa $40 \% \pm 5 \%$ von $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ auf $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ reduziert. Wenn der Cr_3C_2 -Gehalt jedoch $1 \% \pm 0,01 \%$ übersteigt, steigt der Anteil der spröden Phasen (wie z. B. η -Phase, WC-Co-Cr-Verbundphase) um etwa $10 \% \pm 2 \%$, was zu einer Verringerung der Bruchzähigkeit (K_{Ic}) um etwa $10 \% \pm 2 \%$ von $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ auf $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ auf $10,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ führt. Das Vorhandensein der spröden Phase erleichtert die Ausbreitung von Rissen entlang der Schnittstelle, was die Wärmeermüdungsbeständigkeit schwächt. Die Zugabemenge muss genau kontrolliert werden.

(4) Einfluss von Temperaturunterschieden

Die Temperaturdifferenz (ΔT) im thermischen Zyklus ist der Hauptfaktor für thermische Ermüdung. Bei $\Delta T > 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt die thermische Spannung ($\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$) deutlich an, und die Risslänge vergrößert sich um etwa $50 \% \pm 5 \%$, von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Bei $\Delta T 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ kann die thermische Spannung $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ erreichen und die Risswachstumsrate steigt von $10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ auf $1,5 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$. Im Gegensatz dazu sinkt bei $\Delta T < 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ die thermische Spannung auf $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ und die Risslänge wird auf $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ kontrolliert, was darauf hindeutet, dass der geringere Temperaturunterschied den thermischen Ermüdungsbruch deutlich verlangsamt. Der Temperaturunterschied hat wenig Einfluss auf das Kriechen, wenn die Hochtemperaturphase ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) jedoch lange anhält (> 5 Minuten), wird die Co-Erweichung verstärkt und die Kriechdehnungsrate indirekt um etwa $10 \% \pm 2 \%$ erhöht.

(5) Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit hat einen wichtigen Einfluss auf die thermische Ermüdungsbeständigkeit, da sie die Verteilung der thermischen Spannung beeinflusst. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von $> 80 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ verringert sich der Temperaturgradient im Material ($\Delta T / \Delta x$ verringert sich um ca. $30 \% \pm 5 \%$), die thermische Spannung sinkt von $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ auf $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, die Risswachstumsrate verringert sich um ca. $20 \% \pm 5 \%$ und die Risslänge verringert sich von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Im Gegensatz dazu steigt bei einer Wärmeleitfähigkeit $< 50 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ der Temperaturgradient, die thermische Spannungskonzentration nimmt zu und die Risslänge vergrößert sich um ca. $20 \% \pm 5 \%$ auf $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Die Wärmeleitfähigkeit hat einen eher indirekten Einfluss auf das Kriechen. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit trägt dazu bei, die Dauer lokaler Hochtemperaturbereiche zu verkürzen, die Erweichung der Co-Phase und das Korngrenzengleiten zu verringern und die Kriechdehnungsrate um ca. $10 \% \pm 2 \%$ zu senken.

(6) Analyse des Kopplungseffekts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die oben genannten Faktoren beeinflussen gemeinsam die thermischen Ermüdungs- und Kriecheigenschaften durch komplexe Kopplungseffekte. Wenn beispielsweise ein hoher Temperaturunterschied (ΔT $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) mit einem hohen Co-Gehalt ($12\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$) gekoppelt ist, thermische Spannung und Co-Erweichung zusammenwirken, erreicht die Risslänge $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und die Kriechdehnungsrate steigt auf $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ und übersteigt damit den Einfluss eines einzelnen Faktors bei weitem. Wenn feine Körner ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und Cr_3C_2 ($0,5\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$) zusammenwirken, überlagern sich die Korngrenzenbehinderungs- und Verstärkungseffekte, die Risslänge verringert sich auf $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und die Kriechdehnungsrate verringert sich auf $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, was zu einer deutlichen Leistungsverbesserung führt. Wenn eine niedrige Wärmeleitfähigkeit ($<50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) mit großen Körnern ($>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) gekoppelt ist, werden Wärmespannung und Rissausbreitungspfade zentralisiert und die Risslänge erhöht sich auf $0,08\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, was darauf hindeutet, dass die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit und der Korngröße gleichzeitig durchgeführt werden muss.

(7) Umfassende Fallanalyse

Am Beispiel von WC-12Co und WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$) erreichte die Risslänge von WC-12Co im Thermoschocktest (ΔT $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500-mal ± 50 -mal) $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und die Risswachstumsrate betrug $2 \times 10^{-7}\text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8}\text{ mm/Zyklus}$, während die von WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$) nur $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ betrug und die Risswachstumsrate auf $1,2 \times 10^{-7}\text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8}\text{ mm/Zyklus}$ sank, die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessert sich um etwa $70\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$. Im Kriechversuch ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 Stunden) beträgt die Dehnungsrate von WC-12Co $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, während sie bei der optimierten Probe auf $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ reduziert ist und die Kriechbeständigkeit um etwa $60\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$ verbessert ist. Die Wärmeleitfähigkeit der optimierten Probe beträgt $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$, und die Korngröße beträgt $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Die Zugabe von Cr_3C_2 verbessert die Leistung deutlich.

(8) Anwendungsbedeutung und Optimierungsrichtung

Die Analyse des Kopplungseffekts von thermischer Ermüdung und Kriechen zeigt, dass bei der Optimierung Korngröße, Co-Gehalt, Cr_3C_2 -Zusatz, Temperaturdifferenz und Wärmeleitfähigkeit umfassend berücksichtigt werden müssen. Feine Körnung und ein angemessener Cr_3C_2 -Gehalt sind entscheidend für eine verbesserte thermische Ermüdung und Kriechfestigkeit, während eine hohe Wärmeleitfähigkeit und ein niedriger Co-Gehalt die Leistung weiter verbessern. Das optimierte Hartmetall eignet sich gut für Flugzeugturbinenwerkzeuge (Lebensdauer $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$) und Hochtemperaturformen (Betriebsdauer $> 1,5 \times 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$), und Risslänge und Kriechdehnungsrate erfüllen die Anforderungen rauer Arbeitsbedingungen.

Das Auftreten von thermischer Ermüdung und Kriechen wird durch das Zusammenspiel von Korngröße, Co-Gehalt, Cr_3C_2 -Zugabe, Temperaturdifferenz und Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Feine Körner ($0,51 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), eine angemessene Menge an Co ($10\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$), Cr_3C_2 ($0,5\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$), niedriges ΔT ($< 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($> 80\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$m \cdot K$) tragen dazu bei, die Risswachstumsrate und die Kriechdehnungsrate zu verringern. Umfassende Fälle zeigen, dass nach der Optimierung die Risslänge um $70 \% \pm 5 \%$ und die Dehnungsrate um $60 \% \pm 5 \%$ reduziert wird, was eine wissenschaftliche Orientierung für Hochtemperaturanwendungen bietet.

8.2.2.4 Strategien zur Optimierung der thermischen Ermüdung und des Kriechens bei Hartmetall

$10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen ($800 - 1.000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$) muss seine Wärmeermüdungs- und Kriechfestigkeit durch umfassende Optimierung der Mikrostruktur, Additive, des Sinterprozesses und der Oberflächenbehandlung systematisch verbessert werden. Diese Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, die Korngrenzenfestigkeit zu erhöhen, die Wärmeleitfähigkeit zu verbessern, Porosität und Oberflächendefekte zu verringern und den leistungssteigernden Effekt durch wissenschaftliche Tests zu verifizieren. Ausgehend von den oben genannten Schlüsselaspekten, kombiniert mit Bruchmechanik, thermodynamischen Daten und technischen Fällen, werden im Folgenden die Optimierungsstrategie und ihre Rolle bei der Kontrolle des Wärmeermüdungs- und Kriechverhaltens detailliert beschrieben.

(1) Mikrostrukturoptimierung

der Wärmeermüdungs- und Kriechfestigkeit. Die empfohlene WC-Korngröße beträgt $0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$, und der Co-Gehalt wird auf $8-10 \% \pm 1 \%$ kontrolliert. Feine Körner verhindern wirksam die Ausbreitung von Wärmeermüdungsrissen, indem sie die Korngrenzendichte erhöhen (Korngrenzenfläche $> 10^4 mm^2/cm^3 \pm 10^3 mm^2/cm^3$), den Rissablenkungswinkel auf $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ erhöhen, den Rissverlauf verlängern und die Risswachstumsrate (da/dN) von $2 \times 10^{-7} mm/Zyklus \pm 10^{-8} mm/Zyklus$ auf $< 10^{-7} mm/Zyklus \pm 10^{-8} mm/Zyklus$ reduzieren. Ein niedriger Co-Gehalt ($8-10 \% \pm 1 \%$) verringert die Erweichung bei hohen Temperaturen (die Härte sinkt von $HV 600 \pm 30$ auf $HV 250 \pm 30$), verhindert das Gleiten an den Korngrenzen und verringert die Kriechdehnungsrate von $1,5 \times 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ auf $< 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$. Gleichzeitig verbessert die optimierte Mikrostruktur die Wärmeleitfähigkeit (Ziel $> 80 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$) von $70 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ auf $85 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$, reduziert die thermische Spannungskonzentration (von $600 MPa \pm 50 MPa$ auf $450 MPa \pm 50 MPa$) und verkürzt weiter die Länge der thermischen Ermüdungsrisse.

(2) Additive Optimierung

von Chromcarbid (Cr_3C_2) ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der thermischen Ermüdungs- und Kriechfestigkeit. Die empfohlene Zugabemenge beträgt $0,5 \% \pm 0,01 \%$. Cr_3C_2 löst sich bei hohen Temperaturen in der Co-Phase auf und bildet eine Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $0,2 \mu m \pm 0,05 \mu m$), die die Korngrenzenfestigkeit deutlich erhöht (von $180 MPa \pm 20 MPa$ auf $> 200 MPa \pm 20 MPa$). Die verbesserte Korngrenzenfestigkeit unterdrückt die Ausbreitung von thermischen Ermüdungsrissen durch den Pinning-Effekt, und die Risslänge wurde um etwa $40 \% \pm 5 \%$ von $0,05 mm \pm 0,01 mm$ auf $0,03 mm \pm 0,01 mm$ reduziert, und die Risswachstumsrate wurde von $2 \times 10^{-7} mm/Zyklus \pm 10^{-8} mm/Zyklus$ auf $1,2 \times 10^{-7} mm/Zyklus \pm 10^{-8} mm/Zyklus$ reduziert. Cr_3C_2 verringert außerdem die Kriechaktivierungsenergie (von $300 kJ/mol \pm 10 kJ/mol$ auf $250 kJ/mol \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 kJ/mol) und verringert die Kriechdehnungsrate um etwa $40 \% \pm 5 \%$, von $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ auf $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, indem es die Co-Phasenverschiebung und die Korngrenzendiffusion hemmt. Energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Cr-Gehalt an der Korngrenze etwa $5 \% \pm 0,5 \%$ beträgt, was die verstärkende Wirkung bestätigt.

(3) Optimierung des Sinterprozesses

Die Optimierung des Sinterprozesses wirkt sich direkt auf die Kompaktheit und Kriechfestigkeit von Hartmetall aus. Die empfohlene Sintertemperatur beträgt $1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vakuum oder eine Schutzatmosphäre (z. B. Argon) reduzieren die Oxidation und gewährleisten eine Materialdichte von $99,5 \% \pm 0,1 \%$ und eine Porosität von unter $0,1 \% \pm 0,02 \%$. Die hochdichte Struktur reduziert innere Poren und Mikrorisse, begrenzt die thermische Spannungskonzentration und die Sauerstoffdiffusionswege und reduziert die Länge thermischer Ermüdungsrissse von $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Eine geringe Porosität ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) verbessert auch die Festigkeit der Korngrenzenbindung ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), verringert das Auftreten von Korngrenzengleiten während des Kriechens und reduziert die Dehnungsrate von $1,2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ auf $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Eine präzise Kontrolle der Sintertemperatur ($1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) gewährleistet eine gleichmäßige Co-Verteilung (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und vermeidet so bevorzugtes Versagen in lokal erweichenden Bereichen.

(4) Optimierung der Oberflächenbehandlung

Die Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit ist ein wichtiges Mittel zur Reduzierung von thermischen Ermüdungsrissen und zur Verbesserung der Kriechfestigkeit. Es wird empfohlen, die Oberflächenrauheit (Ra) durch Präzisionspolieren auf unter $0,05 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ zu halten. Dieses Verfahren kann das Auftreten von thermischen Ermüdungsrissen um etwa $20 \% \pm 5 \%$ und die Risslänge von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ reduzieren. Eine geringe Rauheit reduziert Oberflächendefekte (wie Mikrokratzer und -löcher), begrenzt die thermische Spannungskonzentration und Rissbildungspunkte und reduziert Sekundärrisse, die durch Abplatzen der Oxidschicht entstehen. Nach dem Polieren können durch Ultraschallreinigung ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) Oberflächenverunreinigungen ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) entfernt, die Oberflächenintegrität weiter verbessert und die Bildung von Oberflächengleitbändern während des Kriechens (Breite von $0,6 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ bis $0,4 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) verringert werden.

(5) Prüfvorschriften

Um den Optimierungseffekt der thermischen Ermüdung und der Kriecheigenschaften genau zu bewerten, wird empfohlen, den ASTM E1876-Standard für Thermoschocktests zu verwenden, wobei thermische Zyklen von $1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Zyklusanzahl von $> 500 \pm 50$ Mal simuliert werden und die Risslänge durch optische Mikroskopie (200-fache Vergrößerung) und SEM (Auflösung $< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) mit einem Ziel von $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ gemessen wird. Die Kriechversuche werden bei $1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer konstanten Spannung von $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ mit einem Hochtemperatur-Kriechprüfgerät (Dehnungsmessgenauigkeit $\pm 0,001 \%$) durchgeführt. Die stationäre Dehnungsrate wird mit einem Zielwert von $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ aufgezeichnet. Nach dem Versuch kann die Bildung der Cr_2O_3 -Schicht (Cr3p -Peak $577 \text{ eV} \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eV) mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) analysiert werden, um den Korngrenzenverstärkenden Effekt zu verifizieren. Diese Spezifikationen gewährleisten die Wissenschaftlichkeit und Wiederholbarkeit der Leistungsbewertung.

(6) Umfassende Fallanalyse

Am Beispiel der Probe WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %) betrug die Risslänge im Thermoschocktest ASTM E1876 (1000 °C $\pm$ 10 °C bis 25 °C $\pm$ 1 °C, 500-mal $\pm$ 50-mal) nur 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm und die Risswachstumsrate lag bei $< 10^{-7}$ mm/Zyklus $\pm$ 10^{-8} mm/Zyklus, was 40 % $\pm$ 5 % niedriger war als die nicht optimierten 0,05 mm $\pm$ 0,01 mm. Beim Kriechversuch (1000 °C $\pm$ 10 °C, 100 MPa $\pm$ 10 MPa, 100 Stunden) betrug die Dehnungsrate $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ und war damit niedriger als die nicht optimierten $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Dadurch verbesserte sich die Kriechfestigkeit um etwa 40 % $\pm$ 5 %. Die SEM- Beobachtung zeigte, dass der Rissablenkungswinkel der optimierten Probe $30^\circ \pm 5^\circ$ und die Gleitbandbreite $0,3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ betrug, was auf einen synergistischen Effekt von Mikrostruktur- und Korngrenzenverstärkung hindeutet. Diese Leistung erfüllt die Anforderungen von Werkzeugen zur Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt (Lebensdauer > 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden) und Hochtemperaturformen (Betriebsdauer $> 1,5 \times 10^5$ -mal $\pm$ 10^4 -mal).

(7) Dynamische Leistung und Anwendungsbedeutung

Dynamische Tests zeigen, dass sich das Wachstum thermischer Ermüdungsrisse nach 500 ± 50 Zyklen stabilisiert und die Risslänge langsam von 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm auf $0,035 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ansteigt. Dies deutet auf eine gute Zyklenstabilität des optimierten Materials hin. Die Kriechdehnung erreicht nach 100 Stunden den stationären Zustand, und die Dehnungsrate bleibt $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, was die langfristige Belastbarkeit bestätigt. Das optimierte Hartmetall zeigt gute Leistungen in Luftfahrtwerkzeugen (Schneidtemperatur 900–1000 °C, Lebensdauer > 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden), Hochtemperaturformen (Formtemperatur 800–900 °C, Zyklen $> 10^5$ -mal $\pm$ 10^4 -mal) und Gasturbinenkomponenten (Betriebstemperatur $950 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$, Lebensdauer $> 10^4$ Stunden $\pm$ 10^3 Stunden), wobei die Lebensdauer um 50–70 % $\pm$ 5 % erhöht und die jährlichen Wartungskosten um etwa 35 % $\pm$ 5 % gesenkt werden.

(8) Anpassungsfähigkeit an die Umwelt und Zukunftsaussichten

Die Optimierungsstrategie ist auch bei hohen Temperaturunterschieden (ΔT 600 °C $\pm$ 10 °C) und in Wasserdampfumgebungen (Luftfeuchtigkeit $> 50 \text{ \%} \pm 5 \text{ \%}$) noch wirksam, wobei Risslänge und Dehnungsrate bei $< 0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ bzw. $< 8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ gehalten werden, was für nasse und heiße Bedingungen (wie etwa tropische Flugzeugtriebwerke) geeignet ist. Bei höheren Temperaturen ($> 1100 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) oder Schwefelatmosphären (SO_2) können Mehrlagenbeschichtungen (wie etwa $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, Dicke $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) oder neue Additive (wie etwa TaC) kombiniert werden, um die Wärmeleitfähigkeit und Korngrenzenfestigkeit weiter zu verbessern und so den Anforderungen von Hochtemperaturgeräten der nächsten Generation gerecht zu werden.

Die Optimierung der thermischen Ermüdung und des Kriechens von Hartmetall muss durch

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostrukturkontrolle (WC-Korn $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co 8–10 % ± 1 %, Wärmeleitfähigkeit $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), Cr_3C_2 -Zugabe (0,5 % $\pm 0,01$ %, Korngrenzenfestigkeit $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), Sinterprozess ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5\% \pm 0,1\%$) und Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Rissreduzierung 20 % ± 5 %) erreicht werden. Nach der Optimierung ist die Risslänge auf $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ reduziert und die Dehnungsrate beträgt $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, wodurch die hohen Temperaturanforderungen der Luftfahrt und des Formenbaus erfüllt werden.

8.2.2.5 Technische Anwendung der thermischen Ermüdung und Kriechverhaltensoptimierung von Hartmetall

Das optimierte Hartmetall weist in zyklischen Hochtemperaturumgebungen ($800\text{--}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ein hervorragendes thermisches Ermüdungs- und Kriechverhalten auf. Durch Mikrostrukturregulierung, additive Optimierung, Verbesserung des Sinterprozesses und Oberflächenbehandlung konnte seine Anwendungssicherheit in den Bereichen Luftfahrt, Formenbau und Energieanlagen deutlich verbessert werden. Diese Optimierungsmaßnahmen reduzieren die Risswachstumsrate, verringern die Kriechdehnungsrate und verlängern die Lebensdauer. Sie bieten somit eine effiziente und langlebige Lösung für Hochtemperaturbedingungen. Im Folgenden werden die Anwendungs- und Leistungsvorteile des optimierten Hartmetalls in den drei Hauptanwendungsbereichen Luftfahrtturbinenschaufeln, Hochtemperaturformen und Gasturbinendüsen anhand von experimentellen Daten, mikroskopischen Analysen und Praxisbeispielen detailliert erläutert.

(1) Hartmetall-Flugzeugturbinenschaufeln

Turbinenschaufeln für Flugzeuge sind wiederholten thermischen Belastungen (z. B. $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ bis $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) und Schnittbelastungen in Hochtemperaturzyklen ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) ausgesetzt, was extrem hohe Anforderungen an die Temperaturwechselbeständigkeit und Lebensdauer stellt. Das optimierte WC-10Co-Hartmetall (Cr_3C_2 -Zusatz 0,5 % $\pm 0,01$ %, Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) weist eine thermische Ermüdungsrisslänge von nur $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und eine Risswachstumsrate von $< 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$ im Thermoschocktest ASTM E1876 ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 500-mal ± 50 -mal) auf, was besser ist als die nicht optimierten $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (Wachstumsrate $2 \times 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$). Feine Körner verhindern die Rissablenkung (Ablenkwinkel $30^\circ \pm 5^\circ$), indem sie die Korngrenzendichte erhöhen ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), und die Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $0,2 \pm 0,05 \mu\text{m}$) verbessert die Korngrenzenfestigkeit ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), wodurch die thermische Spannungskonzentration wirksam verringert wird (von $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ auf $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$). In der Praxis beträgt die Lebensdauer von Turbinenschaufeln aus diesem Material mehr als 5000 Stunden ± 500 Stunden, was etwa 67 % ± 5 % mehr ist als die nicht optimierten 3000 Stunden ± 300 Stunden. Bei Flugzeugtriebwerken verringert die Optimierung der thermischen Ermüdungsbeständigkeit der Schaufelblätter die durch thermische Risse verursachte Ausfallrate um etwa 40 % ± 5 %, was die Flugsicherheit verbessert.

(2) Hochtemperaturform aus Hartlegierung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturformen (wie Warm Schmiedeformen und Druckgussformen) müssen wiederholten thermischen Zyklen und kontinuierlichen Belastungen bei Arbeitsbedingungen von $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ standhalten und unterliegen extrem hohen Anforderungen an Kriechfestigkeit und Lebensdauer. Beim Kriechversuch von optimiertem WC-8Co-Hartmetall (Wärmeleitfähigkeit $> 80\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ wird die Dehnungsrate auf $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ geregelt, was niedriger ist als die nicht optimierten $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit (Erhöhung von $70\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ auf $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) verringert den Temperaturgradienten ($\Delta T/\Delta x$ verringert sich um etwa $30\% \pm 5\%$), die Wärmespannung verringert sich von $550\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ auf $400\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ und die Kriechdehnungsakkumulation wird verringert. Ein niedriger Co-Gehalt ($8\% \pm 1\%$) und ein optimiertes Sintern (Dichte $> 99,5\% \pm 0,1\%$) verhindern zusätzlich eine Co-Erweichung (die Härte bleibt $> \text{HV } 1300 \pm 30$) und die Gleitbandbreite verringert sich von $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ auf $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. In der Praxis beträgt der Betriebszyklus von Hochtemperaturformen aus diesem Material mehr als das 10^5 -fache $\pm 10^4$ -fache, was etwa $50\% \pm 5\%$ mehr ist als der nicht optimierte Wert von $6 \times 10^4 \pm 10^4$. Beim Warm Schmieden von Automobilteilen verlängert die Optimierung der Kriechfestigkeit der Gesenke die Lebensdauer um etwa $50\% \pm 5\%$, wodurch die Austauschhäufigkeit und die Produktionsausfallzeiten reduziert werden.

(3) Gasturbinendüse aus Hartlegierung

Gasturbinendüsen unterliegen thermischer Ermüdung und Langzeitbelastungen in einer oxidierenden Hochtemperaturumgebung bei $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, was extrem hohe Anforderungen an die Kontrolle des Risswachstums und die Lebensdauer stellt. Im Thermoschocktest bei $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T\text{ } 400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500-mal ± 50 -mal) weist das optimierte WC-10Co-Hartmetall (mit $0,5\% \pm 0,01\%$ Cr_3C_2 versetzt) eine thermische Ermüdungsrisslänge von $< 0,04\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und eine Risswachstumsrate von $< 1,5 \times 10^{-7}\text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8}\text{ mm/Zyklus}$ auf, was besser ist als die nicht optimierten $0,06\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ (Wachstumsrate $2,5 \times 10^{-7}\text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8}\text{ mm/Zyklus}$). Die Cr_2O_3 -Schicht (Cr-Gehalt etwa $5\% \pm 0,5\%$) und die feinen Körner ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) wirken zusammen, um die Korngrenzenfestigkeit zu erhöhen ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) und die thermische Spannungskonzentration zu unterdrücken (von $500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ auf $350\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$). Beim Kriechversuch ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 Stunden) beträgt die Dehnungsrate $< 8 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ und ist damit niedriger als die nicht optimierten $1,2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. In der Praxis beträgt die Lebensdauer von Düsen aus diesem Material mehr als 10^4 Stunden $\pm 10^3$ Stunden und erfüllt damit die Anforderungen an den Langzeitbetrieb von Energieanlagen (wie z. B. industriellen Gasturbinen). Dies ist besser als die nicht optimierten 6×10^3 Stunden $\pm 10^3$ Stunden. In Kraftwerken reduziert die optimierte Wärmeermüdungsbeständigkeit der Düsen die durch thermische Risse verursachte Ausfallrate um etwa $45\% \pm 5\%$ und verbessert so die Betriebseffizienz der Anlage.

(4) Technischer Wert der Leistungsoptimierung

Die oben genannten Fälle zeigen, dass die Optimierung der thermischen Ermüdungs- und Kriecheigenschaften die Zuverlässigkeit von Hartmetall in Umgebungen mit hohen Temperaturwechselbelastungen deutlich verbessert. Durch Mikrostrukturoptimierung (WC-Korn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co 8%-10% $\pm 1\%$, Wärmeleitfähigkeit $> 80 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$), Cr₃C₂-Zugabe (0,5% $\pm 0,01\%$, Korngrenzenfestigkeit $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), Sinterprozess (1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$, Dichte $> 99,5\% \pm 0,1\%$) und Oberflächenbehandlung ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verringerte sich die thermische Ermüdungsrisslänge von Hartmetall von 0,05-0,1 mm $\pm 0,01 \text{ mm}$ auf 0,03-0,04 mm $\pm 0,01 \text{ mm}$, und die Kriechdehnungsrate verringerte sich von $1,2-1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ bis $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Diese Leistungssteigerung verlängert die Lebensdauer (z. B. Flugzeugturbinschaufeln $> 5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$, Hochtemperaturformen $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$, Gasturbinendüsen $> 10^4 \text{ Stunden} \pm 10^3 \text{ Stunden}$) um 50–67 % $\pm 5 \%$ und senkt die Wartungskosten. So werden beispielsweise die jährlichen Wartungskosten für Flugzeugturbinschaufeln um etwa 35 % $\pm 5 \%$ gesenkt, der Austauschzyklus für Hochtemperaturformen um 50 % $\pm 5 \%$ verlängert und die Betriebseffizienz von Gasturbinendüsen um etwa 20 % $\pm 3 \%$ verbessert.

(5) Umweltanpassungsfähigkeit und Anwendungserweiterung

Das optimierte Hartmetall ist gut an Umweltbedingungen anpassbar und kann daher auch komplexere thermische Zyklen bewältigen. Beispielsweise kontrolliert die Cr₂O₃-Schicht in einer Hochtemperaturumgebung mit Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit $> 50 \% \pm 5 \%$, $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) die Risslänge immer noch auf $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und die Dehnungsrate auf $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, was für nasse und heiße Umgebungen in Flugzeugtriebwerken geeignet ist. In einer schwefelhaltigen (SO₂) Atmosphäre oder bei einem höheren Temperaturunterschied ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) erhöht sich die thermische Ermüdungsrisslänge der optimierten Probe auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, kann aber durch Mehrlagenbeschichtungen (wie Al₂O₃ / TiN, Dicke $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) weiter auf $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ reduziert werden, wodurch sich das Anwendungspotenzial in schwefelhaltigen Energiegeräten und extremen thermischen Zyklen erweitert. Darüber hinaus kann in einer Ultrahochtemperaturumgebung von $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ in Kombination mit neuen Additiven (wie etwa TaC) die Dehnungsrate auf $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ gesteuert werden, wodurch die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt der nächsten Generation erfüllt werden.

(6) Umfassende Fälle und Zukunftsaussichten

von WC-10Co (Cr₃C₂ 0,5 % $\pm 0,01 \%$, Wärmeleitfähigkeit $> 80 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) beträgt die Risslänge nach 500 ± 50 Thermoschocks bei $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; nach 100 Stunden Kriechen bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ und $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ beträgt die Dehnungsrate $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; im thermischen Ermüdungstest bei $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt die Risslänge $< 0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Diese Daten zeigen, dass das optimierte Hartmetall eine ausgezeichnete thermische Ermüdungs- und Kriechfestigkeit in Flugzeugturbinschaufeln, Hochtemperaturformen und Gasturbinendüsen aufweist und die Lebensdauer um 67 % $\pm 5 \%$, 50 % $\pm 5 \%$ bzw. 67 % $\pm 5 \%$ erhöht. Zukünftig kann die Leistung des optimierten Hartmetalls in Umgebungen mit ultrahohen Temperaturen ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) oder hoher Zyklenzahl ($> 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) durch die Entwicklung funktionaler Gradientenmaterialien oder die Einführung von Nanobeschichtungen (wie ZrO) weiter verbessert werden. 2, Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) um anspruchsvolleren technischen Anforderungen gerecht zu werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(7) Dynamische Leistung und wirtschaftliche Vorteile

Dynamische Tests zeigen, dass sich die Rissausdehnung durch thermische Ermüdung nach 500 ± 50 Versuchen stabilisiert und die Risslänge von $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,035 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ zunimmt. Dies deutet auf eine gute zyklische Haltbarkeit des optimierten Materials hin. Die Kriechdehnung erreicht nach 100 Stunden den stationären Zustand, und die Dehnungsrate bleibt $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, was die langfristige Belastbarkeit bestätigt. Diese Leistungssteigerung verlängert nicht nur die Lebensdauer der Anlage, sondern senkt auch die Betriebskosten erheblich. So werden beispielsweise die jährlichen Wartungskosten für Flugzeugturbinschaufeln um etwa $35 \% \pm 5 \%$ gesenkt, der Austauschzyklus von Hochtemperaturformen um $50 \% \pm 5 \%$ verlängert und die Betriebseffizienz von Gasturbinendüsen um etwa $20 \% \pm 3 \%$ erhöht, was den wirtschaftlichen Wert der Optimierung widerspiegelt.

Optimiertes Hartmetall zeigt in zyklischen Hochtemperaturumgebungen eine gute Leistung. WC-10Co- und WC-8Co-Formulierungen weisen eine bessere thermische Ermüdungsrisslänge ($0,03\text{--}0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), Kriechdehnungsrate ($< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$) und Lebensdauer (> 5000 Stunden ± 500 Stunden, $> 10^5\text{--}10^4$ -mal, $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) auf als herkömmliche Materialien in Flugzeugturbinschaufeln, Hochtemperaturformen und Gasturbinendüsen. Diese Anwendungsfälle belegen deutlich, dass die Optimierung der thermischen Ermüdungs- und Kriecheigenschaften eine Schlüsselstrategie zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und der wirtschaftlichen Vorteile von Hartmetall in technischen Hochtemperaturanwendungen ist.

8.3 Methoden zur Optimierung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust $< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und Hochtemperaturbeständigkeit (Härte $> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) sind der Schlüssel zur Verbesserung der Anwendung von Hartmetall in sauren, salzhaltigen und heißen Umgebungen (wie z. B. in der Luftfahrt und Energieausrüstung). Diese Leistungsverbesserungen können durch eine Reihe wissenschaftlicher Methoden erreicht werden, darunter (1) Bindephasensubstitution, (2) Zugabe von Additiven, (3) Oberflächenbeschichtungstechnologie und (4) Optimierung der Prozessparameter und (5) Regulierung der Mikrostruktur, die zusammenwirken, um den Anforderungen anspruchsvoller Arbeitsbedingungen gerecht zu werden. Die traditionelle Co-Bindephase neigt bei hohen Temperaturen zur Erweichung (Härte sinkt auf $\text{HV } 200 \pm 30$) und Oxidation (Bildung von Co_3O_4), was zu Korrosion und Leistungseinbußen führt. Die Optimierungsmethode ersetzt Co durch eine Ni-basierte Bindephase ($\text{Ni } 8\text{--}12 \% \pm 1 \%$), die eine NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) bildet. Dadurch wird der Korrosionsstrom ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) deutlich reduziert und die Korrosionsbeständigkeit verbessert. Die Zugabe von Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) hemmt die Oxidation durch Bildung einer dichten Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $\sim 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), und die Gewichtszunahme wird auf $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ begrenzt. Oberflächenbeschichtungen (wie TiN , Al_2O_3 , Dicke $5\text{--}20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) werden durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) von Sauerstoff und korrosiven Medien isoliert, wodurch die Oxidationsbeständigkeit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verschleißfestigkeit weiter verbessert werden. Diese Optimierungsmethoden verbessern nicht nur die Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturstabilität von Hartmetall, sondern verlängern auch seine Lebensdauer in Hochtemperaturzyklen und korrosiven Umgebungen erheblich.

der Ni-basierten Bindungsphase, die antioxidative Wirkung der Cr_3C_2 -Zugabe, der Schutz der Oberflächenbeschichtung und die koordinierte Optimierung von Prozess und Mikrostruktur. Durch die Kombination von Prozessparametern (Sintern $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, PVD $400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), mikroskopischer Analyse (XPS, SEM) und technischen Fällen werden der Optimierungspfad und sein Mechanismus zur Leistungsverbesserung systematisch erörtert. Beispielsweise verliert WC-10Ni in einer Umgebung mit 5 % NaCl-Salzsprühnebel nur $0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, die Korrosionsbeständigkeit ist im Vergleich zu herkömmlichem WC-10Co um etwa $60\% \pm 5\%$ verbessert; die Härte des mit Cr_3C_2 versetzten und mit TiN beschichteten Werkzeugs bleibt bei $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ bei $> \text{HV } 1500 \pm 30$ und die Schnittlebensdauer übersteigt 5000 Stunden ± 500 Stunden, was erheblich besser ist als die nicht optimierten 3000 Stunden ± 300 Stunden.

8.3.1 Vorteile der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit

8.3.1.1 Prinzip und technischer Überblick über die Korrosionsbeständigkeitsvorteile der Ni-basierten Hartmetall-Bindungsphase

Die Ni-basierte Bindungsphase (Ni-Gehalt $8\% - 12\% \pm 1\%$) weist eine ausgezeichnete elektrochemische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit auf, was die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in rauen Umgebungen wie sauren (pH-Wert $< 3 \pm 0,1$), Salzsprühnebel- (NaCl $5\% \pm 0,1\%$) und Meeresumgebungen deutlich verbessert und gegenüber der herkömmlichen Co-basierten Bindungsphase offensichtliche Vorteile bietet. Das Korrosionspotenzial von Ni ($E_{\text{corr}} \sim 0,1\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$ vs. SCE) ist höher als das von Co ($E_{\text{corr}} \sim -0,3\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$ vs. SCE), und die Korrosionsstromdichte (i_{corr}) ist deutlich auf $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ reduziert, was besser ist als die Co-basierten $10^{-5}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6}\text{ A/cm}^2$. Dieser Leistungsunterschied ist auf die Bildung einer dichten NiO-Passivierungsschicht (Dicke $\sim 10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Dichte $\sim 6,7\text{ g/cm}^3$) in einer korrosiven Umgebung zurückzuführen. ($\pm 0,1\text{ g/cm}^3$), diese Schicht isoliert wirksam korrosive Medien (wie Cl^- , H^+) durch chemische Inertheit und blockiert elektrochemische Reaktionen (Reaktionsformel: $\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$, $\Delta G < 0\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$). Im Gegensatz dazu erzeugt die Co-basierte Bindungsphase unter ähnlichen Bedingungen leicht loses Co_3O_4 (Dichte $\sim 6,1\text{ g/cm}^3$, Dicke $> 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), und ihr geringer Schutz führt zu einer etwa 10-fachen Erhöhung der Korrosionsrate. Bei Beibehaltung der hohen Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{\text{IC}} \sim 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) weist Ni-basiertes WC-Hartmetall eine um etwa $60\% \pm 5\%$ verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf, sodass es sich besonders für Bereiche eignet, in denen eine hohe Korrosionsbeständigkeit und gute mechanische Eigenschaften erforderlich sind, wie etwa Offshore-Bohrkomponenten, Chemiepipelines und Papierherstellungsanlagen. Zudem hat Ni einen höheren Schmelzpunkt ($1455\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) als Co ($1495\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) und sein Erweichungsgrad ist bei einer hohen Temperatur von $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ niedriger (Härtereduzierung $< 10\% \pm 2\%$), was sein Anwendungspotenzial in korrosiven Hochtemperaturumgebungen weiter unterstützt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1.2 Analyse des Korrosionsbeständigkeitsmechanismus der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall

Der Vorteil der Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase beruht auf ihren einzigartigen elektrochemischen und physikalischen Eigenschaften. In sauren Medien (wie 0,1 M H_2SO_4 , pH $1 \pm 0,1$) bildet Ni durch einen Selbstpassivierungsmechanismus eine NiO-Schicht. Diese Schicht weist eine geringe Löslichkeit ($K_{sp} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$) und eine hohe Leitfähigkeit ($\sigma \sim 10^{-4} \text{ S/cm} \pm 10^{-5} \text{ S/cm}$) auf, wodurch die Diffusion von H^+ und Cl^- wirksam gehemmt wird und der Korrosionsstrom von $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ auf Co-Basis auf $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ reduziert wird. Eine Analyse mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass der Ni2p-Peak (ca. 854 eV $\pm 0,1$ eV) auf das Vorhandensein von NiO hinweist und seine Bindungsenergie mit dem O1s-Peak (530 eV $\pm 0,1$ eV) übereinstimmt, wodurch die chemische Zusammensetzung der Passivierungsschicht bestätigt wird. In einer Salzsprühumgebung (NaCl 5 % $\pm 0,1$ %, ISO 9227 NSS 2000 h ± 100 h) ist die NiO-Schichtdicke stabil bei 10 nm ± 1 nm, und die Gewichtsverlustrate beträgt nur 0,05 mg/cm² $\pm 0,01$ mg/cm², verglichen mit 0,12 mg/cm² bei Co-basiert $\pm 0,01$ mg/cm², was einer Abnahme von ca. 58 % ± 5 % entspricht. Darüber hinaus ist der Wärmeausdehnungskoeffizient der Ni-basierten Bindungsphase ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) besser mit dem von WC ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) vergleichbar als der von Co ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), wodurch die durch Temperaturwechselbeanspruchung (ΔT 500°C ± 10 °C) verursachten Mikrorisse verringert und indirekt die Korrosionsbeständigkeit verbessert wird.

8.3.1.3 Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zeigten, dass die NiO-Schicht des Ni-basierten WC gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt war, mit einer stabilen Dicke von 10 nm ± 1 nm, und dass kein offensichtliches Abblättern oder Reißen beobachtet wurde, während die Oberfläche des Co-basierten WC eine lose Co_3O_4 -Schicht (Dicke $> 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) mit Mikrorissen (Breite $\sim 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aufwies. Die Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigte die Kristallstruktur von NiO (kubisch-flächenzentriert, $a = 4,17 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), und seine Spitzenintensität ($2\theta \approx 37,2^\circ, 43,3^\circ$) weist auf eine hohe Kristallinität hin, die die Schutzwirkung der Passivierungsschicht verbessert. Die energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Ni-Gehalt an der Korngrenze etwa 8–10 % $\pm 0,5$ % beträgt und gleichmäßig verteilt ist, was die gute Grenzflächenbindung mit WC bestätigt.

8.3.1.4 Analyse der Faktoren, die die Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall beeinflussen

Die Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase wird von vielen Faktoren beeinflusst und muss umfassend optimiert werden, um die beste Leistung zu erzielen:

(1) Ni-Gehalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wenn der Ni-Gehalt $10\% \pm 1\%$ beträgt, ist der Korrosionsstrom $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ und die Gewichtsverlustrate wird auf $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ kontrolliert, und die Härte bleibt bei $\text{HV } 1800 \pm 30$. Wenn der Ni-Gehalt jedoch $12\% \pm 1\%$ übersteigt, führt die Zunahme der Ni-Phase zu einer erhöhten Zähigkeit (K_{IC} steigt um $5\% \pm 1\%$), aber die Härte nimmt um etwa $10\% \pm 2\%$ ab (auf $\text{HV } 1620 \pm 30$), und der Korrosionsstrom steigt leicht auf $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ aufgrund der verstärkten Erweichung der Ni-Phase (Härte $\text{HV } 150 \pm 20$).

(2) Korngröße

die WC-Korngröße beträgt $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, die Korngrenzendichte ist hoch ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) und die Gewichtsverlustrate ist niedrig ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), weil die feinen Körner den Eindringweg des korrosiven Mediums verringern. Bei einer Erhöhung der Korngröße auf $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ verringert sich die Korngrenzendichte und die Gewichtsverlustrate erhöht sich um etwa $20\% \pm 5\%$ (auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), die Lochfraßtiefe erhöht sich von $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ auf $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(3) Sintertemperatur

Beim Sintern bei $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt die Abweichung der Ni-Verteilung $< 0,1\% \pm 0,02\%$, der Korrosionsstrom i_{corr} bleibt $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ und die Gewichtsverlustrate ist stabil. Bei einer Erhöhung der Sintertemperatur auf $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ kommt es zur Ni-Seigerung (Abweichung $> 0,5\% \pm 0,1\%$), durch die Ni-Anreicherung an den Korngrenzen steigt der Korrosionsstrom um $15\% \pm 3\%$ (auf $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Gewichtsverlustrate steigt auf $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(4) Umwelt

In einer stark sauren Umgebung mit einem pH-Wert $< 2 \pm 0,1$ löst sich die NiO-Schicht teilweise auf, der Korrosionsstrom i_{corr} steigt um etwa $30\% \pm 5\%$ (auf $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Gewichtsverlustrate steigt auf $0,065 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Bei Salzsprühnebel mit einer NaCl-Konzentration von $> 5\% \pm 0,1\%$ führt die Erhöhung der Cl-Konzentration zu Lochkorrosion, und die Lochkorrosionsfläche vergrößert sich um $20\% \pm 5\%$ (von $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ auf $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$), die Gewichtsverlustrate erhöht sich auf $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(5) Oberflächenrauheit

Bei einer Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ gibt es wenige Oberflächendefekte, der Korrosionsstrom i_{corr} bleibt niedrig ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Gewichtsverlustrate beträgt $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Bei $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ nehmen Mikrorisse und Löcher zu, der Korrosionsstrom steigt um $10\% \pm 2\%$ (auf $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Lochfraßtiefe steigt auf $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Beispielsweise weist eine WC-12Ni-Probe aufgrund der hohen Sintertemperatur ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) eine Ni-Seigerung (Abweichung $0,6\% \pm 0,1\%$) auf, und die Gewichtsverlustrate in einer Salzsprühumgebung mit $5\% \pm 0,1\%$ NaCl beträgt $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, und der Korrosionsstrom i_{corr} beträgt $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Die Gewichtsverlustrate des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimierten WC-10Ni (gesintert bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) beträgt nur $0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$, Korrosionsbeständigkeit um ca. $29\% \pm 5\%$ verbessert.

8.3.1.5 Optimierung des Ni- basierten Bindephasenherstellungsprozesses

Um einen Gewichtsverlust von $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ und einen Korrosionsstrom i_{corr} von $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ zu erreichen, muss der Herstellungsprozess von Ni-basiertem WC-Hartmetall präzise gesteuert werden, um seine Korrosionsbeständigkeitsvorteile voll auszuschöpfen. Die empfohlenen Optimierungsstrategien umfassen folgende Aspekte:

(1) Zutatenoptimierung

werden hochreines Nickelpulver (Reinheit $> 99,9\% \pm 0,01\%$) und WC-Pulver (Partikelgröße $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) ausgewählt, und der Nickelgehalt wird auf $8\text{--}10\% \pm 1\%$ kontrolliert. Dieser Bereich gewährleistet ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften. Ein zu hoher Ni-Gehalt ($> 12\% \pm 1\%$) führt zu einer Zunahme der Ni-Phase, einer Abnahme der Härte um etwa $10\% \pm 2\%$ (auf $\text{HV } 1620 \pm 30$) und einer Zunahme der Zähigkeit um $5\% \pm 1\%$ (K_{IC} steigt auf $12,6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), aber der Korrosionsstrom steigt leicht an (auf $2 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$). zu niedrig ($< 8\% \pm 1\%$) führt zu unzureichender Härte ($< \text{HV } 1600 \pm 30$) und verringerter Korrosionsbeständigkeit ($i_{\text{corr}} > 2 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$). Feine WC-Körner ($0,51 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) verringern das Eindringen korrosiver Medien durch Erhöhung der Korngrenzendichte ($> 10^4\text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{ mm}^2/\text{cm}^3$), und die Gewichtsverlustrate wird auf $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ kontrolliert.

(2) Kugelmahlverfahren

Durch Nassmahlen in einer Kugelmühle (Medium ist wasserfreier Ethanol, 40 Stunden ± 1 Stunde, Kugel-Material-Verhältnis $10:1 \pm 0,5$) wird eine gleichmäßige Mischung der Pulver sichergestellt, die Abweichung in der Partikelgrößenverteilung sollte $< 0,02\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ betragen, Mikrodefekte (wie Poren, Agglomeration) verringert, eine homogene Matrix für das anschließende Sintern bereitgestellt und indirekt die Korrosionsempfindlichkeit verringert werden.

(3) Vakuumsintern

Bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Druck $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, Haltezeit $1\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$, erreichte Dichte $99,5\% \pm 0,1\%$, Porosität $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Diese Temperatur gewährleistet eine gleichmäßige Ni-Verteilung (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und vermeidet Entmischung ($> 0,5\% \pm 0,1\%$ bei $> 1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, i_{corr} -Anstieg $15\% \pm 3\%$). Das Hochvakuum reduziert die Sauerstoffinfiltration, verhindert vorzeitige NiO-Bildung oder ungleichmäßige Verteilung und hält den Gewichtsverlust gering.

(4) Nachbearbeitung

Durch heißisostatisches Pressen (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 1 Stunde $\pm 0,1$ Stunde) wurden Restporen beseitigt, die Dichte weiter verbessert (Dichtesteigerung auf $99,7\% \pm 0,1\%$), der Eindringweg korrosiver Medien verringert und die Lochfraßtiefe von $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ auf $< 2\text{ }\mu\text{m}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,5 \mu\text{m}$ reduziert .

(5) Oberflächenbehandlung

Die Oberflächenrauheit (Ra) wurde durch mechanisches Präzisionspolieren auf weniger als $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert , wodurch Mikrorisse und Löcher auf der Oberfläche reduziert wurden. Anschließend wurde eine Ultraschallreinigung ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$, $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$) verwendet, um verbleibende Verunreinigungen ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) zu entfernen und die Lochfraßfläche um $20 \% \pm 5 \%$ zu reduzieren (von $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ auf $0,0096 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$) , der Korrosionsstrom i_{corr} bleibt $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(6) Einführung von Zusatzstoffen

Durch Zugabe einer kleinen Menge Cr_3C_2 ($0,2 \% \pm 0,01 \%$) wird die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessert. Cr_3C_2 bildet bei hohen Temperaturen eine Cr_2O_3 -Schicht (Dicke $\sim 0,1 \pm 0,05 \mu\text{m}$), die in Synergie mit der NiO - Schicht den Korrosionsstrom um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (von $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ auf $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) reduziert, und die Gewichtsverlustrate bleibt $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Cr_3C_2 verfeinert außerdem die Korngröße (von $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ auf $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und erhöht die Korngrenzenfestigkeit ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

Durch die Optimierung dieser Prozessparameter wird eine gleichmäßige Bindung der Ni-basierten Bindephase und des WC gewährleistet und die Korngrenzenfestigkeit auf $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ erhöht, wodurch die Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit des Materials deutlich verbessert wird und gleichzeitig eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{\text{IC}} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) erhalten bleibt .

8.3.1.6 Prüfvorschrift für die Ni-basierte Bindungsphase von Hartmetall

Die Prüfvorschriften für Ni-basierte Bindungsphasen von Hartmetall dienen der Bewertung der Korrosionsbeständigkeit und der mechanischen Eigenschaften. Folgende Normen werden empfohlen:

(1) Salzsprühnebelprüfung

Gemäß ISO 9227 NSS sind die Bedingungen: $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$ Lösung, Temperatur $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, Dauer 2000 Stunden ± 100 Stunden, Messung des Gewichtsverlusts (Ziel $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und der Lochfraßtiefe (Ziel $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) .

(2) Säureimmersionstest

in $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) für 100 Stunden ± 10 Stunden und Testgewichtsverlust (Ziel $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und Korrosionsstromdichte (i_{corr} , Ziel $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) .

(3) Elektrochemische Prüfung

Ein Dreielektrodensystem (Arbeitselektrode: Ni-basiertes WC, Referenzelektrode: gesättigte Kalomelektrode, Hilfelektrode: Platinelektrode) wurde verwendet, um das Korrosionspotential

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(E_{corr} , Ziel $\sim 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ vs. SCE) und die Polarisationskurven bei einer Scanrate von $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$ zu messen.

8.3.1.7 Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Ni-basierten Hartmetall- Bindungsphase

(1) Härteprüfung

Nach ISO 3878, mit einem Vickers-Härteprüfgerät, Belastung $30 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$, Prüftemperatur $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Zielhärte $> \text{HV } 1800 \pm 30$.

(2) Bruchzähigkeitsprüfung

Gemäß ASTM E399, unter Verwendung der Single Edge Notched Beam (SENB)-Methode, Prüftemperatur $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Ziel- $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

(3) Hochtemperatur-Leistungstest

Die Biegefestigkeit wurde bei $1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mit der Dreipunktbiegemethode gemäß ISO 178 geprüft (Ziel $> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

8.3.1.8 Mikroskopische Analyse der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall

SEM-Beobachtung

Auflösung $< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, Analyse der NiO- Schichtdicke (Ziel $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) und Oberflächendefekte.

XPS-Analyse

Der Ni 2p-Peak (Ziel $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) wurde getestet, um die NiO- Bildung zu bestätigen.

EDS-Analyse

Messen Sie die Ni-Verteilung an den Korngrenzen (Ziel $8 \% - 10 \% \pm 0,5 \%$).

Standardlaborbedingungen mit einer Probengröße von $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ durchgeführt und ≥ 3 Mal wiederholt werden, um die Datenzuverlässigkeit sicherzustellen.

8.3.1.9 Technische Anwendungen der Ni-basierten Hartmetall- Bindephase

Dank ihrer hervorragenden Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften hat die Ni-basierte Hartmetall-Bindungsphase erhebliche Vorteile in technischen Anwendungen in verschiedenen Hochtemperatur- und Korrosionsumgebungen gezeigt. Im Folgenden sind die wichtigsten Anwendungsbereiche und Leistungen, kombiniert mit Praxisbeispielen und Daten, aufgeführt:

(1) Schiffstechnik

cm^2) in Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) und Meerwasser, $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und hohe Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsstrom $i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) , wird es häufig in Stabilisatoren und Schneidwerkzeugen für Tiefseebohrungen verwendet. Bei Tiefseebohrungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beträgt die Lebensdauer von Stabilisatoren aus WC-10Ni mehr als 3 Jahre $\pm 0,3$ Jahre, was etwa 100 % ± 5 % mehr ist als die von herkömmlichem WC-10Co (1,5 Jahre $\pm 0,2$ Jahre), und die durch Korrosion verursachten Wartungskosten werden um etwa 40 % ± 5 % reduziert. Seine hohe Härte (HV 1800 ± 30) und Zähigkeit (K_{IC} 12 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ $\pm 0,5$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$) gewährleisten Schneidleistung unter hohem Druck (> 20 MPa ± 2 MPa) und hohen Temperaturen ($> 500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

(2) Chemische Rohrleitungen und Ausrüstung

In einer sauren Umgebung (pH-Wert $< 2 \pm 0,1$, z. B. 0,1 M H_2SO_4) beträgt die Gewichtsverlustrate von Ni-basiertem WC-Hartmetall aufgrund des Schutzes durch seine NiO-Passivierungsschicht (Dicke ~ 10 nm ± 1 nm) nur 0,06 mg/cm 2 $\pm 0,01$ mg/cm 2 , besser als Edelstahl (Gewichtsverlustrate $\sim 0,1$ mg/cm 2 $\pm 0,01$ mg/cm 2). Es wird für korrosionsbeständige Beschichtungen für Ventile und Pumpen von Chemiepipelines verwendet und hat eine Lebensdauer von > 2 Jahren $\pm 0,2$ Jahren, was etwa 100 % ± 5 % länger ist als bei herkömmlichen Materialien (z. B. Edelstahl 304, Lebensdauer ~ 1 Jahr $\pm 0,1$ Jahr). In chemischen Reaktoren, die Chloride (wie etwa HCl) enthalten, sorgt WC-10Ni für Lochfraßbeständigkeit (Lochfraßtiefe < 3 $\mu\text{m} \pm 0,5$ μm) und verringert so das Risiko von Gerätelecks.

(3) Papierindustrie

Papierherstellungsanlagen (wie Mahlwalzen und -klingen) sind chloridhaltigen ($\text{NaCl} > 5$ % $\pm 0,1$ %) und heißen ($> 400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) Umgebungen ausgesetzt. Ni-basiertes WC-Hartmetall ist aufgrund seines niedrigen Korrosionsstroms ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm 2 $\pm 10^{-7}$ A/cm 2) und seiner hohen Verschleißfestigkeit (Härte $> \text{HV } 1800 \pm 30$) eine ideale Wahl. Der Gewichtsverlust von Mahlwalzen aus WC-10Ni beträgt nach 5000 h ± 500 h Dauerbetrieb nur 0,05 mg/cm 2 $\pm 0,01$ mg/cm 2 , Oberflächenverschleißtiefe < 10 $\mu\text{m} \pm 1$ μm , im Vergleich zu WC-10Co (Gewichtsverlustrate 0,12 mg/cm 2 $\pm 0,01$ mg/cm 2 , Verschleißtiefe 20 $\mu\text{m} \pm 2$ μm) verbessert die Haltbarkeit um etwa 50 % ± 5 %, wodurch die Austauschhäufigkeit und die Produktionskosten reduziert werden.

(4) Luftfahrt- und Energieausrüstung

In Triebwerkskomponenten für die Luft- und Raumfahrt (wie etwa Turbinenschaufeln) und Gasturbinendüsen weist Ni-basiertes WC-Hartmetall (wie etwa WC-10Ni mit Cr $_3$ C $_2$ 0,2 % $\pm 0,01$ %) eine thermische Ermüdungsrisslänge von $< 0,04$ mm $\pm 0,01$ mm und eine Gewichtsverlustrate von $< 0,25$ mg/cm 2 unter $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ und thermischen Zyklusbedingungen (ΔT $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) auf. $\pm 0,05$ mg/cm 2 , Lebensdauer > 5000 Stunden ± 500 Stunden, besser als die nicht optimierten 3000 Stunden ± 300 Stunden. Aufgrund seiner hohen thermischen Stabilität (Härte $> \text{HV } 1600 \pm 30$) und Oxidationsbeständigkeit eignet es sich gut für korrosive Umgebungen mit hohen Temperaturen (wie etwa SO $_2$ -Atmosphären) und reduziert die durch thermische Rissbildung verursachte Ausfallrate um etwa 45 % ± 5 %.

8.3.1.10 Anwendungsvorteile und -erweiterung von Ni-Basis-Hartmetall

Der technische Anwendungsvorteil von WC-Hartmetall auf Ni-Basis liegt in seiner umfassenden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung: um $60\% \pm 5\%$ verbesserte Korrosionsbeständigkeit, hohe Härte ($HV\ 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{IC} \approx 12\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5\ MPa \cdot m^{1/2}$) sowie Stabilität bei $1000\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$. Diese Eigenschaften machen es zu einem potenziellen Ersatz für herkömmliche Co-basierte Materialien und Edelstahl in extremen Umgebungen (wie z. B. Hochdruck in der Tiefsee, säurehaltige chemische Industrie und Hochtemperatur-Luftfahrt). In Gegenwart von Wasserdampf (Luftfeuchtigkeit $> 50\% \pm 5\%$) oder höheren Temperaturgradienten ($\Delta T\ 600\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) kann die Kombination von Mehrlagenbeschichtungen (z. B. TiN/Al_2O_3 , Dicke $5\text{--}20\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) die Leistung weiter verbessern und auf Anwendungen mit ultrahohen Temperaturen ($> 1100\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) oder hoher Zyklenzahl ($> 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) ausdehnen, wie etwa Energiegeräte der nächsten Generation.

Wirtschaftliche und ökologische Vorteile

Der Einsatz von Nickel-basiertem WC reduziert die Wartungskosten deutlich. Beispielsweise reduzieren sich die jährlichen Wartungskosten von Offshore-Bohrkomponenten um $40\% \pm 5\%$, und die Effizienz von Flugzeugkomponenten steigt um $20\% \pm 3\%$. Allerdings ist Nickel relativ teuer (etwa 1,5- bis 2-mal so teuer wie Co), und die Kosten müssen durch Optimierung des Nickelgehalts ($8\text{--}10\% \pm 1\%$) und der Prozesse (z. B. HIP-Nachbehandlung) kontrolliert werden. Umweltfreundlich reduziert die Langlebigkeit den Materialabfall und erfüllt so die Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung.

Ni-basiertes WC-Hartmetall eignet sich hervorragend für den Schiffsbau, chemische Pipelines, die Papierindustrie und die Luftfahrtenergieausrüstung. Es weist einen Gewichtsverlust von $< 0,06\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$ auf und verlängert die Lebensdauer um $50\text{--}100\% \pm 5\%$. Seine Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturstabilität erfüllen verschiedene technische Anforderungen. Seine Anwendung kann durch Beschichtungen und Legierungen zukünftig erweitert werden.

8.3.2 Einführung von Cr_3C_2 -Additiven in Hartmetall

8.3.2.1 Prinzip und technischer Überblick über die Einführung von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

Cr_3C_2 -Zusätze für Hartmetall erhöhen die Oxidationsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall deutlich, insbesondere bei hohen Temperaturen ($1000\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) und in korrosiver Umgebung (z. B. in sauerstoff- oder chloridhaltiger Atmosphäre). Die empfohlene Zugabemenge beträgt $0,2\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$. Cr_3C_2 reagiert bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff und bildet eine dichte Cr_2O_3 -Schutzschicht (Dicke $\sim 0,1\text{--}0,2\ \mu m \pm 0,05\ \mu m$, Dichte $\sim 5,2\ g/cm^3 \pm 0,1\ g/cm^3$), die Sauerstoff und korrosive Medien wirksam isoliert und die Gewichtszunahme auf $< 0,3\ mg/cm^2 \pm 0,05\ mg/cm^2$ kontrolliert, besser als $0,5\ mg/cm^2$ von nicht angereicherten Proben $\pm 0,05\ mg/cm^2$. Diese Schutzschicht verringert die Oxidationsrate (von $0,4\ mg/cm^2 \cdot h \pm 0,05\ mg/cm^2 \cdot h$ auf $< 0,2\ mg/cm^2 \cdot h \pm 0,05\ mg/cm^2 \cdot h$) und wirkt synergistisch mit der NiO-Schicht der Ni-basierten Bindungsphase, um den Korrosionsstrom (i_{corr} von 10^{-6}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cr_3C_2) weiter zu verringern. Außerdem verbessert sie die Korngrenzenfestigkeit ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) durch Verfeinerung der WC-Körner (von $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ auf $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), während die Härte ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und eignet sich daher für Hochtemperatur- und Hochlastbereiche wie Turbinenschaufeln in der Luftfahrt und Gasturbinendüsen. Darüber hinaus führt die hohe Temperaturstabilität von Cr_3C_2 (Schmelzpunkt $1890^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) dazu, dass es bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ weniger weich wird als die Co-Basis (Härteabfall $< 5\% \pm 1\%$), was die Langzeitbeständigkeit des Materials verbessert.

8.3.2.2 Analyse des Oxidations- und Korrosionsbeständigkeitsmechanismus von Cr_3C_2 -Hartmetallzusätzen

Cr_3C_2 -Additive entstehen durch seine chemische Reaktion und Mikrostrukturregulierung. In einer oxidierenden Umgebung bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ reagiert Cr_3C_2 ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1000 \text{ kJ/mol} \pm 50 \text{ kJ/mol}$) und bildet eine Cr_2O_3 -Schicht, deren niedriger Sauerstoffdiffusionskoeffizient ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$) das Eindringen von Sauerstoff wirksam blockiert und die Gewichtszunahme von $0,5 \text{ mg/cm}^2$ auf $1,5 \text{ mg/cm}^2$ reduziert. $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ bis $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, die Oxidationsbeständigkeit verbessert sich um ca. $40\% \pm 5\%$. In einem sauren Medium (wie etwa $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) oder Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) bilden die Cr_2O_3 -Schicht und die NiO-Schicht zusammen eine doppelte Schutzstruktur, der Korrosionsstrom i_{corr} wird auf $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ reduziert und die Gewichtsverlustrate wird bei $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ gehalten, im Vergleich zu $0,07 \text{ mg/cm}^2$ ohne Zusatzstoffe $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, was einer Reduzierung um etwa $29\% \pm 5\%$ entspricht. Darüber hinaus verfeinert Cr_3C_2 die Körner und stärkt die Korngrenzenbindung, verringert das Wachstum von thermischen Ermüdungsrissen (von $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auf $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und weist einen hohen Übereinstimmungsgrad des Wärmeausdehnungskoeffizienten ($10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) mit WC auf, wodurch die durch thermische Zyklen verursachte Spannungskonzentration ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) verringert wird.

8.3.2.3 Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Einführung von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) zeigten, dass nach der Zugabe von Cr_3C_2 die Cr_2O_3 -Schicht gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt war und eine stabile Dicke von $0,1\text{--}0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ aufwies, ohne sichtbares Abblättern oder Risse, während ohne Zugabe Oxidationslöcher (Durchmesser $\sim 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) auf der Oberfläche der Probe auftraten. Die Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigte die hexagonale Kristallstruktur von Cr_2O_3 ($a = 4,96 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 13,58 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$), die Spitzenintensität ($2\theta \approx 33,6^\circ, 36,2^\circ$) weist auf eine hohe Kristallinität hin, die die Stabilität der Schutzschicht verbessert. Die energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Cr-Gehalt an der Korngrenze etwa $0,5\text{--}1\% \pm 0,1\%$ beträgt und gleichmäßig verteilt ist, was die gute Grenzflächenbindung mit WC- und Ni-Phasen bestätigt. Durch Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurde der Cr 2p-Peak (etwa $576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) nachgewiesen, der mit dem O 1s-Peak ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) übereinstimmt, was die Bildung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cr₂O₃ bestätigt.

8.3.2.4 Analyse der Faktoren, die die Leistung von Cr₃C₂- Hartmetallzusätzen beeinflussen

von Hartmetall- Cr₃C₂ -Zusätzen wird von vielen Faktoren beeinflusst und muss genau kontrolliert werden:

(1) Zusatzbetrag

Bei einem Cr₃C₂ -Gehalt von 0,2 % ± 0,01 % beträgt die Gewichtszunahme < 0,3 mg/cm² ± 0,05 mg/cm² . i_{corr} sinkt um etwa 10 % ± 2 % (auf 9×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²) . Wenn der Gehalt 0,5 % ± 0,01 % übersteigt, kann sich die η-Phase (WC-Cr-Co-Verbundphase) bilden, die Härte sinkt um etwa 5 % ± 1 % (auf HV 1425 ± 30) und die Zähigkeit steigt um 3 % ± 1 % (K_{1c} steigt auf 12,4 MPa·m^{1/2} ± 0,5 MPa·m^{1/2}) , aber i_{corr} steigt auf 1,1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² .

(2) Korngröße

die WC-Korngröße beträgt 0,51 ± 0,01 μm , Cr₃C₂ ist gleichmäßig verteilt und die Gewichtsverlustrate ist gering (< 0,05 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²) . Wenn die Korngröße auf 2 ± 0,01 μm ansteigt , ist die Cr₂O₃ - Schicht diskontinuierlich und die Gewichtsverlustrate steigt um 15 % ± 3 % (auf 0,055 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²) , die Lochfraßtiefe erhöht sich von 2 ± 0,5 μm auf 3 ± 0,5 μm .

(3) Sintertemperatur

Beim Sintern bei 1450 °C ± 10 °C bildet Cr₃C₂ eine gleichmäßige feste Lösung, Gewichtszunahme < 0,3 mg/cm² ± 0,05 mg/cm² . Wenn die Temperatur auf > 1550 °C ± 10 °C steigt, verflüchtigt sich Cr (Verlust > 0,1 % ± 0,02 %), die Dicke der Cr₂O₃-Schicht verringert sich (< 0,1 ± 0,05 μm) und i_{corr} erhöht sich um 10 % ± 2 % (auf 1,1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) .

(4) Umwelt

In starker Säure mit einem pH-Wert von < 2 ± 0,1 löste sich die Cr₂O₃-Schicht teilweise auf, i_{corr} stieg um 20 % ± 3 % (auf 1,08×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) und die Gewichtsverlustrate stieg auf 0,06 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² . In NaCl > 5 % ± 0,1 % Salzsprühnebel beschleunigt Cl⁻ die Cr₂O₃ - Korrosion und die Lochfraßfläche stieg um 15 % ± 3 % (von 0,01 mm² ± 0,001 mm² auf 0,0115 mm² ± 0,001 mm²) .

(5) Oberflächenrauheit

Bei Ra < 0,05 ± 0,01 μm ist die Cr₂O₃-Schicht intakt und i_{corr} bleibt niedrig (< 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) . Bei Ra > 0,1 ± 0,01 μm nehmen die Oberflächendefekte zu, i_{corr} steigt um 8 % ± 2 % (auf 1,08×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) und die Lochfraßtiefe steigt auf 3,5 ± 0,5 μm .

Beispielsweise wies eine WC-10Ni-0,6%Cr₃C₂-Probe einen Gewichtsverlust von 0,08 mg/cm² im Salzsprühnebel auf, da Cr aufgrund der hohen Sintertemperatur (1550 °C ± 10 °C) verflüchtigt war. ± 0,01 mg/cm² i_{corr} stieg auf 1,2×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² . Die Gewichtsverlustrate des

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimierten WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ (1450°C ± 10°C, Ra < 0,05 µm ± 0,01 µm) betrug nur 0,03 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² . $i_{corr} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, antioxidative Kapazität um etwa 40 % ± 5 % erhöht.

8.3.2.5 Optimierung des Herstellungsprozesses von Hartmetall- Cr₃C₂ - Zusätzen

Um eine Massenzunahme von < 0,3 mg/cm² ± 0,05 mg/cm² und $i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ zu erreichen, muss die Zugabe von Cr₃ C₂-Additiven in Abstimmung mit dem Herstellungsprozess optimiert werden. Empfohlene Strategien sind:

(1) Zutatenoptimierung

Hochreines Cr₃C₂-Pulver (Reinheit > 99,5 % ± 0,01 % , Partikelgröße 0,5 µm ± 0,01 µm) wird ausgewählt und mit WC (Partikelgröße 0,51 µm ± 0,01 µm) und Ni-Pulver (8–10 % ± 1 %) gemischt. Der Cr₃C₂-Gehalt wird auf 0,2–0,5 % ± 0,01 % kontrolliert. Ein zu hoher Gehalt (> 0,5 % ± 0,01 %) kann die η-Phase induzieren und die Härte um 5 % ± 1 % reduzieren, während ein zu niedriger Gehalt (< 0,2 % ± 0,01 %) eine unzureichende antioxidative Wirkung hat (Gewichtszunahme > 0,4 mg/cm²) . ± 0,05 mg/cm²) .

(2) Kugelmahlverfahren

Durch Nassmahlen in einer Kugelmühle (Medium: wasserfreier Ethanol, 40 h ± 1 h, Kugel-Material-Verhältnis: 10:1 ± 0,5) wurde eine gleichmäßige Dispersion von Cr₃C₂ mit einer Abweichung der Partikelgrößenverteilung von < 0,02 µm ± 0,01 µm sichergestellt, die Agglomeration verringert (< 0,1 % ± 0,02 %) und eine homogene Matrix für die Bildung der Cr₂O₃-Schicht geschaffen.

(3) Vakuumsintern

Sintern bei 1450 °C ± 10 °C, Druck < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa, Haltezeit 1 Stunde ± 0,1 Stunde , Dichte erreicht 99,5 % ± 0,1 % , Porosität < 0,1 % ± 0,02 % . Diese Temperatur gewährleistet, dass die Cr₃C₂-Mischkristalllösung eine gleichmäßige Cr₂O₃-Schicht bildet. Bei > 1550 °C ± 10 °C verflüchtigt sich Cr, was zu einer unvollständigen Schutzschicht (Dicke < 0,1 µm ± 0,05 µm) führt .

(4) Nachbearbeitung

Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1200°C ± 10°C, 200 MPa ± 10 MPa, 1 Stunde ± 0,1 Stunde) wurden Restporositäten beseitigt, die Dichte auf 99,7 % ± 0,1 % erhöht, das Eindringen oxidierender Medien verringert und die Dicke der Cr₂O₃-Schicht auf 0,2 µm ± 0,05 µm erhöht .

(5) Oberflächenbehandlung

durch Präzisionspolieren auf 0,05 µm ± 0,01 µm kontrolliert und die Oberflächenoxide (< 0,1 % ± 0,02 %) wurden durch Ultraschallreinigung (40 kHz ± 1 kHz, 10 Min. ± 1 Min.) entfernt und die Lochfraßfläche wurde um 15 % ± 3 % (von 0,011 mm² auf 0,01 mm²) reduziert . ± 0,001 mm² bis hinunter zu 0,00935 mm² ± 0,001 mm²) , i_{corr} bleibt < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Additive Dispersionsoptimierung

Durch mechanisches Legieren (MA, 200 U/min $\pm$ 10 U/min, 10 h $\pm$ 0,5 h) wurde die Grenzflächenbindung zwischen den Cr₃C₂- und WC/Ni-Phasen verbessert, die Entmischung (< 0,05 % $\pm$ 0,01 %) verringert und die Gleichmäßigkeit der Cr₂O₃-Schicht verbessert.

Diese Verfahren gewährleisten eine gleichmäßige Cr₃C₂-Verteilung, eine Korngrenzenfestigkeit von > 200 MPa $\pm$ 20 MPa und eine gleichbleibende Härte (> HV 1500 $\pm$ 30) und Zähigkeit (K_{1c} > 12 MPa·m^{1/2} $\pm$ 0,5 MPa·m^{1/2}).

Cr₃C₂- Hartmetall – Anwendungsfall und Leistungsvergleich

Am Beispiel von WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ und WC - 10Ni beträgt die Massenzunahme der Probe mit zugesetztem Cr₃C₂ nach Oxidation bei 1000°C $\pm$ 10°C für 100 Stunden $\pm$ 10 Stunden nur 0,25 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm². $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7}$ A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm², im Vergleich zu 0,5 mg/cm² ohne Zusatz $\pm$ 0,05 mg/cm² und $1,1 \times 10^{-6}$ A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm², und die Oxidationsbeständigkeit ist um 50% $\pm$ 5% verbessert. Im Salzsprühtest (NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %, 2000 h $\pm$ 100 h) reduziert sich die Gewichtsverlustrate auf 0,03 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm², Lochfraßtiefe < 2 μ m $\pm$ 0,5 μ m, besser als 0,07 mg/cm² ohne Zusatz $\pm$ 0,01 mg/cm² und 3,5 μ m $\pm$ 0,5 μ m. Bei Anwendungen in Turbinenschaufeln für die Luftfahrt hat WC-10Ni-0,2 %Cr₃C₂ eine Lebensdauer von > 6000 Stunden $\pm$ 500 Stunden, was 20 % $\pm$ 5 % länger ist als 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden ohne Zusatz, und reduziert die Ausfallrate durch Heißrisse um etwa 30 % $\pm$ 5 %.

8.3.2.7 Anwendungserweiterung und Grenzen von Cr₃C₂-Zusätzen in Hartmetall

Durch Cr₃C₂-Zusätze ist Hartmetall hervorragend für oxidierende (z. B. 1100 °C $\pm$ 10 °C) und korrosive Umgebungen geeignet und eignet sich für Gasturbinendüsen (Lebensdauer > 10⁴ Stunden $\pm$ 10³ Stunden) und Hochtemperaturformen (Zyklen > 10⁵-mal $\pm$ 10⁴-mal). In SO₂-haltigen Atmosphären bleibt die Cr₂O₃-Schicht schützend (Gewichtszunahme < 0,35 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm²), aber in starker Säure mit einem pH-Wert < 1 $\pm$ 0,1 erhöht sich die Auflösungsrate um 15 % $\pm$ 3 % und muss in Kombination mit einer TiN-Beschichtung (Dicke 5–10 μ m $\pm$ 0,1 μ m) optimiert werden. Cr₃C₂ ist teurer (etwa 2-3 mal so viel wie WC) und die Zugabemenge muss kontrolliert werden (0,2–0,5 % $\pm$ 0,01 %), um ein Gleichgewicht zwischen Leistung und Wirtschaftlichkeit zu finden.

8.3.2.8 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Einführung von Cr₃C₂-Additiven in Hartmetall

Um den Cr₃C₂-Effekt zu verbessern, kann TaC (0,1 % $\pm$ 0,01 %) hinzugefügt werden, um die thermische Stabilität der Cr₂O₃-Schicht zu erhöhen, und i_{corr} wird auf 5×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm² reduziert. Bei ultrahohen Temperaturen (> 1200 °C $\pm$ 10 °C) kann in Kombination mit einer Al₂O₃-Beschichtung (Dicke 10–15 μ m $\pm$ 0,1 μ m) die Gewichtszunahme auf 0,2 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm² und eine Härte von > HV 1600 $\pm$ 30 kontrolliert werden. Durch die Entwicklung von Nano-Cr₃C₂

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Partikelgröße $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) oder Cr-Ni-Verbundzusätzen können Oxidationsbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit künftig weiter verbessert und der Anwendungsbereich auf Geräte mit extremer Energie ausgeweitet werden.

Cr₃C₂-Zusätze (0,2 % -0,5 % $\pm 0,01$ %) reduzieren die Massenzunahme ($< 0,3 \text{ mg/cm}^2$) durch Bildung einer Cr₂O₃-Schicht (Dicke $0,1\text{--}0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) und der Korrosionsstrom ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), die Oxidationsbeständigkeit verbessert sich um $40 \% \pm 5 \%$, während die Härte ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) erhalten bleiben. Optimieren Sie den Herstellungsprozess (Zusammensetzungsoptimierung Cr₃C₂ 0,2–0,5 % $\pm 0,01$ %, Kugelmahlen 40 Stunden ± 1 Stunde, Sintern $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, HIP-Nachbehandlung, Oberflächenpolitur $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), um eine stabile Leistung zu gewährleisten. Faktoren wie Zugabemenge, Korngröße, Sintertemperatur, Umgebung und Oberflächenrauheit müssen umfassend kontrolliert werden. Es ist für Hochtemperatur- und korrosive Umgebungen geeignet. Zukünftig kann sein Anwendungsbereich durch Verbundzusätze und Beschichtungen erweitert werden.

8.3.3 Schutz der Oberflächenbeschichtung aus Hartlegierungen

8.3.3.1 Überblick über das Schutzprinzip und die Technologie der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

Oberflächenschutzbeschichtungen verbessern die Korrosions- und Temperaturbeständigkeit von Hartmetall deutlich, insbesondere bei hohen Temperaturen ($1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und in korrosiven Umgebungen (wie Säuren oder Salzsprühnebel). Empfohlene Beschichtungen sind TiN und Al₂O₃ mit einer Schichtdicke von $5\text{--}20 \pm 0,1 \mu\text{m}$, die durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD, $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD, $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) aufgebracht werden. TiN-Beschichtung (Härte $> \text{HV } 2000 \pm 50$, Dichte $\sim 5,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) mit hervorragender Verschleiß- und Oxidationsbeständigkeit, Massenzunahme $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, der Korrosionsstrom (i_{corr}) wird auf $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ reduziert. Die Al₂O₃-Beschichtung (Schmelzpunkt $2072 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Wärmeleitfähigkeit $\sim 30 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) isoliert Sauerstoff und korrosive Medien durch Bildung einer dichten Oxidschicht (Dicke $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), und die Gewichtsverlustrate wird bei $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ gehalten, besser als $0,07 \text{ mg/cm}^2$ unbeschichteter Proben $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Diese Beschichtungen arbeiten synergetisch mit Ni-basierten Bindephasen oder Cr₃C₂-Zusätzen, um Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) aufrechtzuerhalten, wodurch sie häufig in Turbinenschaufeln für die Luft- und Raumfahrt, chemischen Geräten und Schiffswerkzeugen eingesetzt werden. Zudem verringert die hohe Temperaturstabilität der Beschichtungen (TiN bis $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Al₂O₃ bis $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) den Leistungsabfall durch Temperaturwechselbeanspruchung ($\Delta T 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

8.3.3.2 Analyse des Korrosionsbeständigkeits- und Oxidationsbeständigkeitsmechanismus der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Schutzwirkung der Oberflächenbeschichtung beruht auf ihrer physikalischen Barriere und chemischen Inertheit. In einer oxidierenden Umgebung bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bildet die Al_2O_3 -Beschichtung durch Reaktion ($4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\Delta G < -1500\text{ kJ/mol} \pm 50\text{ kJ/mol}$) eine dichte Oxidschicht. Ihr niedriger Sauerstoffdiffusionskoeffizient ($D_{\text{O}} \approx 10^{-15}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-16}\text{ cm}^2/\text{s}$) begrenzt die Massenzunahme auf $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, wodurch die Oxidationsbeständigkeit um etwa $60\% \pm 5\%$ verbessert wird. Die TiN-Beschichtung reduziert Oberflächenverschleiß und Mikrorissausbreitung (von $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ auf $< 0,02\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) durch hohe Härte ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) und niedrigen Reibungskoeffizienten ($\sim 0,4 \pm 0,05$). In sauren Medien (wie etwa $0,1\text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) oder Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) isoliert die Beschichtung Cl^- und H^+ , i_{corr} wird auf $8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ reduziert und die Gewichtsverlustrate wird auf $0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ reduziert, im Vergleich zu $0,07\text{ mg/cm}^2$ für unbeschichtet $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, eine Reduzierung von etwa $43\% \pm 5\%$. Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Beschichtung entspricht dem des Substrats ($\text{TiN } 9 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), wodurch die Wärmespannung reduziert ($< 300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) und die Wärmeermüdungsbeständigkeit verbessert wird.

8.3.3.3 Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) zeigten, dass die TiN- und Al_2O_3 -Beschichtungen glatte Oberflächen und eine gleichmäßige Dicke ($5\text{--}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) ohne sichtbare Abblätterungen oder Risse aufwiesen, während auf der Oberfläche der unbeschichteten Probe Oxidationsflecken (Durchmesser $\sim 0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) auftraten. Die Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigte die kubische Kristallstruktur von TiN ($a = 4,24\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $2\theta \approx 36,7^\circ, 42,6^\circ$) und die hexagonale Struktur von Al_2O_3 ($a = 4,76\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $c = 12,99\text{ }\text{\AA} \pm 0,01\text{ }\text{\AA}$, $2\theta \approx 35,1^\circ, 43,3^\circ$), und die Spitzenintensität weist auf eine hohe Kristallinität hin. Die energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigt, dass der Ti- oder Al-Gehalt in der Beschichtung $> 95\% \pm 1\%$ beträgt und eine gute Integration mit WC/Ni an der Schnittstelle vorliegt (Dicke der Diffusionsschicht $\sim 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$). Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wird ein Ti 2p-Peak (ca. $455\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) oder ein Al 2p-Peak ($74\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) erkannt, der mit dem O 1s-Peak ($530\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) übereinstimmt und so die Bildung der Oxidschicht bestätigt.

8.3.3.4 Analyse der Faktoren, die die Oberflächenbeschichtung von Hartmetall beeinflussen

Die Wirkung des Oberflächenschutzes wird von vielen Faktoren beeinflusst und muss genau kontrolliert werden:

(1) Schichtdicke

die Dicke beträgt $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ und Gewichtsverlust $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. Wenn die Dicke $> 20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ist, steigt die innere Spannung ($> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), das Abplatzrisiko erhöht sich um $10\% \pm 2\%$ und i_{corr} steigt auf $9 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Beschichtungsart

TiN- Beschichtungen zeigen bei $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine gute Leistung (Gewichtszunahme $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), aber die Oxidation nimmt bei $> 900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu (Gewichtszunahme $> 0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$). Al_2O_3 -Beschichtungen sind bei $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ stabil (Gewichtszunahme $< 0,15\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), aber die Verschleißfestigkeit ist etwas geringer als bei TiN (Härteabnahme um $5\% \pm 1\%$).

(3) Abscheidungstemperatur

PVD $400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Gewährleistet die Haftung der TiN -Beschichtung ($> 50\text{ N/mm}^2 \pm 5\text{ N/mm}^2$), bei $> 500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt es zu thermischen Spannungsrissen (Breite $\sim 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$). CVD $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist für Al_2O_3 geeignet, aber die Matrixerweichung (Härtereduzierung von $10\% \pm 2\%$) muss optimiert werden.

(4) Umwelt

Bei einem pH-Wert $< 2 \pm 0,1$ erhöht sich die Auflösungsrate der TiN - Beschichtung um $15\% \pm 3\%$ ($i_{\text{kor}} \text{ auf } 9 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$), und Al_2O_3 ist stabil ($i_{\text{kor}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$). In $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$ Salzsprühnebel erhöht sich die Lochfraßfläche um $10\% \pm 2\%$ (von $0,01\text{ mm}^2 \pm 0,001\text{ mm}^2$ auf $0,011\text{ mm}^2 \pm 0,001\text{ mm}^2$).

(5) Oberflächenrauheit

Hohe Schichthaftung ($> 60\text{ N/mm}^2$) mit $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ N/mm}^2$, i_{corr} ist niedrig. Wenn $R_a > 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, nehmen Defekte zu, i_{corr} steigt um $7\% \pm 2\%$ (auf $8,6 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$).

Beispielsweise wurde eine WC-10Ni-Probe mit Al_2O_3 ($20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, CVD $1050\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) weist eine hohe innere Spannung, eine Ablöserate von $15\% \pm 2\%$ und einen Gewichtsverlust von $0,06\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ auf. Der Gewichtsverlust der optimierten TiN- Beschichtung ($10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, PVD $400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) beträgt nur $0,03\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, Korrosionsbeständigkeit um etwa $57\% \pm 5\%$ verbessert.

8.3.3.6 Optimierung des Vorbereitungsprozesses für den Schutz von Hartmetall-Oberflächenbeschichtungen

Um einen Gewichtsverlust von $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ und $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ zu erreichen, muss der Oberflächenbeschichtungsprozess präzise gesteuert werden. Empfohlene Strategien sind:

(1) Untergrundvorbehandlung

Die Oberflächenrauheit (R_a) von WC-10Ni wurde durch Polieren auf $0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ kontrolliert und durch Ultraschallreinigung ($40\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$, $10\text{ min} \pm 1\text{ min}$) wurden Verunreinigungen entfernt ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) und die Beschichtungshaftung verbessert ($> 60\text{ N/mm}^2 \pm 5\text{ N/mm}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Auswahl und Dicke der Beschichtung

Wählen Sie TiN (Dicke $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) oder Al_2O_3 (Dicke $10-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). TiN verwendet PVD ($400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Vorspannung $-100 \text{ V} \pm 10 \text{ V}$, Abscheidungsrate $0,5 \mu\text{m/h} \pm 0,1 \mu\text{m/h}$), Al_2O_3 verwendet CVD ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Druck $10 \text{ kPa} \pm 1 \text{ kPa}$, Abscheidungsrate $0,3 \mu\text{m/h} \pm 0,1 \mu\text{m/h}$), um innere Spannungen durch zu große Dicke ($> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) zu vermeiden.

(3) Optimierung des Abscheidungsprozesses

Bei PVD wird das Ar/ N_2 -Flussverhältnis ($1:1 \pm 0,1$) kontrolliert, um die Reinheit der TiN-Phase ($> 98\% \pm 1\%$) sicherzustellen. Bei CVD wird H_2 ($5\% \pm 0,5\%$) hinzugefügt, um die Dichte von Al_2O_3 (Porosität $< 0,05\% \pm 0,01\%$) zu verbessern und die Sauerstoffdiffusion zu verringern.

(4) Nachbearbeitung

Durch Niedertemperaturglühen ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden) werden Restspannungen ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) abgebaut und die Bindung zwischen Beschichtung und Substrat verbessert (Grenzflächenscherfestigkeit $> 50 \text{ N/mm}^2$) $\pm 5 \text{ N/mm}^2$.

(5) Mehrschichtbeschichtung

Die Kombination einer Doppelschichtstruktur aus TiN ($5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) + Al_2O_3 ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), TiN sorgt für Verschleißfestigkeit, Al_2O_3 verbessert die Oxidationsbeständigkeit, i_{corr} sinkt auf $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ und die Gewichtsverlustrate beträgt $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(6) Oberflächenveredelung

Durch Ionenstrahlpolieren (Energie $500 \text{ eV} \pm 50 \text{ eV}$) wurde R_a auf $0,03 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ optimiert, Mikrorisse reduziert und die Lochfraßfläche um $10\% \pm 2\%$ (von $0,011 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ auf $0,0099 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$) verringert.

Diese Verfahren gewährleisten eine homogene Beschichtung mit einer Haftung von $> 60 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$ unter Beibehaltung der Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{1c} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Technische Anwendungsfälle und Leistungsvergleich von Hartmetall-Oberflächenbeschichtungen

von WC-10Ni-TiN ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und unbeschichtetem WC-10Ni ergab sich nach Oxidation bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ über 100 Stunden ± 10 Stunden eine Zunahme der TiN-Beschichtungsprobe um $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, im Vergleich zu $0,5 \text{ mg/cm}^2$ für unbeschichtete $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ und $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, und die Oxidationsbeständigkeit verbesserte sich um $70\% \pm 5\%$. Im Salzsprühtest ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$) verringert sich die Gewichtsverlustrate auf $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Lochfraßtiefe auf $< 1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, besser als $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Bei Turbinenschaufeln für Flugzeuge beträgt die Lebensdauer von TiN-beschichteten Proben $> 7000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$, was $40\% \pm 5\%$ länger ist als die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unbeschichteten 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden, und die thermische Rissausfallrate verringert sich um etwa 35 % $\pm$ 5 %.

8.3.3.8 Anwendungserweiterung und Grenzen von Hartmetall-Oberflächenbeschichtungen

Durch die Oberflächenbeschichtung weist Hartmetall eine gute Leistung bei Oxidationen bei hohen Temperaturen (z. B. 1100 °C $\pm$ 10 °C) und in korrosiven Umgebungen auf und ist für Gasturbinendüsen (Lebensdauer $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) und Tiefseebohrer (Druckfestigkeit > 30 MPa ± 2 MPa) geeignet. In der Atmosphäre bleiben Al_2O_3 -Beschichtungen schützend (Gewichtszunahme $< 0,2$ mg/cm² $\pm 0,05$ mg/cm²), aber die Auflösungsrate von TiN in starker Säure mit einem pH-Wert $< 1 \pm 0,1$ steigt um 20 % ± 3 % und muss in Kombination mit Al_2O_3 optimiert werden. Die Kosten des Beschichtungsprozesses sind relativ hoch (etwa das 2- bis 3-fache des Substrats) und die Wirtschaftlichkeit muss durch ein Dünnschichtdesign (5-10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) kontrolliert werden.

8.3.3.9 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

Um den Beschichtungseffekt zu verbessern, kann eine TiN/ Al_2O_3 -Gradientenbeschichtung (Dicke 15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) entwickelt werden, und i_{corr} wird auf 6×10^{-7} A/cm² $\pm 10^{-8}$ A/cm² reduziert. Bei ultrahohen Temperaturen (> 1200 °C ± 10 °C) wird ZrO_2 (5 % $\pm 0,5$ %) hinzugefügt, um die thermische Stabilität zu verbessern, mit einer Gewichtszunahme von $< 0,15$ mg/cm² $\pm 0,05$ mg/cm², Härte $> \text{HV } 1900 \pm 30$. Zukünftig können Plasmaspritzen (Temperatur 800 °C ± 10 °C) oder Nanobeschichtung (Partikelgröße $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) eingesetzt werden, um die Haftung und Haltbarkeit zu verbessern und den Einsatz auf extreme Anwendungen in der Luftfahrt und Energieausrüstung auszuweiten.

Oberflächenbeschichtungen (z. B. TiN 5–10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Al_2O_3 10–15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) reduzieren den Gewichtsverlust ($< 0,04$ mg/cm²) durch Bildung einer Schutzschicht (Dicke $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) $\pm 0,01$ mg/cm²) und den Korrosionsstrom ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}$ A/cm² $\pm 10^{-8}$ A/cm²), erhöhen die Oxidationsbeständigkeit um 60 % ± 5 %, die Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und die Zähigkeit ($K_{\text{IC}} > 12$ MPa·m^{1/2} $\pm 0,5$ MPa·m^{1/2}) Optimieren Sie den Vorbereitungsprozess (Substratvorbehandlung $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, PVD/CVD-Beschichtung, Niedertemperaturglühen, Mehrschichtaufbau), um eine stabile Leistung zu gewährleisten. Schichtdicke, -typ, Beschichtungstemperatur, Umgebung und Oberflächenrauheit müssen umfassend kontrolliert werden. Das Produkt ist für hohe Temperaturen und korrosive Umgebungen geeignet. Zukünftig können Gradientenbeschichtungen und Nanotechnologie eingesetzt werden, um die Anwendung weiter zu erweitern.

8.3.4 Optimierung der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.1 Übersicht über Prinzipien und Technologien zur Prozessparameteroptimierung für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

Die Optimierung der Prozessparameter ist ein wichtiges Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall. Durch die präzise Steuerung von Temperatur, Druck, Zeit und weiteren Parametern im Herstellungsprozess wird der synergistische Effekt der Ni-basierten Bindephase, der Cr_3C_2 -Additive und der Oberflächenbeschichtung verstärkt. Zu den empfohlenen Optimierungsparametern gehören eine Sintertemperatur von $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ein Druck von $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, eine Kugelmahlzeit von $40\text{ Stunden} \pm 1\text{ Stunde}$ und eine Heiisostatische Presstemperatur (HIP) von $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach der Optimierung dieser Parameter verringert sich die Gewichtsverlustrate des Hartmetalls auf $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, der Korrosionsstrom (i_{corr}) auf $< 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, die Härte bleibt $> \text{HV } 1800 \pm 30$, die Zähigkeit $> 12\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Der optimierte Prozess reduziert Mikrodefekte (wie Porosität $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$) und Phasensegregation ($< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$) und verbessert die Korngrenzenfestigkeit ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$). Dadurch eignet sich das Verfahren hervorragend für hohe Temperaturen ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und korrosive Umgebungen (wie $\text{NaCl } 5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$) und eignet sich für Offshore-Bohrungen, Flugzeugturbinen und chemische Anlagen. Darüber hinaus reduziert der optimierte Prozess die durch Temperaturwechselbeanspruchung (ΔT $500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) verursachte Spannungskonzentration ($< 300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) und verlängert so die Lebensdauer.

8.3.4.2 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und des Leistungsmechanismus der Prozessparameteroptimierung von Hartmetall

Der Kern der Prozessparameteroptimierung liegt in der Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und der Phasenverteilung. Beim Sintern bei $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bildet die Ni-basierte Bindephase eine gleichmäßige feste Lösung mit WC (Ni-Verteilungsabweichung $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$), die NiO-Schichtdicke stabilisiert sich bei $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ und i_{corr} reduziert sich auf $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$. Durch Kugelmahlen über $40\text{ Stunden} \pm 1\text{ Stunde}$ werden die Körner verfeinert ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), die Korngrenzendichte auf $> 10^4\text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{ mm}^2/\text{cm}^3$ erhöht, das Eindringen korrosiver Medien verringert und die Gewichtsverlustrate beträgt $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. HIP $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eliminiert die Restporosität ($< 0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), die Dichte erreicht $99,7\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$ und verbessert die Oxidationsbeständigkeit (Massenzunahme $< 0,25\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$). Bei der Hochtemperaturoxidation ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) verringerten die optimierten Parameter die Verflüchtigung von Cr_3C_2 (Verlust $< 0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), die Schichtdicke von Cr_2O_3 blieb bei $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ und die Oxidationsbeständigkeit verbesserte sich um ca. $45\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$. Durch die Anpassung der Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) wurden thermische Ermüdungsrisse ($< 0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) verringert und die Langzeitstabilität verbessert.

8.3.4.3 Mikroskopische Analyse und Verifizierung der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) zeigten, dass die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Proben des optimierten Prozesses gleichmäßige Körner ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und eine Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ aufwiesen, während die nicht optimierten Proben (gesintert bei $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) Entmischungszonen (Durchmesser $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aufwiesen. Eine Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigte, dass die Spitzenintensitäten der WC-Phase ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$) und der Ni-Phase ($2\theta \approx 44,5^\circ$) gleichmäßig waren, was auf eine optimierte Phasenverteilung hindeutet. Energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigte, dass die Ni- und Cr-Gehalte an den Korngrenzen $8-10 \% \pm 0,5 \%$ bzw. $0,5-1 \% \pm 0,1 \%$ betrugen, ohne erkennbare Entmischung. Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurden der Ni2p-Peak ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) und der Cr2p-Peak ($576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) nachgewiesen, die mit dem O1s-Peak ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) übereinstimmten, wodurch die Bildung von NiO- und Cr₂O₃-Schichten bestätigt wurde.

8.3.4.4 Analyse der Faktoren, die die Prozessparameteroptimierung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Wirkung der Prozessparameteroptimierung wird von vielen Faktoren beeinflusst und muss genau kontrolliert werden:

(1) Sintertemperatur

Bei $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt die Abweichung der Ni-Verteilung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Bei $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt die Ni-Seigerung $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, i_{corr} steigt um $15 \% \pm 3 \%$ (auf $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Gewichtsverlustrate erhöht sich auf $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(2) Kugelmahlzeit

Bei 40 Stunden ± 1 Stunde beträgt die Korngröße $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und die Gewichtsverlustrate beträgt $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Bei < 30 Stunden ± 1 Stunde werden die Körner vergrößert ($> 0,7 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und die Gewichtsverlustrate steigt um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $0,044 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$).

(3) Druck

Bei einem Vakuum von $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ und einem Sauerstoffgehalt von $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ beträgt die Massenzunahme $< 0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Bei einem Druck von $> 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ beträgt die Oxidationsgewichtszunahme $20 \% \pm 3 \%$ (bis $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(4) HIP-Temperatur

Bei $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ beträgt die Dichte $99,7 \% \pm 0,1 \%$ und die Lochfraßtiefe beträgt $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Bei $> 1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ erweicht die Matrix (die Härte nimmt um $5 \% \pm 1 \%$ ab) und i_{corr} steigt auf $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(5) Umgebungsfeuchtigkeit

Bei einer Luftfeuchtigkeit von $> 50 \% \pm 5 \%$ wird die Oberflächenoxidation beschleunigt und i_{corr} erhöht sich um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $8,8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), was mit einer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtungsoptimierung kombiniert werden muss.

Beispielsweise wurde eine WC-10Ni-Probe bei $1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ und $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ gesintert, mit einem Gewichtsverlust von $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} erreicht $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Die Gewichtsverlustrate des optimierten Prozesses ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, HIP $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) wird auf $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ reduziert. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, Korrosionsbeständigkeit um etwa $62 \% \pm 5 \%$ verbessert.

8.3.4.5 Optimierungsstrategie der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

Um einen Gewichtsverlust von $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und einen $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ zu erreichen, müssen die Prozessparameter präzise kontrolliert werden. Empfohlene Strategien umfassen:

(1) Pulververhältnis und Kugelmahlen

WC- (Partikelgröße $0,51 \pm 0,01 \mu\text{m}$), Ni- ($8-10 \% \pm 1 \%$) und Cr_3C_2 -Pulver ($0,2-0,5 \% \pm 0,01 \%$) wurden ausgewählt und in einer Nasskugelmühle gemahlen (wasserfreies Ethanolmedium, 40 Stunden ± 1 Stunde, Kugel-Material-Verhältnis $10:1 \pm 0,5$). Die Abweichung der Partikelgrößenverteilung betrug $< 0,02 \pm 0,01 \mu\text{m}$, und die Agglomeration wurde reduziert ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

(2) Vakuumsintern

Temperatur $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, Druck $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, Haltezeit 1 Stunde $\pm 0,1$ Stunde, Dichte $99,5 \% \pm 0,1 \%$, Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Entmischung durch $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ vermeiden.

(3) Heißisostatisches Pressen (HIP)

Bei einer Temperatur von $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, einem Druck von $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ und einer Zeit von 1 Stunde $\pm 0,1$ Stunde erhöhte sich die Dichte auf $99,7 \% \pm 0,1 \%$, die Porosität wurde beseitigt ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) und die Lochfraßtiefe wurde auf $< 1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ reduziert.

Glühbehandlung : Durch Glühen bei niedriger Temperatur ($500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden) werden Spannungen abgebaut ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) und die Korngrenzenfestigkeit verbessert ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

(4) Umweltkontrolle

Halten Sie während des Sinterns und HIP die Luftfeuchtigkeit $< 10 \% \pm 1 \%$ und den Sauerstoffgehalt $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ aufrecht, um die Oberflächenoxidation (Gewichtszunahme $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) zu verringern.

(5) Prozessüberwachung

Mithilfe einer Online-Temperaturüberwachung (Genauigkeit $\pm 5^{\circ}\text{C}$) und Drucksensoren (Genauigkeit $\pm 10^{-5} \text{ Pa}$) wird eine Parameterabweichung von $< 1 \%$ sichergestellt und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gleichmäßigkeit der Phasenverteilung optimiert.

Diese Parameter gewährleisten eine dichte Mikrostruktur mit einer Korngrenzenfestigkeit von $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, wobei die Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) erhalten bleiben.

8.3.4.6 Technische Fälle und Leistungsvergleich der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

des optimierten Prozesses WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und des nicht optimierten WC-10Ni ergab sich nach Oxidation bei $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ für 100 Stunden ± 10 Stunden bei der optimierten Probe ein Anstieg von $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ im Vergleich zu $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ und $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ bei der nicht optimierten Probe, wodurch die Oxidationsbeständigkeit um 70 % verbessert wurde ± 5 %. Im Salzsprühtest (NaCl 5 % $\pm 0,1$ %, 2000 h ± 100 h) reduziert sich die Gewichtsverlustrate auf $0,02 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, die Lochfraßtiefe auf $< 1 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, besser als nicht optimierte $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ und $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Bei Fluturbinenschaufeln beträgt die Lebensdauer optimierter Proben > 8000 Stunden ± 500 Stunden, was 60 % ± 5 % länger ist als die nicht optimierten 5000 Stunden ± 500 Stunden, und die thermische Rissausfallrate wird um etwa 40 % ± 5 % reduziert.

8.3.4.7 Anwendungserweiterung und Grenzen der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

Durch den optimierten Prozess weist das Hartmetall eine gute Leistung bei ultrahohen Temperaturen ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und korrosiven Umgebungen auf und ist für Gasturbinendüsen (Lebensdauer $> 10^4$ Stunden $\pm 10^3$ Stunden) und Tiefseebohrer (Druckfestigkeit $> 30 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$) geeignet. In einer SO₂-haltigen Atmosphäre beträgt die Gewichtszunahme der optimierten Probe $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, zur Optimierung muss jedoch eine starke Säure mit einem pH-Wert $< 1 \pm 0,1$ mit einer Al₂O₃-Beschichtung kombiniert werden. Die Kosten der Prozessausrüstung sind relativ hoch (etwa 1,5- bis 2-mal so hoch wie bei herkömmlichen Verfahren) und die Kosten müssen durch Massenproduktion und Parameterstandardisierung gesenkt werden.

8.3.4.8 Optimierung der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten

Um den Effekt weiter zu verbessern, kann dynamisches Sintern (Temperaturgradient $50^\circ\text{C/cm} \pm 5^\circ\text{C/cm}$) eingeführt werden, um i_{corr} auf $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ zu reduzieren. Bei ultrahohen Temperaturen ($> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) wird der HIP-Druck auf $300 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ optimiert und die Gewichtszunahme beträgt $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, Härte $> \text{HV } 1900 \pm 30$. In der Zukunft können durch die Verwendung intelligenter Überwachungssysteme und nanoskaliger

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulver (Partikelgröße $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) Genauigkeit und Effizienz verbessert und der Anwendungsbereich auf extreme Energie- und Luftfahrtanwendungen ausgeweitet werden.

Durch Optimierung der Prozessparameter (Sintern $1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, Kugelmahlen $40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, HIP $1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) konnte der Gewichtsverlust ($< 0,04 \text{ mg/cm}^2$) durch Verfeinerung der Korngröße ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Beseitigung von Defekten (Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) deutlich reduziert werden ($\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und Korrosionsstrom ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), Oxidationsbeständigkeit um $45 \% \pm 5 \%$ erhöht, Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und Zähigkeit ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Faktoren wie Sinter Temperatur, Kugelmahlzeit, Druck, HIP-Temperatur und Umgebungsfeuchtigkeit müssen umfassend reguliert werden. Es ist für Hochtemperatur- und korrosive Umgebungen geeignet. Zukünftig können dynamische Prozesse und Nanotechnologie genutzt werden, um die Anwendungen weiter zu erweitern.

8.3.5 Mikrostrukturkontrolle von Hartmetall

8.3.5.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien zur Mikrostrukturkontrolle von Hartmetall

Die Kontrolle der Mikrostruktur ist das wichtigste Mittel zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall. Durch die präzise Kontrolle von Korngröße, Phasenverteilung und Defektdichte wird der synergistische Effekt von Ni-basierter Bindungsphase, Cr_3C_2 -Additiven und Oberflächenbeschichtung optimiert. Die empfohlenen Kontrollziele umfassen eine Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, eine Abweichung der Ni-Verteilung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ und eine Porosität $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Nach der Kontrolle verringert sich die Gewichtsverlustrate des Hartmetalls auf $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, der Korrosionsstrom (i_{corr}) verringert sich auf $< 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, die Härte bleibt erhalten bei $> \text{HV } 1800 \pm 30$, die Zähigkeit bei $> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Die Optimierung der Mikrostruktur reduziert interkristalline Korrosionspfade und thermische Ermüdungsrisse ($< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und verbessert die interkristalline Festigkeit ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). Dadurch eignet sich das Material hervorragend für hohe Temperaturen ($1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und korrosive Umgebungen (z. B. $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) und eignet sich für Tiefseebohrungen, Flugzeugturbinen und Chemiepipelines. Darüber hinaus reduziert die optimierte Mikrostruktur die durch thermische Zyklen ($\Delta T \text{ } 500 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) verursachte Spannungskonzentration ($< 250 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und verlängert so die Lebensdauer.

8.3.5.2 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und des Leistungsmechanismus der Hartmetall-Mikrostrukturregulierung

Der Kern der Mikrostrukturkontrolle liegt in der Kornverfeinerung und Phasenhomogenität. Bei einer Korngröße von $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ erhöht sich die Korngrenzendichte auf $> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$, wodurch das Eindringen korrosiver Medien verringert wird und die Gewichtsverlustrate $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ beträgt. Abweichung der Ni-Verteilung $< 0,1 \%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,02\%$ Sorgt für eine gleichmäßige Bildung einer NiO- Schicht (Dicke $\sim 10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), i_{corr} reduziert sich auf $< 7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$. Porosität $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Beseitigung von Resthohlräumen durch HIP-Prozess, Dichte erreicht $99,7\% \pm 0,1\%$, verbesserte Oxidationsbeständigkeit (Gewichtszunahme $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$). In einer oxidierenden Umgebung bei $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ verfeinert Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) die Körner und bildet eine Cr_2O_3 - Schicht (Dicke $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), die die Oxidationsbeständigkeit um etwa $50\% \pm 5\%$ verbessert. Durch die Anpassung der Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2 10 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) werden die thermischen Spannungen reduziert und die Risslänge durch thermische Ermüdung beträgt $< 0,02\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, was die Langzeitstabilität deutlich verbessert.

8.3.5.3 Mikrostrukturkontrolle und Mikroanalyse sowie Verifizierung von Hartmetall

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) zeigten, dass die Körner gleichmäßig waren ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und die Porosität nach der Regulierung $< 0,1\% \pm 0,02\%$ betrug, während die unregulierten Proben (Körner $> 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) Löcher (Durchmesser $\sim 0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) aufwiesen. Die Röntgenbeugungsanalyse (XRD) bestätigte, dass die Spitzenintensitäten der WC-Phase ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$), der Ni-Phase ($2\theta \approx 44,5^\circ$) und der Cr_3C_2 -Phase ($2\theta \approx 39,4^\circ$) gleichmäßig waren, was auf eine optimierte Phasenverteilung hindeutet. Die energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigte, dass die Ni- und Cr-Gehalte an den Korngrenzen $8\text{--}10\% \pm 0,5\%$ bzw. $0,5\text{--}1\% \pm 0,1\%$ betrugen und keine Entmischung auftrat. Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurden der Ni 2p-Peak ($854\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) und der Cr 2p-Peak ($576,5\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) nachgewiesen, die mit dem O 1s-Peak ($530\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) übereinstimmten, wodurch die Bildung von NiO- und Cr_2O_3 -Schichten bestätigt wurde.

8.3.5.4 Analyse der Faktoren, die die Mikrostruktur von Hartmetall beeinflussen

Die Wirkung der Mikrostrukturregulierung wird von vielen Faktoren beeinflusst und erfordert eine präzise Regulierung:

(1) Korngröße

$0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, Gewichtsverlust $< 0,03\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$. Wenn $> 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, nimmt die Korngrenzendichte ab und die Gewichtsverlustrate steigt um $20\% \pm 5\%$ (auf $0,036\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$), die Lochfraßtiefe nimmt von $1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ auf $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ zu.

(2) Ni-Verteilung

Bei einer Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$ ist die NiO- Schicht gleichmäßig und i_{corr} niedrig. Bei einer Abweichung $> 0,5\% \pm 0,1\%$ führt die Ni-Anreicherung zu einer Erhöhung von i_{corr} um $15\% \pm 3\%$ (auf $1,05 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), und die Gewichtsverlustrate steigt auf $0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Porosität

< 0,1 % ± 0,02 %, Dichte 99,7 % ± 0,1 %, ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit (Gewichtszunahme < 0,2 mg/cm² ± 0,05 mg/cm²). Bei > 0,5 % ± 0,02 % wird die Porenkorrosion beschleunigt und i_{corr} steigt um 10 % ± 2 % (auf 7,7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²).

(3) Sintertemperatur

Bei 1450 °C ± 10 °C ist die Mikrostruktur stabil und der Gewichtsverlust gering. Wenn die Temperatur > 1500 °C ± 10 °C beträgt, wächst die Korngröße (> 1 µm ± 0,01 µm) und i_{corr} steigt um 12 % ± 2 % (erreicht 8,4×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²).

(5) Umgebungsfeuchtigkeit

Bei einer Luftfeuchtigkeit von > 50 % ± 5 % beschleunigt sich die Oberflächenoxidation und i_{corr} steigt um 8 % ± 2 % (auf 7,6 × 10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²), und eine Luftfeuchtigkeitskontrolle ist erforderlich (< 10 % ± 1 %).

Beispielsweise hat eine WC-10Ni-Probe eine Korngröße von 2 µm ± 0,01 µm, eine Porosität von 0,6 % ± 0,02 % und eine Gewichtsverlustrate von 0,07 mg/cm² im Salzsprühnebel. ± 0,01 mg/cm², i_{corr} erreicht 1,1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm². Die Gewichtsverlustrate der optimierten Mikrostruktur (0,51 µm ± 0,01 µm, < 0,1% ± 0,02%) wird auf 0,02 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² reduziert. i_{corr} < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm², Korrosionsbeständigkeit um etwa 64 % ± 5 % verbessert.

8.3.5.5 Strategien zur Kontrolle der Hartmetall-Mikrostruktur

Um einen Gewichtsverlust < 0,03 mg/cm² ± 0,01 mg/cm² und i_{corr} < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² zu erreichen, muss die Mikrostruktur präzise kontrolliert werden. Empfohlene Strategien sind:

(1) Pulverauswahl und Kugelmahlen

WC- (Partikelgröße 0,5 ± 0,01 µm), Ni- (8–10 % ± 1 %) und Cr₃C₂- Nanopulver (0,2–0,5 % ± 0,01 %) wurden ausgewählt und nass in einer Kugelmühle gemahlen (wasserfreies Ethanolmedium, 40 Stunden ± 1 Stunde, Kugel-Material-Verhältnis 10:1 ± 0,5). Die Korngröße wurde auf 0,51 ± 0,01 µm kontrolliert und die Agglomeration reduziert (< 0,1 % ± 0,02 %).

(2) Sinterprozess

Vakuumsintern (1450 °C ± 10 °C, Druck < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa, Haltezeit 1 Stunde ± 0,1 Stunde), Ni-Verteilungsabweichung < 0,1 % ± 0,02 %, Vermeidung von Kornwachstum durch > 1500 °C ± 10 °C.

(3) Heißisostatisches Pressen (HIP)

Temperatur 1200 °C ± 10 °C, Druck 200 MPa ± 10 MPa, Zeit 1 Stunde ± 0,1 Stunde, Porosität reduziert auf < 0,1 % ± 0,02 %, Dichte 99,7 % ± 0,1 %, Lochfraßtiefe < 1 µm ± 0,5 µm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Optimierung der Phasenverteilung

Durch mechanisches Legieren (MA, 200 U/min $\pm$ 10 U/min, 10 h $\pm$ 0,5 h) wurden Ni und Cr₃C₂ gleichmäßig verteilt, die Entmischung verringert (< 0,05 % $\pm$ 0,01 %) und die Korngrenzenfestigkeit verbessert (> 200 MPa $\pm$ 20 MPa).

(5) Umweltkontrolle

Halten Sie während des Sinterns und HIP die Luftfeuchtigkeit < 10 % $\pm$ 1 % und den Sauerstoffgehalt < 0,01 % $\pm$ 0,001 % aufrecht, um die Oberflächenoxidation (Gewichtszunahme < 0,1 mg/cm²) $\pm$ 0,05 mg/cm² zu verringern.

(6) Nachglühen

Durch Niedertemperaturglühen (500 °C $\pm$ 10 °C, 2 h $\pm$ 0,1 h) werden Spannungen (< 200 MPa $\pm$ 20 MPa) abgebaut und die Mikrostruktur stabilisiert.

Diese Strategien gewährleisten feine Körner, homogene Phasenverteilung, Korngrenzenfestigkeit > 200 MPa $\pm$ 20 MPa und gleichbleibende Härte (> HV 1800 $\pm$ 30) und Zähigkeit (K_{IC} > 12 MPa·m^{1/2} $\pm$ 0,5 MPa·m^{1/2}).

8.3.5.6 Steuerungstechnik für die Mikrostruktur von Hartmetall und Leistungsvergleich

der optimierten Mikrostruktur WC-10Ni-0,2 % Cr₃C₂ – TiN (10 μ m $\pm$ 0,1 μ m) und des nicht optimierten WC-10Ni ergab sich nach Oxidation bei 1000 °C $\pm$ 10 °C für 100 Stunden $\pm$ 10 Stunden bei der optimierten Probe ein Anstieg von 0,1 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², i_{corr} < 6 $\times$ 10⁻⁷ A/cm² $\pm$ 10⁻⁸ A/cm² im Vergleich zu 0,5 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm² und 1,1 $\times$ 10⁻⁶ A/cm² $\pm$ 10⁻⁷ A/cm² bei der nicht optimierten Probe, wodurch die Oxidationsbeständigkeit um 80 % verbessert wurde. $\pm$ 5 %. Im Salzsprühtest (NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %, 2000 h $\pm$ 100 h) verringert sich die Gewichtsverlustrate auf 0,01 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm², die Lochfraßtiefe auf < 0,5 μ m $\pm$ 0,5 μ m, besser als nicht optimierte 0,07 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm² und 3,5 μ m $\pm$ 0,5 μ m. Bei Fluturbinenschaufeln beträgt die Lebensdauer optimierter Proben > 9000 Stunden $\pm$ 500 Stunden, was 80 % $\pm$ 5 % länger ist als die nicht optimierten 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden, und die thermische Rissausfallrate verringert sich um etwa 45 % $\pm$ 5 %.

8.3.5.7 Anwendungserweiterung und Grenzen der Hartmetall-Mikrostrukturkontrolle

Durch die Kontrolle der Mikrostruktur weist Hartmetall bei ultrahohen Temperaturen (> 1100 °C $\pm$ 10 °C) und korrosiven Umgebungen eine gute Leistung auf und eignet sich für Gasturbinendüsen (Lebensdauer > 10⁴ Stunden $\pm$ 10³ Stunden) und Tiefseebohrer (Druckfestigkeit > 30 MPa $\pm$ 2 MPa). In einer SO₂-haltigen Atmosphäre beträgt die Gewichtszunahme der optimierten Probe < 0,15 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², aber ein pH-Wert von < 1 $\pm$ 0,1 erfordert eine Optimierung der Al₂O₃-Beschichtung in starker Säure. Der Kontrollprozess erfordert eine hohe Gerätepräzision (etwa doppelt so teuer wie herkömmliche Verfahren) und die Kosten müssen durch Automatisierung und Massenproduktion gesenkt werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.5.8 Richtung und Zukunftsaussichten der Kontrolle und Optimierung der Hartmetall-Mikrostruktur

Um den Effekt weiter zu verbessern, kann Plasmasintern (SPS, Temperatur $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, Druck $50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) eingeführt werden, um i_{korrt} bis $4 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$. Bei ultrahohen Temperaturen ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) wird die Korngröße auf $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ optimiert und die Gewichtszunahme beträgt $< 0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, Härte $> \text{HV } 1900 \pm 30$. Durch die Verwendung von Nanopulvern (Partikelgröße $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und intelligenter mikroskopischer Erkennung kann die Regelgenauigkeit künftig verbessert und der Anwendungsbereich auf extreme Energie- und Luftfahrtanwendungen ausgeweitet werden.

Die Kontrolle der Mikrostruktur (Korngröße $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, Abweichung der Ni-Verteilung $< 0,1\% \pm 0,02\%$, Porosität $< 0,1\% \pm 0,02\%$) reduziert den Gewichtsverlust ($< 0,03\text{ mg/cm}^2$) durch Verfeinerung der Körner und Optimierung der Phasenverteilung ($\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$) und des Korrosionsstroms ($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$), die Oxidationsbeständigkeit wird um $50\% \pm 5\%$ erhöht, die Härte ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) und die Zähigkeit ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Korngröße, Ni-Verteilung, Porosität, Sintertemperatur und Umgebungsfeuchtigkeit müssen umfassend reguliert werden. Es ist für hohe Temperaturen und korrosive Umgebungen geeignet. Zukünftig können Plasmaprozesse und Nanotechnologie die Anwendungsmöglichkeiten erweitern.

8.4 Prüfung und Bewertung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.4.1 Korrosionsrate von Hartmetall (Elektrochemische Tafel-Kurve)

Überblick über das Prinzip und die Technologie der Hartmetallkorrosionsrate

Die Korrosionsrate wird mit der elektrochemischen Tafel-Kurve (gemäß ASTM G59) gemessen. Die Korrosionsstromdichte ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$) wird verwendet, um die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in korrosiven Umgebungen wie Säuren ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), Salzsprühnebel ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) und Meeresumgebungen zu quantifizieren. Die Tafel-Kurve basiert auf der folgenden Formel:

$$\eta = b \cdot \log \left(\frac{i}{i_{\text{korrt}}} \right)$$

Dabei ist η die Überspannung (Genauigkeit $\pm 0,01\text{ V}$), b die Tafel-Steigung (etwa $0,1\text{ V/Dekade} \pm 0,01\text{ V/Dekade}$), i die Stromdichte (Genauigkeit $\pm 10^{-9}\text{ A/cm}^2$) und i_{korrt} ist die Korrosionsstromdichte. Niedrige i_{korrt} und hohes Korrosionspotential ($E_{\text{korrt}} > 0,2\text{ V} \pm 0,02\text{ V vs. SCE}$) weisen auf eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit hin. Der Test verwendet ein Dreielektrodensystem (Arbeitselektrode: Hartmetall, z. B. WC10Ni, Referenzelektrode: gesättigte Kalomelektrode SCE, Hilfelektrode: Platinelektrode), einen Elektrolyten mit $3,5\% \pm 0,1\% \text{ NaCl}$ oder $0,1\text{ M} \pm 0,01\text{ M H}_2\text{SO}_4$ und ist mit einer hochpräzisen elektrochemischen Messstation

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ausgestattet (Potentialgenauigkeit $\pm 0,001$ V, Stromgenauigkeit $\pm 10^{-9}$ A). Beispielsweise beträgt i_{corr} von WC10Ni in NaCl-Lösung etwa 10^{-6} A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm², und E_{corr} beträgt etwa 0,1 V $\pm$ 0,02 V, was deutlich besser ist als 10^{-5} A/cm² $\pm$ 10^{-6} A/cm² und -0,3 V $\pm$ 0,02 V von WC10Co. Dieser Abschnitt kombiniert das Tafel-Kurvenprinzip, die Testmethode und den technischen Fall, um die Methode zur Bewertung der Korrosionsrate von Hartmetall umfassend zu erörtern und eine wissenschaftliche Grundlage für die Optimierung der Korrosionsbeständigkeit zu bieten.

8.4.1.2 Mechanismus und Analyse der Korrosionsrate von Hartmetall

spiegelt die elektrochemische Reaktion von Materialien in korrosiven Medien durch Quantifizierung von E_{corr} wider und i_{corr} . Der E_{corr} von WC10Ni beträgt etwa 0,1 V $\pm$ 0,02 V, was auf die gebildete NiO-Passivierungsschicht (Dicke ~ 10 nm $\pm$ 1 nm, Dichte $\sim 6,7$ g/cm³) zurückzuführen ist, die durch chemische Inertheit ($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$) die Diffusion von H⁺ und Cl⁻ hemmt, was zu einer Verringerung von i_{corr} um etwa 50% $\pm$ 5% im Vergleich zu WC10Co führt. WC10Co hat einen höheren i_{corr} (10^{-5} A/cm² $\pm$ 10^{-6} A/cm²) und bildet aufgrund von Co-Auflösungsreaktionen ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\Delta G > 0$ kJ/mol $\pm$ 10 kJ/mol) Korrosionslöcher (Tiefe < 5 μm $\pm$ 0,5 μm). Die Zugabe von Cr₃C₂ (0,5 % $\pm$ 0,01 %) optimiert die Leistung weiter. Seine Hochtemperaturreaktion ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$) erzeugt eine Cr₂O₃-Schicht (Dicke $\sim 10\text{nm} \pm 1\text{nm}$), die mit NiO synergisiert, um i_{corr} zu reduzieren um weitere 40 % $\pm$ 5 % (auf $\sim 6 \times 10^{-7}$ A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm²). Durch Optimierung der Korngröße auf 0,5 μm $\pm$ 0,01 μm wird die Co- oder Ni-Expositionsfläche reduziert (< 10 % $\pm$ 1 %), i_{corr} um weitere 20 % $\pm$ 5 % verringert und die Korrosionsbeständigkeit deutlich verbessert.

mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1$ μm $\pm$ 0,01 μm) ergab, dass die Zahl der Korrosionslöcher bei WC10Ni gering war (Tiefe < 3 μm $\pm$ 0,5 μm), während die Tiefe der WC10Co-Löcher 5–10 μm $\pm$ 0,5 μm betrug. Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurden ein Ni2p-Peak (854 eV $\pm$ 0,1 eV) und ein Cr2p-Peak (577 eV $\pm$ 0,1 eV) nachgewiesen, die mit dem O1s-Peak (530 eV $\pm$ 0,1 eV) übereinstimmten, wodurch das Vorhandensein von NiO- und Cr₂O₃-Schichten bestätigt wurde. Energiedispersive Spektroskopie (EDS) zeigte, dass der Co-Gehalt in den Korrosionsnarben reduziert (< 5 % $\pm$ 0,5 %) und Ni und Cr angereichert (> 10 % $\pm$ 1 %) waren, was die Schutzwirkung der Passivierungsschicht bestätigt. In rauen Umgebungen mit einem pH-Wert $< 2 \pm 0,1$ oder einem NaCl-Gehalt von > 5 % $\pm$ 0,1 % kann i_{corr} auf $1,3 \times 10^{-6}$ A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm² ansteigen und muss in Kombination mit Oberflächenbeschichtungen (wie TiN) weiter optimiert werden.

8.4.1.3 Analyse der Faktoren, die die Korrosionsrate von Hartmetall beeinflussen

Die Korrosionsrate wird von vielen Faktoren beeinflusst und muss umfassend optimiert werden:

(1) Bindungsphase

Wenn der Ni-Gehalt 10 % $\pm$ 1 % beträgt, ist $i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm$ 10^{-7} A/cm²; wenn der Co-Gehalt > 12 % $\pm$ 1 % beträgt, erhöht sich i_{corr} um 50 % $\pm$ 5 % (auf $\sim 1,5 \times 10^{-5}$ A/cm² $\pm$ 10^{-6} A/cm²), weil

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co leichter oxidiert.

(2) Cr₃C₂ -Zugabemenge

0,5 % ± 0,01 %, i_{corr} nimmt um 40 % ± 5 % ab; wenn > 1 % ± 0,01 %, führt die Bildung der η -Phase zu einer Abnahme der Bruchzähigkeit (K_{IC}) um 10 % ± 2 % (auf $\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), i_{corr} steigt leicht auf $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(3) Korngröße

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, i_{corr} ist niedrig und der Gewichtsverlust beträgt $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; wenn $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nimmt die Korngrenzendichte ab, i_{corr} steigt um 20 % ± 5 % (erreicht $\sim 1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Lochfraßtiefe erhöht sich auf $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(4) Elektrolytbedingungen

Bei einem pH-Wert $< 2 \pm 0,1$ erhöht sich i_{corr} um 30 % ± 5 % (auf $\sim 1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); bei einem NaCl-Wert $> 5 \text{ g/l} \pm 0,1 \text{ g/l}$ erhöht sich die Lochfraßfläche um 20 % ± 5 % (von $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ auf $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Oberflächenrauheit

$R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, i_{corr} bleibt niedrig; wenn $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nehmen Mikrorisse zu und i_{corr} erhöht sich um 10 % ± 2 % (auf $\sim 1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

das i_{corr} einer WC12Co-Probe bei einem pH-Wert von $1 \pm 0,1$ H_2SO_4 beträgt etwa $10^{-4} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, während die von WC10Ni (Cr₃C₂-Zusatz 0,5 % ± 0,01 %, Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) nur $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ beträgt und die Korrosionsbeständigkeit um etwa das 1000-fache ± 10 % verbessert ist.

8.4.1.4 Prüfverfahren für die Korrosionsrate von Hartmetall

Um sicherzustellen, dass i_{corr} Um die Genauigkeit ($\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und die Zuverlässigkeit der Daten zu gewährleisten, werden die folgenden standardisierten Testmethoden empfohlen:

(1) Ausrüstung

Es wurde ein Dreielektrodensystem verwendet, das mit einer hochpräzisen elektrochemischen Arbeitsstation ausgestattet war (Potentialgenauigkeit $\pm 0,001 \text{ V}$, Stromgenauigkeit $\pm 10^{-9} \text{ A}$).

(2) Elektrolyt

Verwenden Sie 3,5 % ± 0,1 % NaCl oder 0,1 M ± 0,01 M H_2SO_4 , pH-Bereich $2-7 \pm 0,1$, Temperatur $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

(3) Prüfparameter

$\text{mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$, Potenzialbereich $\pm 0,25 \text{ V vs. } E_{\text{kor}}$, Testzeit $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$.

(4) 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

Poliert auf $Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$, freiliegende Fläche $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, wiederholter Test ≥ 3 Mal.

(5) Datenanalyse

i_{corr} (Genauigkeit $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) und E_{corr} (Genauigkeit $\pm 0,02 \text{ V}$) wurden durch Tafel-Anpassung berechnet, wodurch eine Wiederholbarkeit von $> 95 \% \pm 2 \%$ gewährleistet wurde.

der i_{corr} von WC10Ni ($Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$) in $3,5 \% \pm 0,1 \% \text{ NaCl}$ beträgt ungefähr $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ und der E_{corr} beträgt ungefähr $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$. Die Testergebnisse sind sehr konsistent und bestätigen die Zuverlässigkeit der Methode.

8.4.1.5 Technische Anwendung der Korrosionsrate von Hartmetall

Die elektrochemische Tafelkurvenprüfung liefert wichtige Daten für die technische Anwendung von Hartmetall:

(1) Schiffsausrüstung aus Hartmetall

WC10Ni (Korn $0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$, Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) weist in Salzsprühnebel (NaCl $5 \% \pm 0,1 \%$) einen i_{corr} von etwa $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ und eine Gewichtsverlustrate von $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ auf, Lebensdauer $> 5 \text{ Jahre} \pm 0,5 \text{ Jahre}$, besser als $3 \text{ Jahre} \pm 0,3 \text{ Jahre}$ von WC10Co, Korrosionsbeständigkeit um etwa $66 \% \pm 5 \%$ verbessert, wodurch die Wartungskosten für Offshore-Bohrungen um etwa $40 \% \pm 5 \%$ gesenkt werden.

(2) Hartlegierungs-Chemieventile

WC8Co (mit $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{ Cr}_3\text{C}_2$, $Ra < 0,05 \pm 0,01 \mu m$) hat einen i_{corr} von etwa $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ in $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, eine Lochfraßtiefe $< 2 \pm 0,5 \mu m$ und eine Lebensdauer von $> 2 \text{ Jahren} \pm 0,2 \text{ Jahren}$, was $100 \% \pm 5 \%$ länger ist als beim nicht optimierten WC8Co (Lebensdauer $\sim 1 \text{ Jahr} \pm 0,1 \text{ Jahr}$) und erfüllt die Anforderungen für die Übertragung saurer Flüssigkeiten.

(3) Ausrüstung zur Herstellung von Hartpapier

WC10Ni (Korn $0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$, TiN-Beschichtung $10 \mu m \pm 0,1 \mu m$) in Sulfatlösung $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, Gewichtsverlust $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Lebensdauer $> 4 \text{ Jahre} \pm 0,4 \text{ Jahre}$, was besser ist als bei herkömmlichen Materialien (wie Edelstahl, Lebensdauer $\sim 2 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) und die Gerätehaltbarkeit und Produktionseffizienz um etwa $50 \% \pm 5 \%$ verbessert.

Diese Fälle zeigen, dass elektrochemische Tests die Materialauswahl und Leistungsoptimierung von Hartmetall in korrosiven Umgebungen effektiv steuern und so die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit technischer Anwendungen gewährleisten.

8.4.1.6 Anwendungserweiterung und Grenzen der Hartmetallkorrosionsrate

Tafelkurventests erweitern das Anwendungspotenzial von Hartmetall in extrem korrosiven Umgebungen, wie beispielsweise starken Säuren mit einem pH-Wert $< 2 \pm 0,1$ oder einem hohen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Salzgehalt mit NaCl $> 10 \% \pm 0,1 \%$. Der i_{corr} von mit WC10Ni-TiN beschichteten Proben bleibt $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ und die Gewichtsverlustrate beträgt $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Bei hohen Temperaturen ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) oder in einer SO_2 -haltigen Atmosphäre kann es jedoch zu Oxidation oder Verunreinigung auf der Elektrodenoberfläche kommen und der i_{corr} kann um $15 \% \pm 3 \%$ ansteigen, was eine Optimierung in Kombination mit Hochtemperatur-Oxidationstests erfordert. Die Testgeräte sind relativ teuer (ca. $100.000\text{--}200.000 \pm 10.000 \text{ RMB}$), was für kleine und mittlere Unternehmen eine Einschränkung darstellen kann. Die Kosten müssen durch Standardisierung und gemeinsame Nutzung der Geräte gesenkt werden.

8.4.1.7 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Hartmetallkorrosionsrate

Zur Verbesserung der Testgenauigkeit kann die dynamische elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS, Frequenzbereich $10^{-2} \text{--} 10^5 \text{ Hz} \pm 10 \text{ Hz}$) eingesetzt werden, wodurch die i_{corr} -Genauigkeit auf $\pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ verbessert werden kann. In einer extrem korrosiven Umgebung ($\text{pH} < 1 \pm 0,1$) kann durch Optimierung des Elektrolyten (z. B. durch Zugabe von Inhibitoren) i_{corr} auf $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ gesenkt werden. In der Zukunft kann die Kombination einer KI-Analyse von Tafel-Daten mit Oberflächenmodifikationen im Nanomaßstab ($R_a < 0,03 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) die Vorhersagegenauigkeit verbessern und auf extreme Tiefseenumgebungen und Anwendungen in neuen Energieanlagen ausgeweitet werden.

Die Korrosionsrate wird mit der Tafel-Kurve (ASTM G59) $i_{\text{corr}} (< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2)$ und $E_{\text{corr}} (> 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V vs. SCE})$ gemessen und spiegelt die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in Säure und Salzsprühnebel wider. NiO- und Cr_2O_3 -Passivierungsschichten (Dicke $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) reduzieren i_{corr} um etwa $50\text{--}90 \% \pm 5 \%$, und die Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ optimiert die Leistung zusätzlich. Der Test verwendet ein hochpräzises Drei-Elektroden-System (Spannung $\pm 0,001 \text{ V}$, Stromstärke $\pm 10^{-9} \text{ A}$) und liefert Daten für Anwendungen in den Bereichen Marine (Lebensdauer $> 5 \text{ Jahre} \pm 0,5 \text{ Jahre}$), Chemie ($> 2 \text{ Jahre} \pm 0,2 \text{ Jahre}$) und Papier ($> 4 \text{ Jahre} \pm 0,4 \text{ Jahre}$). Faktoren wie Bindungsphase, Cr_3C_2 , Korngröße, Elektrolyt und Oberflächenrauheit müssen umfassend reguliert werden. Zukünftig kann die Korrosionsbeständigkeit durch EIS und Nanomodifizierung weiter verbessert werden.

8.4.2 Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

8.4.2.1 Überblick über die Prinzipien und Techniken der Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

Hochtemperaturhärte ($> \text{HV } 1200 \pm 30, 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und Thermoschockbeständigkeit (Riss $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) sind Schlüsselindikatoren zur Bewertung der Stabilität von Hartmetall in extremen Umgebungen (wie z. B. Luftfahrtwerkzeuge $> 5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$, Gussformen $> 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$), die durch den Vickers-Härtetest (gemäß ASTM E92) und den Thermoschocktest (gemäß ASTM E1876) quantifiziert werden. Diese Tests liefern zuverlässige Daten zur Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall, um sicherzustellen, dass es die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anforderungen technischer Anwendungen erfüllt, wie z. B. in der Chemieindustrie (Lebensdauer > 2 Jahre $\pm$ 0,2 Jahre), der Schifffahrt (> 5 Jahre $\pm$ 0,5 Jahre) und der Luftfahrt (> 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden). Bei hohen Temperaturen erweicht die Co-Phase (die Härte sinkt auf HV $\sim$ 200 $\pm$ 30), was zu einer Verringerung der Gesamthärte führt. Thermoschockzyklen (1000 °C bis 25 °C $\pm$ 1 °C) verursachen thermische Spannungen (> 500 MPa $\pm$ 50 MPa), die wiederum Mikrorisse bilden. Die Optimierungsstrategie verbessert die Hochtemperaturleistung erheblich, indem sie Cr₃C₂ (0,5 % $\pm$ 0,01 %) und Beschichtungen (wie TiN 5–10 μ m $\pm$ 0,1 μ m) einführt, um die Korngrenzenfestigkeit (> 200 MPa $\pm$ 20 MPa) und die thermische Stabilität zu erhöhen. Die Testausrüstung umfasst einen Hochtemperatur-Vickers-Härteprüfer (Last 10 kg $\pm$ 0,1 kg, Genauigkeit $\pm$ 30) und einen Thermoschockofen (Temperaturregelgenauigkeit $\pm$ 1 °C). Beispielsweise weist WC10Co mit einer TiN-Beschichtung (5 μ m $\pm$ 0,1 μ m) bei 1000 °C $\pm$ 10 °C eine Härte von > HV 1500 $\pm$ 30 und nach 500 $\pm$ 50 Thermoschocks eine Risslänge von 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm auf. In diesem Abschnitt werden Testprinzipien, Mechanismusanalyse und technische Fälle kombiniert, um die Bewertungsmethoden für Hochtemperaturhärte und Thermoschockverhalten umfassend zu untersuchen und wissenschaftliche Leitlinien für die Materialoptimierung bereitzustellen.

8.4.2.2 Mechanismus und Analyse der Hochtemperaturhärte und des Thermoschocktests von Hartmetall

Die Härte bei hohen Temperaturen wird maßgeblich durch die Erweichung der Bindephase beeinflusst. Bei 1000 °C $\pm$ 10 °C erweicht die Co-Phase von WC10Co aufgrund von Gittergleiten (Gleitbandbreite $\sim$ 0,5 μ m $\pm$ 0,1 μ m), und die Härte sinkt auf HV 1000 $\pm$ 30. Die Zugabe von Cr₃C₂ (0,5 % $\pm$ 0,01 %) erhöht die Korngrenzenfestigkeit (> 200 MPa $\pm$ 20 MPa) durch Cr-Diffusion (Korngrenzenkonzentration $\sim$ 5 % $\pm$ 0,5 %), und die Härte steigt um etwa 30 % $\pm$ 5 % (> HV 1300 $\pm$ 30). Die TiN-Beschichtung (Härte > HV 2000 $\pm$ 50, Schmelzpunkt 2950 °C $\pm$ 50 °C) behält eine Oberflächenhärte von > HV 1500 $\pm$ 30 bei 1000 °C $\pm$ 10 °C bei hoher thermischer Stabilität und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\sim$ 9×10^{-6} K⁻¹ $\pm$ $0,5 \times 10^{-6}$ K⁻¹), wodurch der Erweichungseffekt der Matrix verringert wird. Die Korngröße ist auf 0,5 μ m $\pm$ 0,01 μ m optimiert, wodurch die Co-Freilegungsfläche weiter reduziert (< 10 % $\pm$ 1 %), der Härteverlust um etwa 20 % $\pm$ 5 % verringert und die Hochtemperatur-Verschleißfestigkeit verbessert wird.

Thermoschockrisse entstehen durch thermische Spannungen, und ihr Ausmaß hängt eng mit den thermischen physikalischen Eigenschaften des Materials zusammen. Die thermische Spannung lässt sich mit der folgenden Formel abschätzen:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Dabei ist E der Elastizitätsmodul ($\sim$ 600 GPa $\pm$ 10 GPa), α der Wärmeausdehnungskoeffizient ($\sim$ 5×10^{-6} K⁻¹ $\pm$ $0,5 \times 10^{-6}$ K⁻¹), ΔT die Temperaturdifferenz (1000 °C $\pm$ 10 °C) und das berechnete Ergebnis beträgt etwa 300–500 MPa $\pm$ 50 MPa. Die Rissausbreitung folgt dem Pariser Gesetz ($da/dN = C \cdot \Delta K^m$), feine Körner (0,5 μ m $\pm$ 0,01 μ m) reduzieren die Ausbreitungsgeschwindigkeit (< 10^{-7} mm/Zyklus $\pm$ 10^{-8} mm/Zyklus) und die TiN-Beschichtung hemmt das Risswachstum zusätzlich (Länge < 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm). Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung < 0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m) zeigten, dass es sich bei den Rissen hauptsächlich um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

intergranulare Brüche (Breite $\sim 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) handelte und die Risse in den Proben mit TiN-Beschichtung deutlich reduziert waren. Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurde der Ti 2p-Peak ($\sim 455 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) nachgewiesen, was die thermochemische Stabilität von TiN bestätigt und mikroskopische Beweise für die Leistungssicherung in Hochtemperaturumgebungen liefert.

8.4.2.3 Analyse der Faktoren, die die Hochtemperaturhärte beeinflussen, und Thermoschocktest von Hartmetall

Die Warmhärte und Thermoschockbeständigkeit werden von vielen Faktoren beeinflusst und müssen umfassend optimiert werden:

(1) Cr_3C_2 -Zugabemenge

Bei $0,5 \% \pm 0,01 \%$ beträgt die Härte $> \text{HV } 1500 \pm 30$ und der Thermoschockriss $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; bei $> 1 \% \pm 0,01 \%$ führt die Bildung der η -Phase zu einer Verringerung der Bruchzähigkeit (K_{IC}) um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und der Thermoschockriss vergrößert sich leicht auf $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(2) Schichtdicke

Bei TiN beträgt die Dicke $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, es treten wenige Risse auf und die Abplatzrate liegt bei $< 5 \% \pm 1 \%$, bei $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ steigt die innere Spannung ($> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), die Abplatzrate steigt um $10 \% \pm 2 \%$ und die Härte sinkt um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $\text{HV } 1425 \pm 30$).

(3) Korngröße

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist die Härte hoch und die Thermoschockrissbildung gering. Wenn die Korngröße $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ist, nimmt die Korngrenzendichte ab, die Thermoschockrissbildung nimmt um $20 \% \pm 5 \%$ zu (auf $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die Härte sinkt auf $\text{HV } 1100 \pm 30$.

(4) Temperaturunterschied

Bei $\Delta T > 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ steigt die thermische Spannung und die Risslänge vergrößert sich um $50 \% \pm 5 \%$ (auf $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), bei $\Delta T < 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt die Risslänge $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(5) Wärmeleitfähigkeit

$> 80 \text{ W/mK} \pm 5 \text{ W/mK}$ (z. B. WC10Ni-TiN) verteilt sich die thermische Spannung und es treten nur wenige Risse auf. Bei Temperaturen $< 50 \text{ W/mK} \pm 5 \text{ W/mK}$ (z. B. unbeschichtetes WC10Co) nehmen die Risse um $15 \% \pm 3 \%$ zu (auf $0,055 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Beispielsweise sinkt die Härte eines bestimmten WC12Co (unbeschichtet) bei $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $\text{HV } 800 \pm 30$ und der Riss erreicht nach 500 ± 50 Thermoschocks $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; während die Härte von WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) $> \text{HV } 1500 \pm 30$ bleibt und der Riss nur $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, bei deutlicher Leistungsverbesserung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2.4 Prüfverfahren für die Hochtemperaturhärte und den Thermoschocktest von Hartmetall

Um die Testgenauigkeit und Datenkonsistenz sicherzustellen, werden die folgenden standardisierten Methoden empfohlen:

(1) Hochtemperaturhärteprüfung

Verwenden Sie einen Vickers-Härteprüfer, belasten Sie ihn mit $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, prüfen Sie die Temperatur $1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, halten Sie die Temperatur 15 Minuten ± 1 Minute, Härtegenauigkeit ± 30 , Messpunkte ≥ 5 Punkte ± 1 Punkt.

(2) Thermoschockprüfung

Es wurde ein Thermoschockofen mit einer Zyklustemperatur von $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Zyklusanzahl von > 500 Mal ± 50 Mal, einer Heiz- und Kühlrate von $10 \text{ }^{\circ}\text{C/s} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ und einer Temperaturregelgenauigkeit von $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet.

(3) Rissmessung

mittels SEM (Auflösung $< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) und die statistische Fläche betrug > 10 Flächen ± 1 Fläche.

(4) Probenvorbereitung

eine Oberflächenrauheit $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, Probengröße $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, Test ≥ 3 Mal wiederholen.

(5) Datenanalyse

Der Härtemittelwert wird berechnet (Genauigkeit ± 30) und die Risslängenstatistik (Standardabweichung $< 0,01 \text{ mm}$), wodurch eine Wiederholgenauigkeit von $> 95 \% \pm 2 \%$ gewährleistet wird.

Thermoschocks, die Risslänge von WC10Co (TiN $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) betrug $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und die Härte war $> \text{HV } 1500 \pm 30$. Die Testergebnisse waren stabil und bestätigten die Zuverlässigkeit der Methode.

8.4.2.5 Technische Anwendung des Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests von Hartmetall

Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests liefern wichtige Leistungsdaten für technische Anwendungen von Hartmetall:

(1) Hartmetall-Flugzeugwerkzeuge

WC10Co (TiN $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) hat eine Härte von $> \text{HV } 1500 \pm 30$ bei

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1000 °C ± 10 °C, einen Thermoschockriss von 0,03 mm ± 0,01 mm und eine Schnittlebensdauer von > 5000 Stunden ± 500 Stunden, was etwa 66 % ± 5 % höher ist als bei unbeschichtetem WC10Co (Lebensdauer ~3000 Stunden ± 300 Stunden), und erfüllt damit die Anforderungen der hochfesten Luftfahrtverarbeitung und reduziert die durch Thermorisse verursachte Ausfallrate um etwa 40 % ± 5 %.

(2) Hartlegierungs-Hochtemperaturform

WC8Co (Cr₃C₂0,5 % ± 0,01 %) hat eine Härte von >HV1300±30 bei 900°C±10°C, Thermoschockrisse <0,04 mm±0,01 mm und eine Lebensdauer von >10⁵-mal ± 10⁴-mal, was etwa 60 % ± 5 % höher ist als bei nicht optimiertem WC8Co (Lebensdauer ~6×10⁴-mal ± 5×10³-mal), wodurch die Haltbarkeit und Produktionseffizienz der Form verbessert werden.

(3) Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

WC10Co (Al₂O₃ 10 μm ± 0,1 μm) hat eine Härte von > HV 1400 ± 30 bei 1000°C ± 10°C, Thermoschockrisse < 0,03 mm ± 0,01 mm und eine Lebensdauer von > 10⁴ Stunden ± 10³ Stunden, was besser ist als die unbeschichtete Probe (Lebensdauer ~7000 Stunden ± 700 Stunden), eine Steigerung von etwa 43 % ± 5 %, wodurch die Langzeitstabilität der Gasturbine in Hochtemperaturumgebungen gewährleistet wird.

Diese Fälle zeigen, dass Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests eine wissenschaftliche Grundlage für die Materialentwicklung und Anwendungsoptimierung von Hartmetall bieten und die technische Leistung deutlich verbessern.

8.4.2.6 Anwendungserweiterung und Grenzen der Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests erweitern das Anwendungspotenzial von Hartmetall in Umgebungen mit ultrahohen Temperaturen (> 1100 °C ± 10 °C) und thermischen Zyklen, wie z. B. in Gasturbinendüsen (Lebensdauer > 1,5 × 10⁴ Stunden ± 10³ Stunden) und Triebwerksschaufeln für die Luft- und Raumfahrt (Thermoschock > 10⁶-fach ± 10⁴-fach). Die mit WC10Ni-Al₂O₃ beschichtete Probe hat eine Härte von > HV 1400 ± 30 und Risse < 0,02 mm ± 0,01 mm bei 1100 °C ± 10 °C und weist damit eine ausgezeichnete thermische Stabilität auf. Bei ΔT > 600 °C ± 10 °C oder in einer SO₂-haltigen Atmosphäre kann sich die Beschichtung jedoch ablösen oder oxidieren, und die Rissgröße steigt auf 0,05 mm ± 0,01 mm an. Zur Optimierung ist daher die Kombination mit Mehrschichtbeschichtungen (z. B. TiN /Al₂O₃) erforderlich . Die Kosten für die Prüfgeräte sind relativ hoch (ca. 150.000–250.000 RMB ± 10.000 RMB), was für kleine und mittlere Unternehmen eine Herausforderung darstellen kann. Die Kosten müssen durch gemeinsame Nutzung der Geräte und Prozessstandardisierung gesenkt werden.

8.4.2.7 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

Zur Leistungssteigerung kann eine Plasmaspritzbeschichtung (Temperatur 800 °C ± 10 °C, Dicke

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10–15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) aufgebracht werden, um die Härte auf $> \text{HV } 1600 \pm 30$ zu erhöhen und Thermoschockrisse auf $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ zu reduzieren. Bei ultrahohen Temperaturen ($> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) kann durch Optimierung des Cr_3C_2 -Gehalts auf $0,7 \% \pm 0,01 \%$ und Zugabe von ZrO_2 ($5 \% \pm 0,5 \%$) die Härte $> \text{HV } 1500 \pm 30$ und die Risslänge $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ aufrechterhalten werden. Durch die Kombination einer Finite-Elemente- Simulationsanalyse der thermischen Spannung und der Nanokorntechnologie (Korngröße $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) können in Zukunft die Vorhersagegenauigkeit und die Temperaturschockbeständigkeit verbessert und der Anwendungsbereich auf extreme Anwendungen in der Luftfahrt und Energieausrüstung ausgeweitet werden .

Die Hochtemperaturhärte ($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und die Wärmeschockbeständigkeit (Risse $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) werden durch Tests gemäß ASTM E92 und E1876 quantifiziert und spiegeln die Stabilität von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen wider. Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) und TiN- Beschichtung ($5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) erhöhen die Härte um etwa $30 \% \pm 5 \%$ ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) und die Korngrenzenfestigkeit ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), und eine Korngröße von $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ verringert die Rissausbreitung ($< 10^{-7} \text{ mm/Zyklus} \pm 10^{-8} \text{ mm/Zyklus}$). Der Test nutzt einen Hochtemperatur-Härteprüfer (Genauigkeit ± 30) und einen Thermoschockofen (Temperaturregelung $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), um Daten für die Luftfahrt (Lebensdauer $> 5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$), Formen ($> 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) und Gasturbinen ($> 10^4 \text{ Stunden} \pm 10^3 \text{ Stunden}$) zu liefern. Faktoren wie Cr_3C_2 -Gehalt, Beschichtungsdicke, Korngröße, Temperaturdifferenz und Wärmeleitfähigkeit müssen umfassend kontrolliert werden. Plasmabeschichtung und Nanotechnologie können die Leistung zukünftig weiter optimieren.

Verweise

Standardprüfverfahren für die Vickershärte metallischer Werkstoffe. ASTM International.

Standardprüfverfahren für dynamisches Elastizitätsmodul, Schermodul und Poissonzahl durch Impulsanregung von Schwingungen. ASTM International.

ASTM G5997. (2014). Standardprüfverfahren zur Durchführung potentiodynamischer Polarisationswiderstandsmessungen. ASTM International.

ISO 9227:2017. (2017). Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen. Internationale Organisation für Normung.

Chen, L., & Wang, Z. (2022). Einfluss der Ni-Bindephase auf die Korrosionsbeständigkeit von WC-basierten Hartmetallen. *Materials Chemistry and Physics*, 280 , 125789.

Li, X., & Zhang, Q. (2023). Untersuchung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetallen bei hohen Temperaturen. *Materials Science and Technology*, 41 (4), 567575.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 :
Vergleichende Analyse von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus
hochdichter Wolframlegierung

Hochtemperaturformen werden in Prozessen wie Warm Schmieden, Warmextrusion, Druckguss und Glasformen verwendet. Sie müssen bei hohen Temperaturen (800–1600 °C), hohem Druck (50–200 MPa) und in korrosiven Umgebungen eine hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Dimensionsstabilität aufweisen. Hochtemperaturformen aus Hartmetall verwenden Wolframkarbid (WC) als Matrix und werden aufgrund ihrer hohen Härte und Korrosionsbeständigkeit häufig im Präzisionsformguss eingesetzt. Formen aus hochdichten Wolframlegierungen bestehen hauptsächlich aus Wolfram (W) mit Nickel, Eisen oder Kupfer als Bindephase. Sie verfügen über eine hohe Dichte, hohe Festigkeit und ausgezeichnete Beständigkeit gegen Hochtemperaturverformung, wodurch sie für Anwendungen mit hoher Belastung und hohen Temperaturen geeignet sind. In den Bereichen Flugzeugdüsen (Hochtemperatur-Erosionsbeständigkeit), Elektroden für Elektrolysezellen (Korrosionsbeständigkeit) und Gasturbinenkomponenten (Verschleißfestigkeit) verwenden beide Werkstofftechnologien, ihre Leistung und Anwendungsszenarien weisen jedoch unterschiedliche Schwerpunkte auf.

In der folgenden Tabelle werden die Materialeigenschaften, der Herstellungsprozess, die Leistung, die Anwendungen und die Einschränkungen der beiden verglichen. Sie bietet eine klare Referenz für die Auswahl von Hochtemperaturformmaterialien und hebt insbesondere die einzigartigen Vorteile und Anwendungen von Formen aus hochdichten Wolframlegierungen hervor.

Projekt	Hartmetall-Hochtemperaturform (WC-Co)	Form aus Wolframlegierung mit hoher Dichte
Material Zusammensetzung	WC 85–95 Gew.-%, Co 5–15 Gew.-%, optional TiC, Cr ₃ C ₂ Zusätze	W 90–97 Gew.%, Ni/Fe/Cu 3–10 % (W-Ni-Fe oder W-Ni-Cu)
Materialeigenschaften	Härte: HV1000–1800 Dichte: 14–15 g/cm ³ Schmelzpunkt: WC 2870°C, Co begrenzt die Temperaturbeständigkeit auf ~1400°C Biegefestigkeit: 2000–2500 MPa Bruchzähigkeit: K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2} Wärmeleitfähigkeit: 80–100 W/m·K Wärmeausdehnungskoeffizient: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Härte: HV300–600 Dichte: 17–19 g/cm ³ Schmelzpunkt: W 3422°C, Temperaturbeständigkeit >1600°C Biegefestigkeit: 800–1500 MPa Bruchzähigkeit: K _{IC} 20–30 MPa·m ^{1/2} Wärmeleitfähigkeit: 100–150 W/m·K Wärmeausdehnungskoeffizient: 4,5–6×10 ⁻⁶ /°C
Herstellungsprozess	Pulvermetallurgie: ultrafeines WC/Co-Pulver (0,2–2 μm) → kaltisostatisches Pressen (CIP) → Vakuumsintern (1350–1450 °C) → Präzisionsbearbeitung (Diamantschleifen) PVD/CVD-Beschichtung (TiN, Al ₂ O ₃ , 2–20 μm), APS/DGS-Thermisches Spritzen (WC-Co, 50–500 μm) Grenzflächentechnik: Gradientenbeschichtung,	Pulvermetallurgie: W/Ni/Fe-Pulver → Pressen oder Spritzgießen → Flüssigphasensintern (1450–1550 °C) → Bearbeitung Oberflächenmodifizierung: Aufkohlen, Nitrieren oder Cr/CrN-Beschichten (5–50 μm), Thermisches Spritzen (z. B. WC-Co, 50–200 μm) Wärmebehandlung: Glühen (800–1000°C) zur Erhöhung der Zähigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Ionenimplantation	
Leistungsvorteile	Hohe Verschleißfestigkeit: Härte HV1000–1800, Beschichtung (z. B. TiAlN , Al₂O₃) reduziert den Verschleiß um 50–70 % , geeignet für hohe Reibungsbedingungen. Beim Warm Schmieden von Titanlegierungen für die Luftfahrt wird der Verschleiß um 60 % reduziert. Hervorragende Korrosionsbeständigkeit: Es widersteht Säure, Lauge, Oxidation und Korrosion durch geschmolzenes Metall, und die Korrosionsrate wird um 70 % reduziert. In Glasformungsformen widersteht es der Korrosion durch geschmolzenes Glas und erhöht die Lebensdauer um 50 %. Beibehaltung der Härte bei hohen Temperaturen: Bei 1400 °C sinkt die Härte um 10–15 % , geeignet für Präzisionsformung. Dimensionsstabilität: niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient (5–7×10⁻⁶ /°C), Maßabweichung <0,01 mm und die Präzision von Luftfahrtschmiedeteilen wird um 20 % verbessert. Anti-Ermüdungsleistung: Die Gradientenbeschichtung baut thermische Spannungen ab und erhöht die Lebensdauer um 30 %.	Extrem hohe Temperaturfestigkeit: Die Biegefestigkeit bleibt bei 1600 °C bei 800–1200 MPa, mit ausgezeichneter Kriechfestigkeit, geeignet für die Schwerlast-Extrusion. Hohe Zähigkeit: Bruchzähigkeit K_{IC} 20–30 MPa·m^{1/2} , hohe Schlagzähigkeit, Schlaggrissrate um 60 % reduziert. Hervorragende Wärmeermüdungsbeständigkeit: Hohe Wärmeleitfähigkeit (100–150 W/ m· K) , thermische Risse werden um 50 % reduziert und die Lebensdauer um 30 % erhöht. Hohe Dichte und Verformungsbeständigkeit: Dichte 17–19 g/cm³ , Verformungsrate <0,1 % , geeignet für Hochdruckformen. Gute Bearbeitbarkeit: Komplexe Formen können bearbeitet werden und der Fertigungszyklus wird um 15–20 % verkürzt.
Einschränkung	Geringe Zähigkeit (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}) , anfällig für Rissbildung Hohe Dichte (14–15 g/cm³) und schwere Hohe Herstellungskosten (Ausrüstung 10–30 Millionen RMB, Form 50–500.000 RMB) Die Temperaturbeständigkeit wird durch die Co-Phase begrenzt (<1400 °C)	Geringe Härte (HV 300–600), unzureichende Verschleißfestigkeit, Oberflächenverfestigung erforderlich Sehr hohe Dichte (17–19 g/cm³) , zusätzliches Gewicht Die Kosten für Wolframressourcen sind hoch (500.000–800.000 RMB pro Tonne). Geringe Korrosionsbeständigkeit, erfordert Schutzbeschichtung
Anwendungen und Einsatzgebiete	Luft- und Raumfahrt: Warm Schmiedegesenke (Schmiedeteile aus Titanlegierungen und Nickelbasislegierungen, 800–1200 °C), Warmfließpressgesenke (Strukturteile für die Luft- und Raumfahrt, 1000–1300 °C) Automobilbau: Druckgussformen (Aluminiumlegierungen, Magnesiumlegierungsteile, 600–800 °C), Warmprägeformen (hochfeste Stahlplatten, 700–900 °C) Energieindustrie: Warm Schmiedegesenke für Windkraftgetriebe (42CrMo-Getrieberohlinge, 800–	Luft- und Raumfahrt: Hochtemperatur-Strangpresswerkzeuge (Hochtemperaturlegierungen, Titanlegierungen, 1200–1600 °C), Warm Schmiedewerkzeuge (große Luftfahrtkomponenten, 1000–1400 °C) Energiebranche: Warmfließpresswerkzeuge für Kernkraftkomponenten (Rohre aus Zirkoniumlegierungen, 1000–1400 °C), Hochleistungs-Warm Schmiedewerkzeuge für Rohlinge von Windkraftgetriebe (800–1200 °C) Automobilbau: Hochleistungs-Warmprägewerkzeuge

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	1100 °C), Warmfließpressgesenke für Kernkraftkomponenten (1000–1200 °C) Elektronikindustrie: Glasformungsformen (optisches Glas, Handybildschirme, 1000–1300 °C), Halbleiterverpackungsformen (800–1000 °C) Metallurgische Industrie: Warm Schmiedegesenke für Nichteisenmetalle (Kupfer, Aluminiumlegierungen, 600–900 °C) Gehäuse: Heißschmiedegesenk aus Titanlegierung für die Luftfahrt, PVD- TiN- Beschichtung, Lebensdauer um 40 % verlängert, Umformungseffizienz +20 %	(ultrahochfester Stahl, 900–1100 °C) Metallurgie: Hochleistungs-Warmstrangpressmatrizen für Nichteisenmetalle (Kupfer, Aluminiumlegierungen, 800–1200 °C) Rüstungsindustrie: Gesenke zur Umformung panzerbrechender Kerne (1000–1300 °C), Warm Schmiedegesenke für hochdichte Bauteile Fall: Warmextrusionsform für Zirkoniumlegierungsrohre für Kernkraftwerke, CrN- Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1400 °C, Lebensdauer um 30 % verlängert
Schimmelpilzeffekt bei hohen Temperaturen	Verschleißfestigkeit: Beschichtungen (wie Al_2O_3 , TiAlN) reduziert den Verschleiß um 50–70 % und verlängert die Lebensdauer auf das 5000- bis 8000-fache. Beim Warm Schmieden von Titanlegierungen für die Luftfahrt (1000 °C, 100 MPa) wird die Verdammungsrate um 60 % reduziert und die Lebensdauer beträgt bis zu 8000 Mal, was besser ist als bei herkömmlichen Formen. Korrosionsbeständigkeit: Antioxidationsmittel, Säure-, Alkali- und Metallschmelzkorrosion, die Korrosionsrate wird um 70 % reduziert und der Wartungszyklus um 30 % verlängert. Beim Glasformen (1200 °C) ist es beständig gegen Schmelzglas Korrosion, die Lebensdauer wird um 50 % erhöht und es gibt keine sichtbaren Lochfraßbildungen auf der Oberfläche. Hohe Temperaturbeständigkeit: Die Härte bleibt bei 1400 °C bei HV900–1500, die Verformungsrate <0,1 %. In Halbleiterverpackungsformen (1000 °C) gewährleistet die hohe Temperaturstabilität einen Dauerbetrieb von 5000 Schaltvorgängen. Ermüdungsbeständigkeit: Die Gradientenbeschichtung baut thermische Spannungen ab, erhöht die Lebensdauer um 30 % und reduziert thermische Risse um 50 %. Beim Automobil-Aluminiumlegierungsdruckguss (700 °C) erhöht sich die Lebensdauer von 4.000-mal auf 6.000-mal. Maßgenauigkeit: Maßabweichung <0,01 mm, Verformung durch Wärmeausdehnung <0,05 % und die qualifizierte Rate fertiger Produkte um 25 % erhöht	Hohe Temperaturbeständigkeit: Verformungsrate <0,1 % bei 1600 °C, Biegefestigkeit bei 800–1200 MPa, Lebensdauer 4000–6000-mal. Bei der Extrusion von Zirkoniumlegierungsrohren aus Kernkraft (1400 °C, 150 MPa) beträgt die Lebensdauer das 6000-fache und ist damit besser als bei gewöhnlichen Stahlformen (2000-mal). Thermische Ermüdungsbeständigkeit: Eine hohe Wärmeleitfähigkeit (100–150 W/ m· K) reduziert die thermische Rissbildung um 50 % und erhöht die Lebensdauer um 30 %. Bei Hochleistungs-Warmumformung (1100 °C) reduziert sich die Riss Häufigkeit von 12 % auf 5 %. Schlagfestigkeit: Zähigkeit K_{IC} 20–30 MPa·m ^{1/2} , Schlagrissrate um 60 % reduziert. Beim Warm Schmieden von Luftfahrt-Hochtemperaturlegierungen (1200 °C, 200 MPa) reißt die Matrice nicht und die Lebensdauer erreicht 5000-mal. Maßgenauigkeit: Maßabweichung <0,015 mm, Verformung durch Wärmeausdehnung <0,08 % und die qualifizierte Rate fertiger Produkte um 20 % erhöht (85 % → 90 %). Formgebungseffizienz: Hohe Dichte und Verformungsbeständigkeit reduzieren Ausfallzeiten und steigern die Effizienz um 15–20 %. Verschleißfestigkeit (Beschichtung erforderlich): CrN- oder WC-Co-Beschichtung reduziert den Verschleiß um 40–50 % und erhöht die Lebensdauer um 20 %. Beim panzerbrechenden Kernformen (1300 °C) erhöht sich die Lebensdauer der Beschichtungsform um das 3000- bis 4000-fache.

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

	(90 % → 95 %). Formleistung: Hohe Härte und Verschleißfestigkeit reduzieren den Wartungsaufwand und erhöhen die Leistung um 20–25 %.	
--	---	--

veranschaulichen:

Materialzusammensetzung: Übersicht über die chemische Zusammensetzung von Hartmetall und hochdichter Wolframlegierung.

Materialeigenschaften: Vergleichen Sie wichtige Parameter wie Härte, Dichte, Schmelzpunkt, Festigkeit usw.

Herstellungsverfahren: fasst die Prozesse des Formens, Sinterns, der Oberflächenmodifizierung usw. zusammen.

Leistung und Einschränkungen: Analysieren Sie die Vor- und Nachteile hinsichtlich Verschleißfestigkeit, Temperaturbeständigkeit, Kosten usw.

Anwendungsszenarien: Listen Sie die Verwendungsmöglichkeiten und Fälle in der Luft- und Raumfahrt, im Energiesektor, im Automobilbau, in der Metallurgie, in der Verteidigung und in anderen Bereichen auf.

Hochtemperatur-Formeffekt: Quantifizieren Sie die Auswirkungen von Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Ermüdungsbeständigkeit, Maßgenauigkeit, Formeffizienz usw.

Vergleichende Analyse und Zusammenfassung von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus hochdichter Wolframlegierung

Hochtemperaturformen aus Hartmetall und hochdichter Wolframlegierung haben ihre eigenen Vorteile im Bereich des Hochtemperaturformens und eignen sich für verschiedene Arbeitsbedingungen und Anwendungsszenarien. WC-Co-Formen zeigen aufgrund ihrer hohen Härte (HV 1000–1800) und ausgezeichneten Verschleißfestigkeit (Verschleißrate um 50–70 % reduziert) hervorragende Leistung beim Präzisionswarmschmieden, Druckgießen und Glasformen. Sie eignen sich besonders für Szenen mit Temperaturen unter 1400 °C, hoher Präzision (Maßabweichung < 0,01 mm) und Korrosionsbeständigkeit. Ihre PVD/CVD-Beschichtung (wie TiN, Al₂O₃) und das hochenergetische thermische Spritzen (wie APS/DGS) verbessern die Leistung von Hochtemperaturformen erheblich. Beispielsweise erreicht die Lebensdauer von Warmschmiedeformen aus Titanlegierungen für die Luftfahrt das 8.000-fache, und die Effizienz wird um 25 % gesteigert. Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate um 70 % reduziert) macht es beständig gegen Erosion durch geschmolzene Materialien bei Glasformung und Halbleiterverpackung, und der Wartungszyklus verlängert sich um 30 %. WC-Co-Formen haben jedoch eine geringe Zähigkeit (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}), neigen zur Rissbildung bei starker Einwirkung und sind mit hohen Herstellungskosten (50.000–500.000 Yuan) verbunden, was ihre Anwendung in großen Formen einschränkt.

Matrizen aus hochdichten Wolframlegierungen sind für ihre extrem hohe Warmfestigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Verformungsrate $< 0,1\%$ bei $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$) und hohe Zähigkeit ($K_{IC} 20 - 30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) bekannt und eignen sich für Schwerlast- und Hochtemperatur-Strangpressen sowie Warm Schmieden. Ihre hohe Dichte ($17 - 19\text{ g/cm}^3$) und ihre verformungshemmenden Eigenschaften gewährleisten einen stabilen Betrieb der Matrize unter hohem Druck ($150 - 200\text{ MPa}$). So beträgt beispielsweise die Lebensdauer der Strangpressmatrize für Rohre aus nuklearer Zirkoniumlegierung bis zu 6000-mal, und die Effizienz wird um 20% gesteigert. Die hohe Wärmeleitfähigkeit ($100 - 150\text{ W/m}^2$) verringert die thermische Rissbildung um 50% und eignet sich für zyklische Belastungsbedingungen, wie z. B. das Schwerlast-Warmprägen von Kraftfahrzeugen.

Allerdings weisen Wolframlegierungen mit hoher Dichte eine geringe Härte (HV 300–600) und eine unzureichende Verschleißfestigkeit auf und erfordern CrN- oder WC-Co-Beschichtungen zur Leistungssteigerung. Zudem weisen sie eine schwache Korrosionsbeständigkeit auf (Schutzbeschichtungen sind erforderlich). Wolframressourcen sind knapp ($500.000 - 800.000\text{ RMB}$ pro Tonne) und eine extrem hohe Dichte erhöht Gewicht und Kosten, was die Anwendung in Leichtbauformen einschränkt.

Vorschläge zur Materialauswahl für Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus Wolframlegierungen mit hoher Dichte

Präzisions- und Kleinformen (z. B. Schmiedeteile für die Luftfahrt, Glasformen, Automobil-Druckguss)

Hartmetallmatrizen sind überlegen und weisen eine hohe Verschleißfestigkeit, Präzision und lange Lebensdauer ($5000 - 8000\text{ Mal}$) auf.

Schwerlast- und Hochtemperaturformen (z. B. Hochtemperaturrextrusion, Kernkraftkomponenten, panzerbrechendes Kernformen)

Besser geeignet sind Formen aus hochdichter Wolframlegierung mit hervorragender Verformungsbeständigkeit und hoher Zähigkeit.

Kosten- und Lebensbilanz

WC-Co-Formen weisen geringe Wartungskosten auf und eignen sich für den häufigen Einsatz. Formen aus hochdichten Wolframlegierungen weisen eine gute Verarbeitbarkeit auf und eignen sich für hohe Belastungen, erfordern jedoch eine Oberflächenverstärkung.

Ähnlich wie die technischen Anforderungen an Flugzeugdüsen (hochtemperatur-erosionsbeständige Beschichtungen), Elektrolyseurelektroden (korrosionsbeständige Beschichtungen) und Gasturbinenkomponenten (verschleißfeste Beschichtungen) beruhen beide auf Oberflächenmodifizierung und Schnittstellentechnik (wie Gradientenbeschichtungen, Ionenimplantation), um die Leistung zu optimieren.

Durch die Entwicklung von nanokörnigem WC-Co, mehrschichtigen Verbundbeschichtungen, Niedertemperatur-Sinterprozessen, verschleißfesten Beschichtungen aus hochdichten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframlegierungen und additiven Fertigungstechnologien werden Hochtemperaturformen in Zukunft ihre Leistung und Wirtschaftlichkeit in den Bereichen Luftfahrt, Energie, Automobil, Metallurgie, Landesverteidigung usw. weiter verbessern und so eine effiziente und nachhaltige industrielle Fertigung nachhaltig unterstützen.

Anhang :

Vergleichende Analyse von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM)

Hochtemperaturformen sind bei Prozessen wie Warm Schmieden, Warmextrusion, Druckguss und Glasformen extrem hohen Temperaturen (800–1800 °C), hohem Druck (50–200 MPa) und korrosiven Umgebungen ausgesetzt. Daher sind Materialien mit hervorragender Härte, Verschleißfestigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Dimensionsstabilität erforderlich. Hochtemperaturformen aus Hartmetall (WC-Co) werden aufgrund ihrer hohen Härte und Korrosionsbeständigkeit häufig im Präzisionsguss eingesetzt. Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM) eignen sich aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperaturfestigkeit und Kriechfestigkeit für Anwendungen mit ultrahohen Temperaturen und großen Formen. Beide Werkstoffe verfügen über gemeinsame Materialtechnologien in den Bereichen Flugzeugdüsen (Hochtemperatur-Erosionsbeständigkeit), Elektroden für Elektrolysezellen (Korrosionsbeständigkeit), Schneidwerkzeuge für Windkraftanlagen (Verschleißfestigkeit) usw.

Dieser Artikel bietet eine umfassende Referenz zur Materialauswahl und vergleicht Materialeigenschaften, Herstellungsverfahren, Leistungsvorteile, Anwendungsbereiche, Einschränkungen und Hochtemperatur-Formeffekte der beiden Werkstoffe. Der Inhalt der Hochtemperatur-Formeffekte wurde um detaillierte quantitative Daten und Anwendungsfälle hinsichtlich Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Ermüdungsbeständigkeit, Maßgenauigkeit und Formeffizienz erweitert. Die Anwendungsbereiche umfassen die Luft- und Raumfahrt, Energie, Automobilindustrie, Elektronik, Metallurgie und weitere Branchen.

Tabelle der Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM)

Projekt	Hartmetall-Hochtemperaturform (WC-Co)	Titan-Zirkonium-Molybdän (TZM)-Legierungsform
Material	WC 85–95 Gew.-%, Co 5–15 Gew.-%, optional TiC	Mo 99–99,5 Gew.-%, Ti 0,4–0,55 %, Zr 0,06–0,12 %
Zusammensetzung	Cr ₃ C ₂ Zusätze	Spuren von C
Materialeigenschaften	Härte: HV1000–1800	Härte: HV250–350
	Dichte: 14–15 g/cm ³	Dichte: 10,2 g/cm ³
	Schmelzpunkt: WC 2870°C, Co begrenzt die	Schmelzpunkt: ~2620°C
	Temperaturbeständigkeit auf ~1400°C	Temperaturbeständigkeit >1600°C
	Biegefestigkeit: 2000–2500 MPa	Biegefestigkeit: 800–1200 MPa
	Bruchzähigkeit: K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2}	Bruchzähigkeit: K _{IC} 15–20 MPa·m ^{1/2}
	Wärmeleitfähigkeit: 80–100 W/m·K	Wärmeleitfähigkeit: 110–140 W/m·K
Herstellungsprozess	Wärmeausdehnungskoeffizient: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Wärmeausdehnungskoeffizient: 5,3–5,5×10 ⁻⁶ /°C
	Pulvermetallurgie: ultrafeines WC/Co-Pulver (0,2–2 μm) → kaltisostatisches Pressen (CIP) → Vakuumintern (1350–1450 °C)	Pulvermetallurgie: Mo/Ti/Zr-Pulver → Heißisostatisches Pressen (HIP, 1700–2000 °C) → Schmieden/Walzen → CNC-Bearbeitung

	Präzisionsbearbeitung (Diamantschleifen) PVD/CVD-Beschichtung (TiN , Al_2O_3 , 2–20 μm) , MoSi_2 , 10–50 μm) oder Nitrierung APS/DGS-Thermisches Spritzen (WC-Co, 50–500 μm) Grenzflächentechnik: Gradientenbeschichtung, Ionenimplantation	Oberflächenmodifizierung: Oxidbeschichtung (z. B. MoSi_2 , 10–50 μm) oder Nitrierung Wärmebehandlung: Glühen (1000–1200°C) zur Erhöhung der Zähigkeit
Leistungsvorteile	Hohe Verschleißfestigkeit: Härte HV1000–1800. Beschichtungen (z. B. TiAlN , Al_2O_3) reduzieren den Verschleiß um 50–70 % und eignen sich für Bedingungen mit hoher Reibung (z. B. Warm Schmieden, Druckguss). Beim Warm Schmieden von Titanlegierungen für die Luftfahrtindustrie reduziert sich der Verschleiß um 60 %, und die Lebensdauer der Matrice beträgt das 8.000-fache. Hervorragende Korrosionsbeständigkeit: Es ist beständig gegen Säuren, Laugen, Oxidation und Schmelzkorrosion. Die Korrosionsrate wird um 70 % reduziert und der Wartungszyklus um 30 % verlängert. In Glasformungsformen ist es beständig gegen Schmelzkorrosion und seine Lebensdauer erhöht sich um 50 %. Beibehaltung der Härte bei hohen Temperaturen: Die Beschichtungstechnologie verbessert die Temperaturbeständigkeit auf 1400 °C, wobei die Härte nur um 10–15 % abnimmt, sodass sie für Präzisionsformungen (wie z. B. optisches Glas, 1000–1300 °C) geeignet ist. Dimensionsstabilität: Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ($5\text{--}7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), Maßabweichung <0,01 mm, wodurch eine hochpräzise Formgebung gewährleistet und die Genauigkeit von Schmiedeteilen für die Luftfahrt um 20 % verbessert wird. Ermüdungsbeständigkeit: Die Schnittstellentechnik (wie etwa eine Gradientenbeschichtung) verringert die thermische Spannung und erhöht die Lebensdauer um 30 %, sodass sie für zyklische Belastungsbedingungen (wie etwa beim Automobil-Druckguss) geeignet ist.	Extrem hohe Temperaturfestigkeit: Die Biegefestigkeit bleibt bei 1600–1800 °C bei 800–1000 MPa, ohne Kriechen, geeignet für die Ultrahochtemperatur-Extrusion. Die Hochtemperaturlegierungsmatrice arbeitet bei 1600 °C mit einer Lebensdauer von 6000 Umdrehungen. Hervorragende Wärmeermüdungsbeständigkeit: Die hohe Wärmeleitfähigkeit (110–140 $\text{W/m} \cdot \text{K}$) ermöglicht eine schnelle Wärmeableitung, reduziert thermische Risse um 60 % und erhöht die Lebensdauer um 25 %. In heißisostatischen Pressformen weist es eine hervorragende Wärmeschockbeständigkeit auf. Hohe Zähigkeit: Bruchzähigkeit K_{IC} 15–20 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, hohe Schlagzähigkeit, geeignet für hohe Belastungsbedingungen (wie z. B. Stanzen bei hohen Temperaturen), Schlagrissrate um 50 % reduziert. Gute Verarbeitbarkeit: Die CNC-Bearbeitung komplexer Formen ist möglich und der Formenherstellungszyklus wird um 20 % verkürzt, was für große Formen (wie z. B. Extrusionsformen für Kernkraft) geeignet ist. Dimensionsstabilität: Wärmeausdehnungskoeffizient $5,3\text{--}5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, Maßabweichung <0,02 mm, geeignet für großformatige Hochtemperaturformen (z. B. Keramikformen).
Einschränkung	Geringe Zähigkeit (K_{IC} 10–15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , anfällig für Rissbildung Hohe Dichte (14–15 g/cm^3) und schwere	Geringe Härte (HV250–350), unzureichende Verschleißfestigkeit Leicht oxidierbar (>600°C), erfordert

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

	Hohe Herstellungskosten (Ausrüstung 10–30 Millionen RMB, Form 50–500.000 RMB) Die Temperaturbeständigkeit wird durch die Co-Phase begrenzt (<1400 °C)	Schutzbeschichtung Hohe Kosten für Molybdänressourcen (200.000–300.000 RMB pro Tonne) Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen, Betrieb bei hohen Temperaturen erforderlich
Anwendungen und Einsatzgebiete	Luft- und Raumfahrt: Warm Schmiedegesenke (Schmiedeteile aus Titanlegierungen, Nickelbasislegierungen, 800–1200 °C), Warmfließpressgesenke (Strukturteile für die Luft- und Raumfahrt, 1000–1300 °C) Automobilbau: Druckgussformen (Aluminiumlegierungen, Magnesiumlegierungsteile, 600–800 °C), Warmprägeformen (hochfeste Stahlplatten, 700–900 °C) Energieindustrie: Warm Schmiedegesenke für Windkraftgetriebe (42CrMo-Getrieberohlinge, 800–1100 °C), Warmfließpressgesenke für Kernkraftkomponenten (1000–1200 °C) Elektronikindustrie: Glasformungsformen (optisches Glas, Handybildschirme, 1000–1300 °C), Halbleiterverpackungsformen (800–1000 °C) Metallurgische Industrie: Warm Schmiedegesenke für Nichteisenmetalle (Kupfer, Aluminiumlegierungen, 600–900 °C) Gehäuse: Heißschmiedegesenk aus Titanlegierung für die Luftfahrt, PVD- TiN- Beschichtung, Lebensdauer um 40 % verlängert, Umformungseffizienz +20 %	Luft- und Raumfahrt: Hochtemperatur-Strangpresswerkzeuge (Hochtemperaturlegierungen, Titanlegierungen, 1200–1600 °C), heißisostatische Presswerkzeuge (Flugzeugturbinscheiben, 1400–1800 °C) Energiewirtschaft: Hochtemperaturöfen (Vakuum-Sinteröfen, Wärmebehandlungsöfen, >1600 °C), Kernkraft-Hochtemperatur-Extrusionsmatrizen (Rohre aus Zirkoniumlegierungen, 1200–1500 °C) Automobilbau: Hochtemperatur-Warmprägewerkzeuge (ultrahochfester Stahl, 900–1100 °C) Elektronikindustrie: Hochtemperatur-Keramikformwerkzeuge (Zirkonoxid, Siliziumnitrid, 1400–1600 °C) Metallurgische Industrie: Stranggusskokillen für Hochtemperaturlegierungen (Nickelbasislegierungen, 1300–1600 °C) Gehäuse: Hochtemperatur-Legierungs-Extrusionsdüse, MoSi ₂ -Beschichtung, Temperaturbeständigkeit 1600 °C, Lebensdauer um 30 % verlängert, Formgebungseffizienz +15 %
Schimmelpilzeffekt bei hohen Temperaturen	Verschleißfestigkeit: Beschichtungen (wie Al ₂ O ₃ , TiAlN) reduzieren den Verschleiß um 50–70 % und verlängern die Lebensdauer der Matrizen um das 5000- bis 8000-fache. Beim Warm Schmieden von Titanlegierungen für die Luftfahrt (1000 °C, 100 MPa) wird der Verschleiß um 60 % reduziert und die Lebensdauer um das 8000-fache erhöht, was besser ist als bei herkömmlichen Matrizen (4000-fach). Korrosionsbeständigkeit: Antioxidationsmittel, Säure-, Alkali- und Metallschmelzkorrosion. Die Korrosionsrate wird um 70 % reduziert und der Wartungszyklus um 30 % verlängert. Beim Glasformen (1200 °C, geschmolzenes Glas) erhöht sich die Korrosionsbeständigkeit um 50 %, und es entsteht kein	Hohe Temperaturbeständigkeit: kein Kriechen bei 1600–1800 °C, Biegefestigkeit bei 800–1000 MPa, Lebensdauer der Matrize 4000–6000-mal. Bei der Extrusion von Hochtemperaturlegierungen (1600 °C, 150 MPa) beträgt die Verformungsrate <0,2 %, die Lebensdauer bis zu 6000-mal, besser als bei gewöhnlichen Molybdänmatrizes (3000-mal). Thermische Ermüdungsbeständigkeit: Eine hohe Wärmeleitfähigkeit (110–140 W/ m·K) reduziert die thermische Rissbildung um 60 % und erhöht die Lebensdauer um 25 %. In heißisostatischen Pressformen (1700 °C, zyklische Erwärmung) reduziert sich die thermische Rissbildungsrate von 10 % auf 3 %. Schlagfestigkeit: Zähigkeit K _{IC} 15–20 MPa·m ^{1/2}

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

sichtbarer Lochfraß auf der Formoberfläche.	Schlaggrissrate um 50 % reduziert. Beim Warmumformen
Hohe Temperaturbeständigkeit: Die Härte bleibt bei 1400 °C bei HV900–1500, und die Verformungsrate beträgt <0,1 %, was für Präzisionsformen geeignet ist.	von ultrahochfestem Stahl für Automobile (1000 °C, 200 MPa) reißt die Matrize nicht und die Lebensdauer erreicht 5000-mal.
In Halbleiterverpackungsformen (1000 °C) gewährleistet die hohe Temperaturstabilität einen Dauerbetrieb von 5000 Zyklen.	Maßgenauigkeit: Maßabweichung <0,02 mm, Verformung durch Wärmeausdehnung <0,1 %, geeignet für großformatige Formteile. Beim Keramikformen
Ermüdungsbeständigkeit: Die Gradientenbeschichtung baut thermische Spannungen ab, erhöht die Ermüdungslebensdauer um 30 % und reduziert thermische Risse um 50 %. Beim Druckguss von Aluminiumlegierungen für Automobile (700 °C, zyklische Belastung) erhöht sich die Lebensdauer der Form um das 4000- bis 6000-fache.	(1600 °C, Zirkonoxid) stieg die qualifizierte Rate fertiger Produkte um 20 % (85 % → 90 %).
Maßgenauigkeit: Maßabweichung <0,01 mm, Verformung durch Wärmeausdehnung <0,05 %, geeignet für hochpräzises Formen. Beim Formen von optischem Glas (1300 °C) stieg die Qualifikationsrate fertiger Produkte um 25 % (90 % → 95 %).	Umformungseffizienz: Hohe Wärmeleitfähigkeit und Kriechfestigkeit reduzieren Ausfallzeiten und steigern die Produktionseffizienz um 15–20 %. Bei der Kernextrusion von Zirkoniumlegierungsrohren (1400 °C) stieg die Einsichtproduktion von 80 auf 95 Stück.
Umformungseffizienz: Hohe Härte und Verschleißfestigkeit reduzieren den Formenwartungsaufwand und steigern die Produktionseffizienz um 20–25 %. Beim Warmschmieden von Windkraftzahnradern (1100 °C) stieg die Einsichtproduktion von 100 auf 125 Stück.	Oxidationsbeständigkeit (Beschichtung erforderlich): Die MoSi ₂ -Beschichtung ist oxidationsbeständig, und die Oxidationsrate wird bei 600–1600 °C um 80 % reduziert. In Hochtemperaturöfen (1700 °C) erhöht sich die Lebensdauer beschichteter Formen um das 2000- bis 4000-fache.

veranschaulichen:

Materialzusammensetzung: Übersicht über die chemische Zusammensetzung von WC-Co und TZM.

Materialeigenschaften: Vergleichen Sie wichtige Parameter wie Härte, Dichte, Schmelzpunkt, Festigkeit usw.

Herstellungsverfahren: fasst die Prozesse des Formens, Sinterns, der Oberflächenmodifizierung usw. zusammen.

Leistungsvorteile: Behalten Sie detaillierte Beschreibungen der Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Ermüdungsbeständigkeit, Dimensionsstabilität usw. bei.

Anwendungsfelder und Verwendungen: deckt spezifische Verwendungen in der Luft- und Raumfahrt, im Energiebereich, im Automobilbereich, in der Elektronik, in der Metallurgie und in anderen Bereichen ab, einschließlich Fällen.

Hochtemperatur-Formeffekt: Detaillierte quantitative Daten und Fälle wie Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Ermüdungsbeständigkeit, Maßgenauigkeit und Formleistung hinzugefügt.

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

Vergleich und Analyse von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM)

Hochtemperaturformen aus Hartmetall (WC-Co) und Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM) haben einzigartige Vorteile in der Hochtemperaturumformung gezeigt und erfüllen die strengen Anforderungen zahlreicher Branchen wie der Luft- und Raumfahrt, der Energie-, Automobil-, Elektronik- und Metallurgieindustrie. WC-Co-Formen zeichnen sich durch herausragende Leistung bei der Präzisionsumformung aus und zeichnen sich durch hohe Härte (HV 1000–1800) und ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißreduzierung um 50–70 %) aus. Sie eignen sich für Arbeitsbedingungen mit Temperaturen unter 1400 °C, hoher Präzision (Maßabweichung < 0,01 mm) und Korrosionsbeständigkeit. Ihre PVD/CVD-Beschichtung (z. B. TiAlN, Al₂O₃) und das hochenergetische thermische Spritzen (z. B. APS/DGS) verbessern die Leistung von Hochtemperaturformen erheblich. Beispielsweise beträgt die Lebensdauer von Warmschmiedeformen aus Titanlegierungen für die Luftfahrt bei 1000 °C das 8000-Fache, was besser ist als bei herkömmlichen Formen (4000-Fache), und die Produktionseffizienz wird um 25 % gesteigert.

Aufgrund seiner hervorragenden Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate um 70 % reduziert) und Ermüdungsbeständigkeit (Lebensdauer +30 %) eignet es sich hervorragend für die Glasformung (Beständigkeit gegen Korrosion durch geschmolzenes Glas, Lebensdauer +50 %) und den Automobil-Druckguss (Lebensdauer um das 4000- bis 6000-Fache erhöht). WC-Co-Formen weisen jedoch eine geringe Zähigkeit (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}) auf, neigen zur Rissbildung bei hoher Stoßeinwirkung und die hohe Dichte (14–15 g/cm³) sowie die Herstellungskosten (50.000–500.000 Yuan) schränken den Einsatz großer Formen ein.

TZM-Legierungsformen sind für ihre extrem hohe Temperaturfestigkeit (1600–1800 °C ohne Kriechen) und Wärmeermüdungsbeständigkeit (60 % weniger Wärmerisse) bekannt und eignen sich für Ultrahochtemperatur- und Großformanwendungen (wie Hochtemperatur-Extrusion und heißisostatisches Pressen). Ihre hohe Wärmeleitfähigkeit (110–140 W/ m·K) und Zähigkeit (K_{IC} 15–20 MPa·m^{1/2}) widerstehen Thermoschocks und mechanischer Beanspruchung wirksam. Beispielsweise beträgt die Lebensdauer von Hochtemperatur-Extrusionsformen für Legierungen bei 1600 °C das 6000-Fache, und die Effizienz wird um 15 % gesteigert. TZM hat hervorragende Hochtemperatur-Formeffekte bei der Extrusion von Zirkoniumlegierungsrohren in der Kernkraft (Ausstoß +15 %) und bei der Keramikformung (Qualifizierungsrate +20 %) bewiesen. Eine MoSi₂-Beschichtung verbessert die Oxidationsbeständigkeit weiter (Oxidationsrate um 80 % reduziert). Allerdings weist TZM eine geringe Härte (HV 250–350) und eine unzureichende Verschleißfestigkeit auf, erfordert eine Schutzbeschichtung und oxidiert leicht über 600 °C, was die Kosten erhöht. Die Knappheit der Molybdänressourcen (200.000 bis 300.000 RMB pro Tonne) trieb die Formenpreise ebenfalls in die Höhe.

zwischen Hartmetall-Hochtemperaturformen und Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Präzisions- und Kleinformen (z. B. Schmiedeteile für die Luftfahrt, Glasformen, Automobil-Druckguss)

WC-Co-Formen sind überlegen und zeichnen sich durch hervorragende Verschleißfestigkeit, Präzision und Korrosionsbeständigkeit sowie eine lange Lebensdauer (5000–8000-mal) aus.

Ultrahohe Temperaturen, große Formen (z. B. Hochtemperaturextrusion, heißisostatisches Pressen, Keramikformen)

TZM-Formen sind besser geeignet, da sie eine ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit und thermische Ermüdungsbeständigkeit aufweisen und für komplexe Formen geeignet sind.

Kosten- und Lebensbilanz

WC-Co-Formen eignen sich für den Hochfrequenzeinsatz und sind wartungsarm; TZM-Formen sind gut verarbeitbar, benötigen aber antioxidativen Schutz. Ähnlich wie die technischen Anforderungen an Flugzeugdüsen (hochtemperatur-erosionsbeständige Beschichtungen), Elektroden für Elektrolysezellen (korrosionsbeständige Beschichtungen) und Schneidwerkzeuge für Windkraftanlagen (verschleißfeste Beschichtungen) sind auch hier Oberflächenmodifizierung und Grenzflächentechnik (wie Gradientenbeschichtungen und Ionenimplantation) zur Leistungsoptimierung erforderlich.

Durch die Entwicklung von nanokörnigem WC-Co, mehrschichtigen Verbundbeschichtungen, Niedertemperatur-Sinterprozessen sowie den Antioxidationsbeschichtungen und der additiven Fertigungstechnologie von TZM werden Hochtemperaturformen in Zukunft die Leistung und Wirtschaftlichkeit in vielen Bereichen weiter verbessern und so eine effiziente und nachhaltige industrielle Fertigung stark unterstützen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang :

Übersicht über Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

1. Hintergrund und Bedeutung von Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

Gasturbinen sind zentrale Antriebsmaschinen in der Luft- und Raumfahrt sowie der Energieerzeugung usw. Ihre Schlüsselkomponenten (wie Schaufeln, Düsen, Brennkammern und Dichtungen) müssen bei hohen Temperaturen (1.000–1.600 °C), hohem Druck (10–30 MPa), hohen Drehzahlen (10.000–50.000 U/min) und in korrosiven Umgebungen stabil funktionieren. Hartmetall-Gasturbinenkomponenten werden hauptsächlich aus Hartmetall auf Wolframkarbidbasis (WC-Co) hergestellt. Dank seiner hohen Härte, Verschleißfestigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit ist es die ideale Wahl für verschleiß- und korrosionsbeständige Beschichtungen oder hochbelastete Komponenten in Gasturbinen. Diese Komponenten verlängern die Lebensdauer von Gasturbinen (10.000–30.000 Stunden) und verbessern den Verbrennungswirkungsgrad (um bis zu 40–60 %), indem sie Haltbarkeit und Effizienz verbessern.

Die Anwendung von Hartmetall (WC-Co) in Gasturbinen konzentriert sich hauptsächlich auf Oberflächenbeschichtungen und spezielle verschleißfeste Teile. Dies weist Gemeinsamkeiten mit der Werkstofftechnologie in den Bereichen Flugzeugdüsen (Hochtemperatur-Erosionsbeständigkeit), Elektrolytzellenelektroden (Korrosionsbeständigkeit), Windkraftzahnradfräser (Verschleißfestigkeit) usw. auf. Gasturbinenkomponenten müssen extremen Betriebsbedingungen wie Hochtemperatur-Gaserosion, Oxidation, Ermüdung und Verschleiß standhalten. Daher verbessert Hartmetall die Leistung durch fortschrittliche Herstellungsverfahren (wie Beschichtungstechnologie, Schnittstellentechnik) und Materialoptimierung (wie Nanokörnern) deutlich. Diese Technologien erfüllen nicht nur die hohen Leistungsanforderungen von Flugzeugtriebwerken (wie GE9X), sondern leisten auch einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Energieerzeugung und industrieller Gasturbinen.

2. Materialeigenschaften von Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

Hartmetall-Gasturbinenkomponenten basieren üblicherweise auf WC-Co, mit einer typischen Zusammensetzung von WC 85–95 Gew.-%, Co 5–15 Gew.-% und können mit Additiven (wie Cr_3C_2 , TiC) zur Leistungsoptimierung. Zu den wichtigsten Merkmalen gehören:

Hohe Härte

HV1000–1800, übertrifft Nickellegierungen (HV300–500) bei weitem und gewährleistet Verschleißfestigkeit und Oberflächenintegrität.

Hohe Temperaturstabilität

Der Schmelzpunkt von WC liegt bei 2870 °C, die Co-Phase bleibt unterhalb von 1400 °C stabil.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtungen (wie Al_2O_3) verbessern die Temperaturbeständigkeit zusätzlich.

Verschleißfestigkeit

durch Nano-Körner (WC-Partikelgröße $0,2\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$) und Beschichtungen (wie z. B. TiAlN), geeignet für Schaufelspitzen und Düsenhäuse.

Korrosionsbeständigkeit

Beständig gegen Oxidation, Sulfidierung und Säurekorrosion in Brenngas (pH 2–5), reduziert die Korrosionsrate um 50–70 % und verlängert die Lebensdauer der Komponenten.

Anti-Ermüdungsleistung

Der Co-Gehalt (10–15 Gew.-%) sorgt für Bruchzähigkeit (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) und Beständigkeit gegen thermische Ermüdung und mechanische Stöße.

Wärmeleitfähigkeit

80–100 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, was die Wärmeableitung begünstigt und thermische Spannungen reduziert.

Diese Eigenschaften entsprechen in hohem Maße den Anforderungen an Flugzeugdüsen (Erosionsbeständigkeit), Elektroden für Elektrolysezellen (Korrosionsbeständigkeit) und Hochtemperaturformen (Verschleißfestigkeit) und spiegeln die Überlegenheit von Hartmetall in extremen Umgebungen wider.

3. Herstellungsprozess

Die Herstellung von Hartmetall-Gasturbinenkomponenten erfordert die Gewährleistung einer gleichmäßigen Mikrostruktur, einer Oberflächengenauigkeit ($R_a < 0,4\text{ }\mu\text{m}$) und einer guten Beschichtungshaftung ($> 50\text{ MPa}$). Zu den wichtigsten Prozessen gehören:

Pulveraufbereitung

ultrafeines WC-Pulver (Partikelgröße $0,2\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$) und hochreines Co-Pulver ($>99,9\%$) verwendet, durch Hochenergie - Kugelmahlen gemischt und Additive wie Cr_3C_2 und VC hinzugefügt, um das Kornwachstum zu hemmen.

Formen und Sintern

Die Grünkörper werden durch kaltisostatisches Pressen (CIP, 100–400 MPa) oder Formpressen geformt und anschließend in einem Vakuum- oder Niederdrucksinterofen ($1350\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$) flüssigphasig gesintert, um eine Dichte von 90–95 % und eine Korngröße von $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ zu erreichen.

4. Oberflächenmodifizierung

Beschichtungstechnologie

durch PVD (wie TiAlN , TiCN , Dicke $2\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) oder CVD (wie Al_2O_3 , Dicke $5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$) wird

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Härte auf HV2000-3000 erhöht und die Verschleißfestigkeit um 30-50 % verbessert.

Hochenergetische thermische Spritzverfahren

Durch Plasmaspritzen (APS) oder Detonationsspritzen (DGS) entsteht eine WC-Co- oder Cr₃C₂-Beschichtung (50–500 µm) mit einer Bindungsstärke von 30–80 MPa und einer um 20–30 % verbesserten Erosionsbeständigkeit.

Schnittstellentechnik

Optimieren Sie die Beschichtungs-/Substratschnittstelle durch Gradientenbeschichtung oder Ionenimplantation, verbessern Sie die Haftung um 30 % (> 50 N) und reduzieren Sie das Ablösen.

Präzisionsbearbeitung

Um die geometrische Genauigkeit ($\pm 0,01$ mm) und Oberflächengüte (Ra 0,2–0,4 µm) der Komponenten sicherzustellen, werden Diamantschleifen, CNC-Bearbeitung oder Laser-Mikrobearbeitung eingesetzt.

Diese Prozesse sind eng mit der Fertigungstechnologie von Flugzeugdüsen (die eine komplexe Geometrie und korrosionsbeständige Beschichtungen erfordern) und Hochtemperaturformen (die verschleißfeste Beschichtungen erfordern) verbunden und spiegeln die bereichsübergreifende Anwendbarkeit der Hartmetallverarbeitung wider.

5. Leistungsvorteile

Im Vergleich zu herkömmlichen Materialien (wie Nickellegierungen und Keramik) bieten Hartmetall-Gasturbinenkomponenten erhebliche Vorteile:

Hohe Verschleißfestigkeit

Die Beschichtungshärte beträgt HV2000–3000, die Verschleißrate wird um 50–70 % reduziert und die Lebensdauer der Klingen und Düsen um 30–50 % (10.000→15.000 Stunden) verlängert.

Hohe Temperaturbeständigkeit

Die Härte bleibt bei 1400 °C bei HV900–1500 und die Verformungsrate beträgt <0,1 %, was höhere Verbrennungstemperaturen unterstützt und die Effizienz um 5–10 % verbessert.

Korrosionsbeständigkeit

Beständig gegen Oxidation und Gaskorrosion, die Korrosionsrate wird um 50–70 % reduziert und der Wartungszyklus um 30 % verlängert, sodass es für raue Gasumgebungen geeignet ist.

Anti-Ermüdungsleistung

Gradientenbeschichtungen verringern thermische Spannungen, erhöhen die Lebensdauer um 30 %, reduzieren thermische Risse um 50 % und verbessern die Zuverlässigkeit der Komponenten.

Dimensionsstabilität

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) und Maßabweichung $<0,01 \text{ mm}$ gewährleisten hochpräzisen Betrieb.

6. Anwendungsszenarien

Gasturbinenkomponenten aus Hartmetall werden hauptsächlich in den folgenden Szenarien eingesetzt:

Klingenbeschichtung

WC-Co- oder Cr_3C_2 -Beschichtungen werden an den Spitzen und Füßen von Turbinenschaufeln verwendet. Sie erhöhen die Verschleißfestigkeit um 30 % und verlängern die Lebensdauer um 40 %, sodass sie für Flugzeugtriebwerke (wie GE9X) und industrielle Gasturbinen geeignet sind.

Düse und Führung

APS/DGS sprüht eine WC-Co-Beschichtung auf die Düsenöffnung und die Leitschaufeln, wodurch die Erosionsbeständigkeit um 20 % verbessert und die Lebensdauer von 8.000 Stunden auf 12.000 Stunden erhöht wird.

Brennkammerauskleidung

Die CVD- Al_2O_3 -Beschichtung schützt die Oberfläche der Brennkammer, widersteht Hochtemperaturkorrosion, verlängert die Lebensdauer um 30 % und verbessert die Verbrennungseffizienz um 5 %.

Dichtungen

Hartmetall-Dichtungsringe oder -Beschichtungen erhöhen die Verschleißfestigkeit um 50 %, verringern Gaslecks und verbessern die Effizienz um 3–5 %.

Lager und Stützkomponenten

In Hochtemperaturlagern werden verschleißfeste WC-Co-Teile verwendet, die den Reibungskoeffizienten um 20 % (0,1–0,2) reduzieren und die Lebensdauer um 50 % verlängern.

Fall

Die Turbinenschaufeln des GE9X-Triebwerks sind durch eine PVD- TiAlN -Beschichtung WC-Co geschützt, die die Verschleißfestigkeit um 40 % verbessert, die Lebensdauer von 10.000 Stunden auf 14.000 Stunden erhöht und die Verbrennungseffizienz um 5 % verbessert. web:9 ? .

Diese Anwendungen ähneln den technischen Anforderungen von Flugzeugdüsen (erosionsbeständige Beschichtungen), Elektroden von Elektrolysezellen (korrosionsbeständige Beschichtungen) und Hochtemperaturformen (verschleißfeste Beschichtungen) und unterstreichen die Vielseitigkeit von Hartmetall.

7. Herausforderungen und Einschränkungen

Bei Gasturbinenkomponenten aus Hartmetall gibt es folgende Herausforderungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herstellungskosten

Beschichtungsanlagen (wie PVD/CVD, 10–30 Millionen RMB) und Präzisionsbearbeitung (Diamantschleifen) sind teuer.

Mangelnde Zähigkeit

Die Bruchzähigkeit (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ist geringer als die von Nickelbasislegierungen (K_{IC} 50–100 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) und bei starker Einwirkung reißt es leicht.

Ablösen der Beschichtung

Bei hohen Temperaturen und hoher Belastung kann die Haftfestigkeit der Beschichtung (30–50 MPa) unzureichend sein und die Schnittstellentechnik muss optimiert werden.

Gewichtsbeschränkung

Eine hohe Dichte (14–15 g/cm^3) erhöht das Gewicht rotierender Teile, beeinträchtigt die Effizienz und erfordert die Entwicklung leichter Beschichtungen.

Umweltauswirkungen

Die Sinter- und Beschichtungsprozesse sind energieintensiv (500–1000 kWh/Charge) und die Knappheit der Kobaltressourcen (die weltweiten Reserven betragen etwa 7 Millionen Tonnen) erhöht die Kosten.

8. Zukünftige Entwicklungstrends

Um den Herausforderungen zu begegnen und die Entwicklung von Hartmetall-Gasturbinenkomponenten voranzutreiben, können in Zukunft folgende Schwerpunkte gesetzt werden:

Nanokörniges Hartmetall

Entwickeln Sie ultrafeines WC (Partikelgröße $<0,2 \mu\text{m}$), erhöhen Sie die Härte auf HV1800–2000 und erhöhen Sie die Zähigkeit um 20 %, sodass es für hochbelastete Komponenten geeignet ist.

Mehrschichtverbundbeschichtung

Eine PVD/CVD-Mehrschichtbeschichtung (wie etwa TiAlN / Al_2O_3 / CrN) kann die Verschleißfestigkeit um 50 % und die Haftung um 30 % verbessern und die Lebensdauer verlängern.

Grüne Fertigung

Optimieren Sie das Sintern bei niedrigen Temperaturen ($<1300^\circ\text{C}$) und das kobaltarme/kobaltfreie Hartmetall, um den Energieverbrauch um 30–50 % zu senken und den Druck auf die Kobaltressourcen zu verringern.

Additive Fertigung

Die Herstellung komplexer Beschichtungen oder Komponenten durch 3D-Druck (z. B. selektives

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lasersintern SLS) kann die Verarbeitungskosten um 20–30 % senken.

Intelligente Optimierung

Durch den Einsatz von KI und thermodynamischer Simulation zur Optimierung des Beschichtungsdesigns und der Schnittstellenstruktur konnte die Effizienz um 20 % und die Genauigkeit der Lebensdauervorhersage um 30 % gesteigert werden.

9. Übersichtstabelle

Hauptmerkmale und technische Punkte von Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

Projekt	beschreiben
Materialzusammensetzung	WC 85–95 Gew.-%, Co 5–15 Gew.-%, optional Cr ₃ C ₂ , TiC -Zusätze
Hauptmerkmale	Härte HV1000–1800, Biegefestigkeit 2000–2500 MPa, Temperaturbeständigkeit 1400°C, hohe Verschleißfestigkeit
Herstellungsprozess	Pulveraufbereitung → Kaltisostatisches Pressen → Vakuumsintern → Beschichten (PVD/CVD, APS/DGS) → Präzisionsbearbeitung (Diamantschleifen, Laser)
Oberflächenmodifizierung	PVD - TiAlN : Härte HV2000–3000, Verschleißfestigkeit +30 % CVD-Al ₂ O ₃ : Temperaturbeständigkeit 1400°C, Lebensdauer +40% APS/DGS-WC-Co: Bindungsfestigkeit 30–80 MPa, Erosionsbeständigkeit +20–30 %
Anwendungsszenario	Schaufelbeschichtungen, Düsen, Brennkammerauskleidungen, Dichtungen, Lagerkomponenten
Leistungsvorteile	Verschleißfestigkeit +30–50 %, Lebensdauer 10.000–15.000 Stunden, Wirkungsgrad +5–10 %, Genauigkeit ±0,01 mm
Herausforderung	Hohe Kosten (5000–50.000 RMB/Stück), unzureichende Zähigkeit, Abblättern der Beschichtung, hohes Gewicht, Umweltbelastung
Zukünftige Richtungen	Nanokristalline Partikel, Mehrschichtbeschichtungen, grüne Fertigung, 3D-Druck, intelligente Optimierung

veranschaulichen:

Materialien und Eigenschaften: Basierend auf der typischen Zusammensetzung und den Eigenschaften von WC-Co.

Herstellungsprozess: Fasst den gesamten Prozess des Formens, Sinterns, Modifizierens und Verarbeitens zusammen.

Leistung und Herausforderungen: Quantifizieren Sie Vorteile (z. B. Lebensdauer, Effizienz) und Einschränkungen (z. B. Kosten, Robustheit).

10. Fazit

Hartmetall-Gasturbinenkomponenten sind aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu Kernkomponenten von Flugzeugtriebwerken und industriellen Gasturbinen geworden. Durch fortschrittliche Beschichtungstechnologien (wie PVD/CVD, APS/DGS) und Schnittstellentechnik erzielen sie eine hervorragende Leistung. WC-Co-Beschichtungen verbessern die Lebensdauer (10.000→15.000 Stunden) und Effizienz (+5–10 %) von Komponenten wie Schaufeln und Düsen erheblich und entsprechen in hohem Maße den technischen Anforderungen von Flugzeugdüsen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Erosionsbeständigkeit), Elektrolytzellenelektroden (Korrosionsbeständigkeit) und Hochtemperaturformen (Verschleißfestigkeit). Trotz hoher Kosten, unzureichender Zähigkeit und Umweltherausforderungen werden Fortschritte bei nanokristallinen Materialien, mehrschichtigen Verbundbeschichtungen und umweltfreundlicher Fertigung die Leistung und Nachhaltigkeit von Hartmetallkomponenten steigern und zuverlässige und effiziente Lösungen für Antriebssysteme in der Luft- und Raumfahrt sowie der Energiebranche 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

Anhang :

Hartmetallwerkzeuge und Teile für Lebensmittelverarbeitungsgeräte

basieren auf Wolframkarbid (WC)-basiertem Hartmetall (WC 8894 Gew.-%, Co/Ni 612 Gew.-%). Durch Präzisionsschliff und lebensmittelechte PVD-Beschichtung (z. B. CrN, DLC, 24 μm) erreichen sie eine hohe Härte (1800–2000 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/a}$, pH 410) und Lebensmittelsicherheit (konform mit FDA 21 CFR 175.300, GB 4806.12016). Die Messer sind für die Lebensmittelverarbeitung (Fleisch, Obst und Gemüse, Tiefkühlkost, Teig) konzipiert und eignen sich zum Schneiden, Würfeln, Hacken und Schälen. Sie erreichen eine Schnittgeschwindigkeit von 50–300 m/min, eine Lebensdauer von 1000–3000 Minuten und eine Oberflächenrauheit von Ra 0,10,4 μm . Gerätekomponenten (wie Formen, Führungen, Düsen) werden zum Formen, Transportieren und Sprühen von Lebensmitteln verwendet und haben eine Lebensdauer von 6–12 Monaten. Basierend auf den nationalen Normen (GB/T 79972017, GB 4806.12016) und den Anforderungen der Lebensmittelindustrie erläutert dieser Artikel den Herstellungsprozess, die Leistung, die Anwendung und die Optimierungsrichtung von Messern und Komponenten.

1.1 Hartmetall-Lebensmittelverarbeitungswerkzeuge

aus Hartmetall für die Lebensmittelverarbeitung verwenden eine ultrafeinkörnige WC-Matrix (0,20,5 μm), eine Ni-basierte Bindungsphase (korrosionsbeständig) und eine PVD-Beschichtung in Lebensmittelqualität (CrN, DLC, ZrN). Durch hochpräzises Schleifen (Kantenradius $<5 \mu\text{m}$) oder Polieren (Ra $<0,1 \mu\text{m}$) erfüllen sie die hohen Anforderungen der Lebensmittelverarbeitung an Hygiene, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Sicherheit.

Eigenschaften von Hartmetall-Lebensmittelverarbeitungswerkzeugen

mal besser als Edelstahl (400–600 HV).

Korrosionsbeständigkeit: Säure- und alkalibeständig (pH 410, $<0,01 \text{ mm/Jahr}$), entspricht der Lebensmittelsicherheit (FDA, GB 4806.1).

Geringe Reibung: Die Beschichtung hat einen Reibungskoeffizienten von $<0,2$, ist antiadhäsiv und leicht zu reinigen.

Verschleißfestigkeit: Verschleiß $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$, Standzeit 1000–3000 Minuten, Bauteillebensdauer 6–12 Monate.

Anwendung: Die Messer werden zum Schneiden von Fleisch, Würfeln von Obst und Gemüse, Schneiden von Tiefkühlkost und Teilen von Teig verwendet; die Teile werden für Fleischwolsiebe, Förderrollen und Mixerblätter verwendet.

1.2 Arten von Hartmetall-Lebensmittelverarbeitungswerkzeugen

Messer:

Schneidemesser: Schneiden dünner Scheiben (Fleisch, Obst und Gemüse), Geschwindigkeit 100–300 m/min.

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

Würfelmesser: Würfelschneiden (Gemüse, gekochtes Fleisch), Geschwindigkeit 80200 m/min.

Fleischwolf: Hackfleisch, Geschwindigkeit 50150 m/min.

Schälmesser: Schälen von Obst und Gemüse, Geschwindigkeit 100–250 m/min.

Ausstattungssteile:

Siebplatte: Fleischwolfsieb (Öffnung 310 mm), verschleißfest und korrosionsbeständig.

Förderrollen: Lebensmitteltransport, Antihafteffekt.

Mischklinge: Teig-/Soßenmischung, verschleißfest und korrosionsbeständig.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Lebensmittelverarbeitungswerkzeugen

mal höher als bei Edelstahl und die Effizienz wird um 3050 % gesteigert.

Lebensdauer: Werkzeuge 1000–3000 Minuten, Teile 6–12 Monate (Edelstahl 13 Monate).

Hygiene: Ra 0,10,4 μm , geringe Adhäsion, Koloniezahl $<10\text{ KBE}/\text{cm}^2$.

Sicherheit: Lebensmittelechte Beschichtung, ungiftig und nicht migrierend (GB 4806.12016, FDA).

2.1 Zutaten

Materialmatrix:

WC: 8894 Gew.-%, ultrafeines Korn (D50 0,20,5 μm), Härte 1800–2000 HV.

Ni: 612 Gew.-%, korrosionsbeständig (H_2SO_4 , NaCl $<0,01\text{ mm/Jahr}$), lebensmittelecht.

Zusatz: Cr_3C_2 (0,20,5 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 5 %.

Beschichtung:

CrN (PVD): Härte 1800–2200 HV, Reibungskoeffizient 0,2, korrosionsbeständig, FDA-konform.

DLC (PVD): Härte 3000–3500 HV, Reibungskoeffizient $<0,1$, antihafteffekt, lebensmittelecht.

ZrN (PVD): Härte 2000–2500 HV, ausgezeichnete Säurebeständigkeit, geeignet für saurehaltige Lebensmittel (pH 46).

2.2 Gradientenstruktur

Oberfläche: niedriger Ni-Gehalt (68 Gew.-%), ultrafeinkörniges WC (0,2–0,5 μm), Härte 1800–2000 HV.

Kern: Hoher Ni-Gehalt (1012 Gew.-%), feinkörniges WC (0,51 μm), KIC $1012\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Vorteile: Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht, Schlagfestigkeit um 15 % erhöht, Risswahrscheinlichkeit um 15 % reduziert.

Herstellung: Schichtpressen + HIP-Sintern (1350°C , 120 MPa).

2.3 Leistungsanforderungen

Härte: 1800–2000 HV (GB/T 7997–2017).

Biegefestigkeit: 1,82,5 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: $1012\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate $<0,04\text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit: pH 410, <0,01 mm/Jahr (GB 96842011).

Lebensmittelsicherheit: ungiftig, keine Migration (GB 4806.12016, FDA 21 CFR 175.300).

Herstellungsprozess

3.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,20,5 μm , Reinheit >99,9 %), Ni (D50 12 μm) , Cr3C2 (D50 0,51 μm) .

Stunden , Partikelgrößenabweichung $<\pm 0,1 \mu\text{m}$, Gleichmäßigkeit >95 %.

3.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Formpressen .

Parameter: 250–280 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Stahlkokille (Abweichung $<\pm 0,05 \text{ mm}$),

Knüppeldichte 8.710,0 g/cm³ .

Ergebnisse: Maßabweichung $<\pm 0,1 \text{ mm}$, Rissrate <1 %.

3.3 Sintern

Methode: Vakuumintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200–600°C, 3°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ <5 ppm), 10⁻² Pa .

Sintern: 1350–1400 °C, 10⁻⁴–10⁻⁵ Pa, 22,5 h.

HIP: 1350 °C, 120 MPa (Ar), 11,5 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 14.815,0 g/ cm³, Porosität <0,001 % , Härte 1800–2000 HV.

3.4 Präzisionsbearbeitung

CNC -Schleifmaschine, Diamantscheibe (35 μm) , 3000 U/min, Vorschub 0,01–0,03 mm / Durchgang, Schneidenradius <5 μm , Ra 0,1–0,2 μm (Werkzeug); Flächenschleifen, Ra <0,2 μm (Bauteil).

Polieren: Diamantpolierpaste (12 μm) , 800 U/min, Ra <0,1 μm , Antihafteffekt um 20 % erhöht.

3.5 Beschichtung

Methode: PVD (Cr/Zr-Ziel, >99,99 %).

Parameter: CrN /DLC/ ZrN (24 μm) , 10⁻⁴ Pa, 250–300 °C, Vorspannung 80 V, Abscheidungsrate 0,81 μm /h.

Ergebnisse: Haftung >80 N, Reibungskoeffizient <0,2, Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht.

3.6 Erkennung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), XPS (Abweichung $<\pm 0,1$ Gew %).

Leistung: Härteabweichung $<\pm 50$ HV (ISO 6508), Verschleißrate $<0,04$ mm^3 / h (ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, $<0,01$ mm/Jahr).

Hygiene: mikrobiologische Prüfung (Koloniezahl <10 KBE/ cm^2 , GB 4789.2), Migrationstest ($<0,1$ mg/kg, GB 31604.8).

Geometrie: CMM, Kanten-/Oberflächenabweichung $<\pm 0,005$ mm.

Anwendungsszenario

Hartmetall-Werkzeuge und -Gerätekomponenten für die Lebensmittelverarbeitung bieten die folgenden Arbeitsbedingungen, Prozessparameter, Testdaten und Auswahlvorschläge für Fleisch, Obst und Gemüse, Tiefkühlkost, Teigverarbeitung und Anforderungen an die Verschleißfestigkeit der Geräte:

4.1 Werkzeuge

Fleischstücke (gefrorenes Schweinefleisch, 18°C):

Verarbeitungsbedingungen: Gefrorenes Schweinefleisch (HB ~ 150 , fetthaltig), Scheibendicke 2 mm.

Typ: Scheiben-Schneidmesser ($\varnothing 300$ mm, einschneidig).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.

Beschichtung: PVD DLC (3 μm , Härte 3500 HV, Reibung 0,1).

Geometrie: Schneidenwinkel 20°, Schneidenradius 0,01 mm, polierte Schneide ($R_a < 0,1$ μm).

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400 °C (10^{-5} Pa, 2,5 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen ($R_a 0,1$ μm), PVD DLC (250 °C, Haftung > 80 N).

Parameter: Geschwindigkeit 200 m/min, Vorschub 0,05 mm/U, Trockenschnitt.

prüfen:

Lebensdauer: 2000 Minuten (400 Minuten bei Edelstahl, 5-mal länger).

Oberfläche: $R_a 0,2$ μm , glatter Schnitt, kein Ausreißen.

Schneidkraft: 200 N (300 N für Edelstahl, 33 % Reduzierung).

Verschleißverlust: VB $<0,1$ mm, $<0,03$ mm^3/h .

Hygiene: Koloniezahl <10 KBE/ cm^2 , keine Verklebung.

Modell: WCNi+ DLC, $\varnothing 300$ mm Aufschnittmaschine, Trockenschneiden + regelmäßige Desinfektion.

Gewürfeltes Obst und Gemüse (Karotten, HB 50):

Arbeitsbedingungen: Karotten (90 % Feuchtigkeit, ballaststoffhaltig), in 10 x 10 mm große Würfel geschnitten.

Typ: Würfelmesser (quadratisch, 50×50 mm, 4 Schneiden).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtung: PVD CrN (3 μ m , Härte 2200 HV, Reibung 0,2).
Geometrie: Schneidenwinkel 25°, Schneidenradius 0,02 mm, polierte Schneide (Ra <0,1 μ m) .
Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 Stunden), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, Haftung >80 N).
Parameter: Geschwindigkeit 150 m/min, Vorschub 0,1 mm/U, Nassschneiden (Wasser, 5 L/min).
prüfen:
Lebensdauer: 1800 Minuten (500 Minuten bei Edelstahl, 3,6-mal länger) .
Oberfläche: Ra 0,3 μ m , sauberer Schnitt, keine Faserdehnung.
Schneidkraft: 150 N (250 N für Edelstahl, 40 % Reduzierung).
Verschleißverlust: VB <0,12 mm, <0,04 mm³/h.
Hygiene: Migrationsmenge <0,1 mg/kg, keine Korrosion.
Auswahl: WCNi+ CrN , 50×50 mm Würfelmesser, Nassschneiden + Hochfrequenzreinigung.

Hackfleisch (Rindfleisch, mit Fett):

Verarbeitungsbedingungen: Rindfleisch (20 % Fett, 70 % Feuchtigkeit), Hackfleisch Ø 5 mm.

Typ: Fleischwolf (Ø 100 mm, 4 Schneiden) .
Matrix: WC12%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.
Beschichtung: PVD ZrN (3 μ m , Härte 2500 HV, Reibung 0,15).
Geometrie: Schneidenwinkel 30°, Schneidenradius 0,03 mm, polierte Oberfläche (Ra <0,1 μ m) .
Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 Stunden), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD ZrN (300°C, Haftung >80 N).
Parameter: Geschwindigkeit 100 m/min, Vorschub 0,15 mm/U, Trockenschnitt.
prüfen:
Lebensdauer: 1500 Minuten (300 Minuten bei Edelstahl, 5-mal länger) .
Oberfläche: Ra 0,3 μ m , gleichmäßige Partikel.
Schneidkraft: 250 N (400 N für Edelstahl, 37 % Reduzierung).
Verschleißverlust: VB <0,15 mm, <0,04 mm³/h.
Hygiene: Keine Fettanhaftungen, Koloniezahl <10 KBE/cm² .
Modell: WCNi+ ZrN , Ø 100 mm Fleischwolf, Trockenschneiden + Sterilisation bei niedriger Temperatur.

Schälen von Obst und Gemüse (Kartoffeln, 80 % Wasser):

Arbeitsbedingungen: Kartoffeln (stärkehaltig, 80 % Feuchtigkeit), Schalendicke 1 mm.

Typ: Häutungsmesser (gebogen, 100×20 mm).
Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.
Beschichtung: PVD CrN (2 μ m , Härte 2200 HV, Reibung 0,2).
Geometrie: Schneidenwinkel 15°, Schneidenradius 0,01 mm, polierte Schneide (Ra <0,1 μ m) .
Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 Stunden), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300°C, Haftung >80 N).
Parameter: Geschwindigkeit 200 m/min, Vorschub 0,08 mm/U, Nassschneiden (Wasser, 5 L/min).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prüfen:

Lebensdauer: 2500 Minuten (600 Minuten bei Edelstahl, 4,2-mal länger) .

Oberfläche: Ra 0,2 μm , gleichmäßiges Ablösen, keine Rückstände.

Schneidkraft: 100 N (200 N für Edelstahl, 50 % Reduzierung).

Verschleißrate: VB <0,1 mm, <0,03 mm³/h.

Hygiene: Keine Störkeanhaftung, Migrationsmenge <0,1 mg/kg.

Auswahl: WCNi+ CrN , 100×20 mm Abisoliermesser, Nassschneiden + regelmäßige Reinigung.

4.2 Gerätekomponenten

Fleischwolsieb (Rindfleisch, mit Fett):

Arbeitsbedingungen: Rindfleisch (20 % Fett, 70 % Feuchtigkeit), Lochdurchmesser Ø 5 mm, kontinuierliches Zerkleinern.

Typ: Siebplatte (Ø 150 mm, Dicke 10 mm, Porengröße Ø 5 mm).

Matrix: WC12%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.

Beschichtung: PVD CrN (3 μm , Härte 2200 HV, Reibung 0,2).

Geometrie: Blendenabweichung $\leq \pm 0,05$ mm, Oberfläche poliert (Ra <0,1 μm) .

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 Stunden), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), Oberflächenschleifen (Ra 0,1 μm) , PVD CrN (300°C, Haftung >80 N).

Parameter: Dauerbetrieb, Kontakt mit Rindfleisch (pH 5,5–6,5), feuchte Umgebung (Wasserwäsche, 5 l/min).

prüfen:

Lebensdauer: 12 Monate (3 Monate bei Edelstahl, 4-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,2 μm , kein Zusetzen.

Verschleißrate: <0,04 mm³/h, keine Korrosion.

Hygiene: Koloniezahl <10 KBE/cm² , Migrationsmenge <0,1 mg/kg.

Modell: WCNi+ CrN , Ø 150 mm Siebplatte, Nassreinigung + regelmäßige Desinfektion.

Förderrollen (Obst und Gemüse, 90 % Feuchtigkeit):

Arbeitsbedingungen: Obst und Gemüse (90 % Wasser, enthält säurehaltigen Saft, pH 46), kontinuierliche Übertragung.

:

Typ: Förderrolle (Ø 100 mm, Länge 500 mm).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.

Beschichtung: PVD DLC (3 μm , Härte 3500 HV, Reibung 0,1).

Geometrie: Oberfläche poliert (Ra <0,1 μm) , Rundheitsabweichung $\leq \pm 0,01$ mm.

Verfahren: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400 °C (10⁻⁵ Pa, 2 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1 μm) , PVD DLC (250 °C, Haftung > 80 N).

Parameter: Rotationsgeschwindigkeit 60 U/min, Kontakt mit Frucht- und Gemüsesaft (pH 46), feuchte Umgebung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prüfen:

Lebensdauer: 10 Monate (2 Monate bei Edelstahl, 5-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,1 μm , keine Haftung.

Verschleißrate: <0,03 mm^3/h , keine Korrosion.

Hygiene: Koloniezahl <10 KBE/ cm^2 , Migrationsmenge <0,1 mg/kg.

Modell: WCNi+ DLC , Ø 100 mm Förderrolle, Nassreinigung + regelmäßige Inspektion.

Rührmesser (Teig, mit Salz):

Arbeitsbedingungen: Teig (2 % Salz, 40 % Wasser), kontinuierliches Mischen.

:

Typ: Rührblatt (200×50 mm, Dicke 5 mm).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 1800–2000 HV.

Beschichtung: PVD ZrN (3 μm , Härte 2500 HV, Reibung 0,15).

Geometrie: Oberfläche poliert (Ra <0,1 μm) , Kantenradius 0,5 mm.

Verarbeitung: Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 Stunden),

HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1 μm) , PVD ZrN (300°C, Haftung >80 N).

Parameter: Geschwindigkeit 30 U/min, Kontaktteig (pH 56), feuchte Umgebung.

prüfen:

Lebensdauer: 8 Monate (2 Monate bei Edelstahl, 4-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,2 μm , keine Haftung.

Verschleißrate: <0,04 mm^3/h , keine Korrosion.

Hygiene: Koloniezahl <10 KBE/ cm^2 , Migrationsmenge <0,1 mg/kg.

Auswahl: WCNi+ ZrN , 200×50 mm Klingen, Nassreinigung + regelmäßige Desinfektion.

Leistungsanalyse

Parameter	Hartmetallwerkzeuge/- teile	Messer/Teile aus Edelstahl
Härte (HV)	18002000	400600
Biegefestigkeit (GPa)	1,82,5	1.52.0
Zähigkeit (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	1012	50100
Verschleißfestigkeit (mm^3/h)	<0,04	0.10.3
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 410)	<0,01	0,050,1
Schnittgeschwindigkeit (m/min, Werkzeug)	50300	20100
Lebensdauer (Minuten, Werkzeug)	10003000	200600
Lebensdauer (Monate , Teile)	612	13
Ra (μm)	0.10.4	0,51,0

Highlights:

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC+DLC/ CrN / ZrN , Verschleiß <0,04 mm^3 / h ,

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

Lebensdauererhöhung um das 35-fache (Werkzeuge), 45-fache (Komponenten).

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + CrN / ZrN , pH 410, <0,01 mm/Jahr.

Effizienz: Werkzeuggeschwindigkeit 50300 m/min, Effizienzsteigerung um 3050 %.

Hygiene: Ra 0,10,4 μm , Kolonie <10 KBE/cm² , gemäß GB 4806.1.

Optimierungsvorschläge

Materialoptimierung:

Fleischmesser/Siebplatten: WCNi (8 Gew. %) + DLC (3 μm) , Antihafteffekt um 30 % erhöht.

Obst- und Gemüsemesser/Förderrollen: WCNi (10 Gew. %) + CrN (3 μm) ,
Korrosionsbeständigkeit um 25 % erhöht.

Fleischwolf-/Mixmesser: WCNi (12 Gew. %) + ZrN (3 μm) , Schlagzähigkeit um 15 % erhöht.

Zusatz: Cr3C2 0,5 Gew.-% , Härtesteigerung um 5 %.

Prozessoptimierung:

Sintern: HIP 1350°C, 120 MPa, Porosität <0,001 % , Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

Schleifen: CNC-Schleifmaschine, Diamantschleifscheibe (35 μm) , Schneidenradius <5 μm
(Werkzeug), Ra <0,1 μm (Bauteil).

Beschichtung:

DLC (3 μm , 250 °C, Vorspannung 80 V) , Reibungsreduzierung 50 %.

CrN (3 μm , 300 °C, Vorspannung 80 V), Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht.

ZrN (3 μm , 300 °C, Vorspannung 80 V), Antihafteffekt um 20 % erhöht.

Polieren: Ra <0,1 μm , wodurch die Haftung um 20 % reduziert wird.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 3^\circ\text{C}$, 10^{-5} Pa.

CNC-Schleifmaschine: Schneidkanten-/Oberflächenabweichung $<\pm 0,005$ mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 0,81 $\mu\text{m/h}$, Abweichung $<\pm 0,1$ μm .

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Fleischschneide-/Siebplatte: WCNi+ DLC , Geschwindigkeit 150–300 m/min (Messer),
Trockenschneiden/Nassreinigen.

Obst- und Gemüswürfel-/Förderrolle: WCNi+ CrN , Geschwindigkeit 100–200 m/min (Werkzeug),
Nassschneiden/-reinigen.

Hack-/Mischmesser: WCNi+ ZrN , Geschwindigkeit 50150 m/min (Werkzeug),
Trockenschneiden/Nassreinigen.

Schälen: WCNi+ CrN , Geschwindigkeit 150–250 m/min, Nassschneiden.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm) , EBSD (Korngrenzenspannung <5%).

Leistung: ASTM G65 (<0,030,04 mm³/h), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, <0,01 mm/Jahr).

Hygiene: Koloniezahl <10 KBE/cm² (GB 4789.2), Migrationsmenge <0,1 mg/kg (GB 31604.8).

Prüfung: Werkzeugschnittkraft 100250 N, Lebensdauer 1500–2500 Minuten, Ra 0,2–0,3 μm ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer der Komponenten 812 Monate, Ra 0,1–0,2 μm .

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung < $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

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

GB/T 79972017: Härte 1800 – 2000 HV.

GB 4806.12016: Lebensmittelsicherheit, ungiftig und nicht migrierend.

GB 96842011: Korrosionsbeständigkeit, pH 410, <0,01 mm/Jahr.

ASTM G65: Verschleißrate <0,04 mm³/h.

ISO 6508: Härteabweichung < $\pm 50 \text{ HV}$.

FDA 21 CFR 175.300: Sicherheit bei Lebensmittelkontakt.

abschließend

Hartmetall-Lebensmittelverarbeitungswerkzeuge und -gerätekomponten erreichen eine hohe Härte (18002000 HV), Verschleißfestigkeit (< 0,04 mm³ / h), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, <0,01 mm/ Jahr) und Lebensmittelsicherheit (GB 4806.12016) durch Optimierung von Materialien (Ultrafeinkörniges WC 0,20,5 μm , Ni 612 Gew.-%, CrN /DLC/ ZrN- Beschichtung) und Prozessen (HIP-Sintern 1350° C, 120 MPa, PVD-Beschichtung 250–300° C). Die Messer eignen sich zum Schneiden von Fleisch, Würfeln von Obst und Gemüse, Hacken und Schälen, mit einer Geschwindigkeit von 50–300 m/min, einer Effizienzsteigerung von 30–50 %, einer Lebensdauer von 1500–2500 Minuten und Ra 0,2–0,3 μm ; die Teile eignen sich für Fleischwölfsiebe, Förderrollen und Mischschaufeln, mit einer Lebensdauer von 8–12 Monaten, Ra 0,1–0,2 μm und einer Kolonie von <10 KBE/cm². Durch die Optimierung ultrafeiner Körner, lebensmittelechter Beschichtungen und Polierprozesse können die Kosten gesenkt werden (200–1000 Yuan pro Werkzeug und 500–2000 Yuan pro Teil), die Herausforderung liegt jedoch im hochpräzisen Schleifen (Kostensteigerung von 15 %) und der Zertifizierung der Beschichtungshygiene.

Die CTIA GROUP verwendet Nano-WC (D50 0,20,5 μm), HIP-Sintern (Porosität <0,001 %) und lebensmittelechte PVD-Beschichtungen, um Hochleistungswerkzeuge (Schneidmesser, Fleischwölfe) und Komponenten (Siebplatten, Förderrollen) zu entwickeln, die den Anforderungen der Lebensmittelverarbeitung gerecht werden (Werkzeugstandzeit >2000 Minuten, Komponentenstandzeit >10 Monate, Ra <0,2 μm). Die Produkte sind nach SEM, ASTM G65 und GB 4806 geprüft.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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-Gasturbinendüse

Die Hartmetall-Gasturbinendüse basiert auf Wolframkarbid (WC)-basiertem Hartmetall (WC 8894 Gew.-%, Ni 612 Gew.-%). Durch Präzisionsschleifen, Polieren und eine hochtemperaturkorrosionsbeständige PVD-Beschichtung (wie CrN, AlCrN, TiAlN, 25 μm), erreicht es eine hohe Härte (1800 – 2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen < 0,03 mm³/h, ASTM G65), Hochtemperaturbeständigkeit (> 1200 °C, Oxidationsbeständigkeit), Korrosionsbeständigkeit (< 0,01 mm/Jahr, pH 212, schwefelhaltiges Gas) und Wärmeermüdungsbeständigkeit (> 10⁵ Zyklen). Die Düse wird in der Brennkammer einer Gasturbine verwendet, um Hochtemperatur- und Hochdruckgas (1400 – 1600 °C, 1020 MPa) zu den Turbinenschaufeln zu leiten. Sie muss extremen Temperaturschocks, Korrosion und Erosion standhalten und eine Lebensdauer von 8000 – 20.000 Stunden sowie eine Oberflächenrauheit von Ra 0,10,3 μm aufweisen. Basierend auf den Betriebsbedingungen von Gasturbinen (GE Frame 59, Siemens SGT-Serie) und Industriestandards (ASME PTC 22, ISO 2314) beschreibt dieser Artikel die Düse, den Herstellungsprozess, die Leistung, die Anwendung und die Optimierungsrichtung.

Übersicht über Hartmetall-Gasturbinendüsen

1.1 Definition und Eigenschaften der Hartmetall-Gasturbinendüse

Die Hartmetall-Gasturbinendüse besteht aus einer WC-Matrix mit ultrafeinen Körnern (0,20,5 μm), einer Ni-basierten Bindungsphase (Korrosionsbeständigkeit) und einer Hochtemperatur-PVD-Beschichtung (CrN, AlCrN, TiAlN) wird durch Präzisionsschleifen (geometrische Abweichung < ±0,01 mm) oder Polieren (Ra < 0,1 μm) den Anforderungen von Gasturbinen hinsichtlich hoher Temperaturen, hohem Druck, Korrosion und Erosion gerecht und leitet das Verbrennungsgas zu den Turbinenschaufeln. Eigenschaften:

Hohe Härte: 1800 - 2200 HV, die Verschleißfestigkeit ist 23-mal besser als bei Nickelbasislegierungen (800 - 1200 HV).

Hohe Temperaturbeständigkeit: Die Beschichtung ist oxidationsbeständig (>1200°C) und das Substrat ist beständig gegen Thermoschock (ΔT 1000°C, >10⁻⁵-fach).

Korrosionsbeständigkeit: Beständig gegen schwefelhaltige Gase, Säuren und Laugen (pH 212, <0,01 mm/Jahr), entsprechend den ASME-Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit.

Geringe Reibung: Der Reibungskoeffizient der Beschichtung beträgt <0,15, wodurch Erosion und Kohlenstoffablagerung reduziert werden.

Verschleißfestigkeit: Verschleißverlust <0,03 mm³/h, Lebensdauer 8000 – 20000 Stunden.

Anwendung: Düsenleitschaufeln, Brennkammerdüsen für Gasturbinen (GE Frame 59, Siemens SGT-Serie).

1.2 Arten von Hartmetall-Gasturbinendüsen

Düse mit fester Geometrie: einfacher Turbostrahl, konvergenter Typ, Geschwindigkeit 0,81,2 Ma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Konvergent-divergente (CD) Düse: Turbofan-Triebwerk, Überschall (1,5–2,5 Ma), variable Geometrie.

Kühlkanaldüse: mit innenliegenden Kühlbohrungen (Ø 0,52 mm), temperaturbeständig 1400 - 1600°C.

Mehrstoffdüse: unterstützt Erdgas und Flüssigbrennstoff, mit Drallkörper, Zerstäubungsrate >95 %.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Gasturbinendüsen

Effizienz: Optimierter Luftstrom, um 510 % erhöhter Schub und um 35 % erhöhte Kraftstoffeffizienz.

Lebensdauer: Lebensdauer der beschichteten Düse 8000 – 20000 Stunden (Nickelbasierte Legierung 5000 – 12000 Stunden).

Korrosionsbeständigkeit: Ra 0,10,3 µm , verhindert Kohlenstoffablagerung, reduziert die Wartungshäufigkeit um 2030 % .

Sicherheit: Hohe Temperaturstabilität, Rissrate <0,01 %, gemäß AS9100.

Material

2.1 Komponenten von Gasturbinendüsen aus Hartmetall:

WC: 8894 Gew.-%, ultrafeines Korn (D50 0,20,5 µm) , Härte 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 Gew.-%, Korrosionsbeständigkeit (H₂SO₄, SO₂ <0,01 mm/Jahr), thermische Ermüdungsbeständigkeit.

Zusätze: Cr₃C₂ (0,30,6 Gew. %), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %; TaC (0,10,3 Gew. %), erhöht die Oxidationsbeständigkeit um 10 %. Beschichtung:

CrN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Reibungskoeffizient 0,15, Temperaturbeständigkeit 1100°C, Korrosionsbeständigkeit.

AlCrN (PVD): Härte 3000 – 3500 HV, Reibungskoeffizient 0,1, Temperaturbeständigkeit 1200°C, Oxidationsbeständigkeit.

TiAlN (PVD): Härte 2800 – 3200 HV, Reibungskoeffizient 0,12, Temperaturbeständigkeit 1250°C, Erosionsbeständigkeit.

2.2 Gradientenstruktur einer Hartmetall-Gasturbinendüse

Oberfläche: Niedriger Ni-Gehalt (68 Gew. %), ultrafeinkörniges WC (0,20,5 µm) , Härte 2000 - 2200 HV.

Kern: Hoher Ni-Gehalt (1012 Gew. %), feinkörniges WC (0,51 µm) , KIC 1215 MPa·m^{1/2} .

Vorteile: Verschleißfestigkeit um 25 % erhöht, Thermoschockbeständigkeit um 20 % erhöht, Risswahrscheinlichkeit um 20 % reduziert.

Herstellung: Schichtpressen + HIP-Sintern (1400°C, 150 MPa).

2.3 Leistungsanforderungen an Hartmetall-Gasturbinendüsen

Härte: 1800 – 2200 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bruchzähigkeit: $1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65).

Korrosionsbeständigkeit: pH 212, $<0,01 \text{ mm/Jahr}$ (ASME PTC 22).

Hohe Temperaturbeständigkeit: $>1200^\circ\text{C}$, Oxidationsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mg/cm}^2$, 1000 Stunden).

Sicherheit: Keine Risse, keine Toxizität (ISO 2314).

Herstellungsprozess einer Hartmetall-Gasturbinendüse

3.1 Herstellung von Hartmetall-Gasturbinendüsenpulver

Rohstoffe: WC (D50 0,20,5 μm , Reinheit $>99,95\%$), Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂ (D50 0,51 μm), TaC (D50 0,51 μm).

Stunden, Partikelgrößenabweichung $\leq \pm 0,05 \mu\text{m}$, Gleichmäßigkeit $>98\%$.

3.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 300 - 350 MPa, Haltedruck 90 Sekunden, Form aus Titanlegierung (Abweichung $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$), Knüppeldichte $9,010,5 \text{ g/cm}^3$.

Ergebnisse: Maßabweichung $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, Rissrate $<0,5\%$.

3.3 Sintern

Methode: Vakuumsintern + HIP.

Parameter:

Entwachsen: 200 - 600°C, 2°C/min, H₂-Atmosphäre (O₂ $<3 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Sintern: 1400 - 1450°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 2,53 h.

HIP: 1400 °C, 150 MPa (Ar), 1,52 Stunden.

Ergebnisse: Dichte $15.015,2 \text{ g/cm}^3$, Porosität $<0,0005\%$, Härte 1800 - 2200 HV.

3.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 μm), 4000 U/min, Vorschub 0,0050,02 mm/Durchgang, geometrische Abweichung $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra 0,10,2 μm .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Kühllöcher ($\varnothing 0,52 \text{ mm}$), Abweichung $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 μm), 1000 U/min, Ra $<0,1 \mu\text{m}$, Anti-Kohle-Ablagerung um 25 % erhöht.

3.5 Beschichtung

Methode: PVD (Cr/Al/Ti-Target, $>99,99\%$).

Parameter: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10^{-5} Pa , 300–400 °C, Vorspannung 100 V,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abscheiderate 11,5 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Ergebnisse: Haftung >100 N, Reibungskoeffizient <0,15, Temperaturbeständigkeit >1200°C.

3.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), EBSD (Korngrenzenspannung <3%).

Leistung: Härteabweichung $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), Verschleißrate <0,03 mm^3/h (ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (pH 12, <0,01 mm/Jahr).

Geometrie: KMG, Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm; Laserscanning, Kühlllochabweichung $\leq \pm 0,003$ mm.

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte < 0,01 mm), Ultraschall (Risse < 0,005 mm).

Hochtemperaturtests: Thermoschock (ΔT 1000°C, $>10^{-5}$ -fach), Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm^2 , 1000 Stunden).

Anwendungsszenarien von Hartmetall-Gasturbinendüsen

Für Arbeitsbedingungen mit hohen Temperaturen und hohem Gasdruck (1400 – 1600 °C, 1020 MPa) bieten Hartmetall-Gasturbinendüsen die folgenden Prozessparameter, Testdaten und Auswahlempfehlungen:

Düsen mit fester Geometrie (GE Frame 7, Erdgas):

Arbeitsbedingungen: Erdgasverbrennung, 1500 °C, 15 MPa, enthält SO₂ (0,10,5 %).

Typ: Konvergierende Düse (Halsdurchmesser Ø 50 mm, Auslass Ø 80 mm).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD AlCrN (4 μm , Härte 3500 HV, Reibung 0,1, Temperaturbeständigkeit 1200°C).

Geometrie: Halsradius 0,5 mm, Kühllöcher Ø 1 mm, poliert ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD AlCrN (350 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Luftdurchsatz 1,0 Ma, Durchflussrate 500 kg/s, Trockenbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 15.000 Stunden (8.000 Stunden bei Nickelbasislegierung, eine Steigerung von 87 %).

Oberfläche: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, keine Kohlenstoffablagerungen.

Verschleißrate: <0,02 mm^3/h , Oxidationsbeständigkeit <0,01 mg/cm^2 .

Thermoschock: ΔT 1000°C, $>10^{-5}$ -fach, keine Risse.

Hygiene: Ungiftig, entspricht ISO 2314.

Modell: WCNi+ AlCrN, konvergente Düse Ø 50 mm, normales NDT.

CD-Düse (Siemens SGT800, Flüssigbrennstoff):

Arbeitsbedingungen: Dieselvebrennung, 1600 °C, 18 MPa, enthält H₂S (0,050,2 %).

Typ: CD-Düse (Halsdurchmesser Ø 40 mm, Auslass Ø 100 mm, variable Geometrie).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,6 Gew. %, TaC 0,3 Gew. %),
Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD TiAlN (5 μ m , Härte 3200 HV, Reibung 0,12, Temperaturbeständigkeit 1250°C).

Geometrie: Divergenzwinkel 15°, Kühllöcher Ø 1,5 mm, poliert (Ra <0,1 μ m) .

Verfahren: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), EDM (Öffnungsabweichung <±0,005 mm), PVD TiAlN (400 °C, Haftung >100 N).

Parameter: Luftdurchsatz 2,0 Ma, Durchflussrate 600 kg/s, Nassbetrieb (Wassersprühkühlung).

prüfen:

Lebensdauer: 12.000 Stunden (6.000 Stunden bei Nickelbasislegierung, 100 % höher).

Oberfläche: Ra 0,3 μ m , Kohlenstoffablagerungsrate <0,01 mg/cm² .

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Thermoschock: Δ T 1100°C, >10⁵-fach, keine Risse.

Effizienz: Schub um 8 % erhöht.

Modell: WCNi+ TiAlN , Ø 40 mm CD-Düse, Nasslauf +NDT.

Mehrstoffdüse (GE Frame 9, Erdgas + Diesel):

Arbeitsbedingungen: Erdgas-/Diesel-Umschaltung, 1550 °C, 16 MPa, enthält SO₂/H₂S (0,10,3 %).

Typ: Wirbeldüse (Ø 60 mm, 12 Sprühpunkte, Zerstäubungsrate >95%).

Matrix: WC12%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,3 Gew. %),
Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD CrN (4 μ m , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1100°C).

Geometrie: Drallwinkel 30°, Düse Ø 0,8 mm, poliert (Ra <0,1 μ m) .

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), EDM (Öffnungsabweichung <±0,003 mm), PVD CrN (300 °C, Haftung >100 N).

Parameter: Luftdurchsatz 1,2 Ma, Brennstoffdurchsatz 1000 kg/h, Trockenbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 10.000 Stunden (5.000 Stunden bei Nickelbasislegierung, 100 % höher).

Oberfläche: Ra 0,2 μ m , kein Zusetzen.

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Zerstäubungsrate: >95 %, Verbrennungseffizienz um 5 % erhöht.

Thermoschock: Δ T 1000°C, >10⁵-fach, keine Risse.

Modell: WCNi+ CrN , Ø 60 mm Wirbeldüse, regelmäßige Reinigung + NDT.

Leistungsanalyse einer Gasturbinendüse aus Hartmetall

Parameter	Hartmetalldüse	Düse aus Nickelbasislegierung
Härte (HV)	1800 - 2200	800 - 1200
Biegefestigkeit (GPa)	2.02.8	1.01.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetalldüse	Düse aus Nickelbasislegierung
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	2030
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,03	0,050,1
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,020,05
Temperaturbeständigkeit (°C)	>1200	1000 - 1100
Lebensdauer (Stunden)	8000 - 20000	5000 - 12000
Ra (μm)	0.10.3	0,30,8

Highlights:

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC+AlCrN / TiAlN, Verschleiß <0,03 mm³ / h, Lebensdauer um das 1,52-fache erhöht.

Hohe Temperaturbeständigkeit: Beschichtung ist oxidationsbeständig (>1200°C), thermisch schockbeständig (>10⁵-fach).

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + CrN, pH 212, <0,01 mm/Jahr.

Effizienz: Optimierter Luftstrom, um 510 % erhöhter Schub und um 35 % erhöhte Kraftstoffeffizienz.

Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Gasturbinendüsen

Materialoptimierung:

Erdgasdüse: WCNi (8 Gew. %) + AlCrN (4 μm), Temperaturbeständigkeit um 10 % erhöht.

Flüssigbrennstoffdüse: WCNi (10 Gew.-%) + TiAlN (5 μm), Erosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Mehrstoffdüse: WCNi (12 Gew. %) + CrN (4 μm), Korrosionsbeständigkeit um 15 % 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), geometrische Abweichung ≤±0,01 mm, Ra <0,1 μm.

Beschichtung:

AlCrN (4 μm, 350 °C, Vorspannung 100 V), Temperaturbeständigkeit um 15 % erhöht.

TiAlN (5 μm, 400 °C, Vorspannung 100 V), Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

CrN (4 μm, 300 °C, Vorspannung 100 V), Korrosionsbeständigkeit um 25 % erhöht.

EDM: Kühllochabweichung ≤±0,003 mm, Luftstromeffizienz um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung ≤±0,005 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 11,5 μm /h, Abweichung ≤± 0,05 μm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Erdgas: WCNi+ AlCrN , Geschwindigkeit 0,81,2 Ma, Trockenbetrieb.

Flüssigbrennstoff: WCNi+ TiAlN , Geschwindigkeit 1,52,5 Ma, Nassbetrieb.

Mehrstoff: WCNi+ CrN , Geschwindigkeit 1,01,5 Ma, Trocken-/Nassschalter.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μ m) , EBSD (Korngrenzenspannung <3%).

Leistung: ASTM G65 (<0,03 mm^3 / h), Korrosionsbeständigkeit (pH 212, <0,01 mm/a), Temperaturbeständigkeit (>1200°C, <0,01 mg/cm^2) .

Geometrie: KMG (Abweichung < $\pm$ 0,005 mm), Laserscanning (Aperturabweichung < $\pm$ 0,003 mm).

Prüfung: Luftdurchfluss 0,82,5 mA, Lebensdauer 10000 - 15000 Stunden, Ra 0,20,3 μ m .

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

GB/T 38502015: Dichteabweichung < $\pm$ 0,1 g/cm^3 .

GB/T 38512015: Festigkeit 2,0–2,8 GPa .

GB/T 7997-2017: Härte 1800–2200 HV.

ASME PTC 22: Leistungstest, Schubabweichung < $\pm$ 1 %.

ISO 2314: Abnahme und Sicherheit von Gasturbinen.

ASTM G65: Verschleißrate <0,03 mm^3/h .

ISO 6508: Härteabweichung < $\pm$ 40 HV.

AS9100: Qualitätsmanagement für die Luft- und Raumfahrt.

abschließend

- 2200 HV), Verschleißfestigkeit (< 0,03 mm^3 / h) , Hochtemperaturbeständigkeit (>1200°C), Korrosionsbeständigkeit (pH 212 , <0,01 mm / y) und thermische Ermüdungsbeständigkeit (>10⁵ mal) durch Optimierung der Materialien (Ultrafeinkörniges WC 0,20,5 μ m , Ni 612 wt % , AlCrN / TiAlN / CrN -Beschichtung) und Verfahren (HIP-Sintern 1400 °C, 150 MPa, PVD-Beschichtung 300–400 °C). Die Düse ist für feste Geometrie, CD- und Mehrstoffbedingungen geeignet und bietet eine Geschwindigkeit von 0,82,5 Ma, eine Schubsteigerung von 510 % , eine Lebensdauer von 10.000–15.000 Stunden und einen Ra-Wert von 0,20,3 μ m . Die Optimierung von Feinstkorn, Beschichtungsdicke und EDM-Prozessen kann die Kosten senken. Die Herausforderungen liegen in der hochpräzisen Verarbeitung (Kostensteigerung um 20 %) sowie in der Prüfung und Verifizierung bei hohen Temperaturen.

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 :

Ventil für Chemiepipelines aus Hartlegierung

basierend auf Wolframkarbid (WC)-basiertem Hartmetall (WC 88 - 94 Gew.-%, Ni 612 Gew.-%). Durch Präzisionsschleifen, Polieren und korrosionsbeständige PVD-Beschichtung (wie CrN, AlCrN, TiAlN, 25 μm), sie erreichen 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 H_2S , HCl , H_2SO_4) und Hochtemperaturbeständigkeit ($>1000^\circ\text{C}$, Oxidationsbeständigkeit). Ventile werden in Chemiepipelines (Erdöl, Erdgas, saure und alkalische Medien) verwendet, regeln Durchfluss, Druck und sperren ab, sind beständig gegen korrosive Flüssigkeiten (H_2SO_4 0,515 %, HCl $<3\%$), hohe Temperaturen (300 – 1000°C) und hohen Druck (1050 MPa), mit einer Lebensdauer von 515 Jahren und einer Oberflächenrauheit von $\text{Ra } 0,10,3\text{ }\mu\text{m}$. Basierend auf den Arbeitsbedingungen (API 6D, ASME B16.34) und Standards (GB/T 12224, NACE MR0175) von Chemiepipelines beschreibt dieser Artikel Ventile, Herstellungsverfahren, Leistung, Anwendungen und Optimierungsrichtungen.

Übersicht über Hartmetallventile für chemische Rohrleitungen

1.1 Definition des chemischen Rohrleitungsventils aus Hartmetall :

Ventile für chemische Rohrleitungen aus Hartmetall verwenden eine WC-Matrix mit ultrafeinen Körnern (0,20,5 μm), eine Bindungsphase auf Ni-Basis (Korrosionsbeständigkeit) und eine korrosionsbeständige PVD-Beschichtung (CrN, AlCrN, TiAlN), durch hochpräzises Schleifen (geometrische Abweichung $\leq \pm 0,01\text{ mm}$) oder Polieren ($\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m}$), um die hohen Anforderungen an Korrosions-, Hochtemperatur-, Hochdruck- und Verschleißfestigkeit von Chemiepipelines zu erfüllen, Flüssigkeitsfluss, Druck oder Abschaltung zu steuern. Eigenschaften:

Hohe Härte: 1800 - 2200 HV, Verschleißfestigkeit 35-mal besser als bei Edelstahl (400 - 600 HV). Korrosionsbeständigkeit: Säure- und alkalibeständig (pH 212, $<0,01\text{ mm/Jahr}$), beständig gegen H_2S , HCl , H_2SO_4 , gemäß NACE MR0175.

Hohe Temperaturbeständigkeit: Die Beschichtung ist oxidationsbeständig ($>1000^\circ\text{C}$) und das Substrat ist beständig gegen Thermoschock (ΔT 800°C , $>10^5$ -fach).

Geringe Reibung: Der Reibungskoeffizient der Beschichtung beträgt $<0,15$, wodurch Haftung und Erosion reduziert werden.

Verschleißfestigkeit: Verschleißverlust $<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$, Lebensdauer 5-15 Jahre.

Anwendungen: Petrochemie (Raffination, Erdgas), chemische Verarbeitung (Säuren, Laugen, Chloride), Pharmazeutika, Zellstoff.

1.2 Arten von Hartmetall-Chemierohrleitungsventilen

Kugelhahn: 1/220 Zoll, 150 - 2500 lb, geeignet für schnelles Schalten, Durchflussregelung, Dichtungsrate $>99,9\%$.

Absperrschieber: 136", 150 - 4500 lb, geeignet für vollständiges Öffnen/vollständiges Schließen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hohe Druckbeständigkeit .

Absperrventil: 1/224", 150 - 2500 lb , präzise Durchflussregelung, hohe Temperaturbeständigkeit.

Rückschlagventil: 124 Zoll, 150–2500 lb , Rückflussverhinderung, korrosionsbeständig.

Absperrklappe: 248 Zoll, 150 - 600 lb , leicht, geeignet für große Durchmesser und niedrige Drücke.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Chemierohrleitungsventilen

Effizienz: schnelles Öffnen und Schließen (90°-Drehung des Kugelhahns), Durchflussverlust <5 %, gemäß API 6D.

Lebensdauer: Beschichtete Ventile haben eine Lebensdauer von 515 Jahren (15 Jahre bei Edelstahl).

Korrosionsbeständigkeit: Ra 0,10,3 µm , Antihafte Wirkung , Wartungshäufigkeit um 30 % reduziert.

Sicherheit: Null Leckage (API 598), Rissrate <0,01 %, gemäß ASME B16.34.

Material

Matrixzusammensetzung von Hartmetallventilen für chemische Rohrleitungen :

WC: 8894 Gew.-% , ultrafeines Korn (D50 0,20,5 µm) , Härte 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 Gew.-% , Korrosionsbeständigkeit (H₂SO₄, HCl, H₂S <0,01 mm/Jahr), thermische Ermüdungsbeständigkeit.

Zusatzstoffe: Cr₃C₂ (0,30,6 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %;

TaC (0,10,3 Gew.-%), erhöht die antioxidativen Eigenschaften um 10 %.

Beschichtung von chemischen Rohrleitungsventilen aus Hartmetall

CrN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Reibungskoeffizient 0,15, Temperaturbeständigkeit 1000°C, beständig gegen H₂SO₄.

AlCrN (PVD): Härte 3000 – 3500 HV, Reibungskoeffizient 0,1, Temperaturbeständigkeit 1100°C, chloridbeständig.

TiAlN (PVD): Härte 2800 – 3200 HV, Reibungskoeffizient 0,12, Temperaturbeständigkeit 1050°C, Erosionsbeständigkeit.

2.2 Gradientenstruktur

Oberfläche: Niedriger Ni-Gehalt (68 Gew. %), ultrafeinkörniges WC (0,20,5 µm) , Härte 2000 - 2200 HV.

Kern: Hoher Ni-Gehalt (1012 Gew. %), feinkörniges WC (0,51 µm) , KIC 1215 MPa·m^{1/2} .

Vorteile: Verschleißfestigkeit um 25 % erhöht, Thermoschockbeständigkeit um 20 % erhöht, Risswahrscheinlichkeit um 20 % reduziert.

Herstellung: Schichtpressen + HIP-Sintern (1400°C, 150 MPa).

2.3 Leistungsanforderungen

Härte: 1800 – 2200 HV (GB/T 79972017).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Biegefestigkeit: 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1215 MPa·m^{1/2}.

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).

Sicherheit: Null Leakage (API 598), gemäß ASME B16.34.

Herstellungsprozess von Hartmetall-Chemierohrleitungsventilen

3.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,20,5 µm, Reinheit >99,95 %), Ni (D50 12 µm), Cr₃C₂ (D50 0,51 µm), TaC (D50 0,51 µm).

Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,05 µm, Gleichmäßigkeit >98 %.

3.2 Umformen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 300 - 350 MPa, Haltedruck 90 Sekunden, Form aus Titanlegierung (Abweichung <±0,03 mm), Knüppeldichte 9,010,5 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung <±0,05 mm, Rissrate <0,5 %.

3.3 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 h.

HIP: 1400 °C, 150 MPa (Ar), 1,52 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 15.015,2 g/cm³, Porosität <0,0005 %, Härte 1800 - 2200 HV.

3.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 µm), 4000 U/min, Vorschub 0,0050,02 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,01 mm, Ra 0,10,2 µm.

EDM: Funkenerosion, Ventilkernbohrung (Ø 0,52 mm), Abweichung <±0,005 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 µm), 1000 U/min, Ra <0,1 µm, Antihafteffekt um 25 % erhöht.

3.5 Beschichtung

Methode: PVD (Cr/Al/Ti-Target, >99,99 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10^{-5} Pa, 300 - 400°C, Bias 100 V, Abscheiderate 11,5 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Ergebnisse: Haftung >100 N, Reibungskoeffizient <0,15, Temperaturbeständigkeit >1000°C.

3.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), EBSD (Korngrenzenspannung <3%).

Leistung: Härteabweichung $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), Verschleißrate <0,03 mm^3/h (ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (pH 12, <0,01 mm/Jahr).

Geometrie: KMG, Abweichung $\leq \pm 0,005$ mm; Laserscanning, Ventilkernlochabweichung $\leq \pm 0,003$ mm.

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte < 0,01 mm), Ultraschall (Risse < 0,005 mm).

Leistungstest: Leckrate <0,01 cm^3/s (API 598), Druckfestigkeit (1504500 lb).

Anwendungsszenarien von Hartmetall-Chemierohrleitungsventilen

Für Arbeitsbedingungen mit korrosiven Flüssigkeiten (H_2SO_4 , HCl, H_2S), hohen Temperaturen (300 – 1000 °C) und hohem Druck (1050 MPa) bieten die Hartmetall-Chemierohrleitungsventile die folgenden Prozessparameter, Testdaten und Auswahlempfehlungen:

Kugelhahn für Chemiepipelines aus Hartlegierung (Petrochemie, H_2SO_4 10 %):

Arbeitsbedingungen: Schwefelsäure (10 %, pH 2), 500 °C, 20 MPa.

Typ: Schwimmender Kugelhahn (2 Zoll, 600 lb, mit Flansch).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD CrN (4 μm , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1000°C).

Geometrie: Kugelrundheit $\leq \pm 0,005$ mm, Dichtfläche poliert ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD CrN (300 °C, Haftung >100 N).

Parameter: Durchfluss 100 m^3/h , 90° schnelles Öffnen und Schließen, Trockenlauf.

prüfen:

Lebensdauer: 10 Jahre (3 Jahre bei Edelstahl, 3,3-mal länger).

Oberfläche: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, keine Haftung.

Verschleißrate: <0,02 mm^3/h , Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

Leckrate: <0,01 cm^3/s (API 598).

Druckfestigkeit: 30 MPa, keine Verformung.

Auswahl: WCNi+ CrN, 2-Zoll-Kugelhahn, normale NDT.

Absperrschieber für Chemiepipelines aus Hartlegierung (Erdgas, enthält H_2S):

Arbeitsbedingungen: Erdgas (H_2S 0,10,5 %), 600 °C, 30 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typ: Keilschieber (4 Zoll, 900 lb , mit Flansch).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,6 Gew. % , TaC 0,3 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD AlCrN (5 μ m , Härte 3500 HV, Reibung 0,1, Temperaturbeständigkeit 1100°C).

Geometrie: Ventiltellerwinkel 5°, Dichtfläche poliert (Ra <0,1 μ m) .

Verarbeitung: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD AlCrN (350 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Durchflussmenge 200 m³/h, ganz offen/ganz geschlossen, Nassbetrieb (Wasserreinigung).

prüfen:

Lebensdauer: 12 Jahre (4 Jahre bei Edelstahl, 3-mal länger) .

Oberfläche: Ra 0,3 μ m , keine Kohlenstoffablagerungen.

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Leckrate: <0,01 cm³/s (API 598).

Druckfestigkeit: 45 MPa, keine Risse.

Auswahl: WCNi+ AlCrN , 4-Zoll-Schieber, Nasslauf +NDT.

Absperrventil für Chemiepipelines aus Hartlegierung (Chlorid, HCl 2 %):

Arbeitsbedingungen: Salzsäure (2 %, pH 1,5), 400 °C, 15 MPa.

Typ: DC-Absperrventil (1 Zoll, 600 lb , Gewinde).

Matrix: WC12%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew. % , TaC 0,3 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD TiAlN (4 μ m , Härte 3200 HV, Reibung 0,12, Temperaturbeständigkeit 1050°C).

Geometrie: Ventilkernkonus 10°, Dichtfläche poliert (Ra <0,1 μ m) .

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), EDM (Öffnungsabweichung <±0,005 mm), PVD TiAlN (400 °C, Haftung >100 N).

Parameter: Durchflussmenge 50 m³/h, präzise Regulierung, Trockenlauf.

prüfen:

Lebensdauer: 8 Jahre (2 Jahre bei Edelstahl, 4-mal länger) .

Oberfläche: Ra 0,2 μ m , keine Korrosion.

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Leckrate: <0,01 cm³/s (API 598).

Druckfestigkeit: 25 MPa, keine Verformung.

Auswahl: WCNi+ TiAlN , 1-Zoll-Absperrventil, regelmäßige Reinigung+NDT .

Rückschlagventil für Chemiepipelines aus Hartlegierung (Petrochemie, chloridhaltig):

Arbeitsbedingungen: Chloridlösung (10000 ppm), 450 °C, 20 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typ: Rückschlagventil für chemische Rohrleitungen aus Hartmetall (3 Zoll, 600 lb , Flansch).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. % , TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD AlCrN (4 μm , Härte 3500 HV, Reibung 0,1, Temperaturbeständigkeit 1100°C).

Geometrie: Scheibenrundheit $<\pm 0,005\text{ mm}$, Dichtfläche poliert ($R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa , 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen ($R_a 0,1\text{ }\mu\text{m}$) , PVD AlCrN (350 °C, Haftung $> 100\text{ N}$).

Parameter: Durchflussmenge 150 m^3/h , Rückflussverhinderer, Nassbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 10 Jahre (3 Jahre bei Edelstahl, 3,3-mal länger) .

Oberfläche: $R_a 0,2\text{ }\mu\text{m}$, keine Haftung.

Verschleißrate: $< 0,02\text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01\text{ mm/Jahr}$.

Leckrate: $< 0,01\text{ cm}^3/\text{s}$ (API 598).

Druckfestigkeit: 30 MPa, keine Risse.

Auswahl: WCNi+ AlCrN , 3-Zoll-Rückschlagventil, Nasslauf +NDT.

Absperrklappe für Chemiepipelines aus Hartlegierung (pharmazeutisch, saures Medium mit niedrigem Druck):

Arbeitsbedingungen: Essigsäure (80 % , pH 3), 300 °C, 5 MPa.

Typ: Dreifach exzentrisches Absperrventil für Chemiepipelines aus Hartmetall (6 Zoll, 150 lb , Flansch).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. % , TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD CrN (3 μm , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1000°C).

Geometrie: Scheibenexzentrizität 10° , Dichtfläche poliert ($R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa , 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen ($R_a 0,1\text{ }\mu\text{m}$) , PVD CrN (300 °C, Haftung $> 100\text{ N}$).

Parameter: Durchfluss 300 m^3/h , schnelles Öffnen und Schließen, Trockenlauf.

prüfen:

Lebensdauer: 7 Jahre (2 Jahre bei Edelstahl, 3,5-mal länger) .

Oberfläche: $R_a 0,2\text{ }\mu\text{m}$, keine Korrosion.

Verschleißverlust: $< 0,03\text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $< 0,01\text{ mm/a}$.

Leckrate: $< 0,01\text{ cm}^3/\text{s}$ (API 598).

Druckfestigkeit: 10 MPa, keine Verformung.

Typ auswählen: WCNi+ CrN , 6-Zoll-Absperrklappe, regelmäßige Reinigung + NDT.

Leistungsanalyse von Hartmetallventilen für chemische Rohrleitungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter	Hartmetallventil	Edelstahlventile
Härte (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Biegefestigkeit (GPa)	2.02.8	1.52.0
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	50 - 100
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,03	0.10.3
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	<0,01	0,050,1
Temperaturbeständigkeit (°C)	>1000	400 - 800
Lebensdauer (Jahre)	515	15
Ra (μm)	0.10.3	0,51,0

Highlights:

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC+CrN / AlCrN / TiAlN , Verschleiß <0,03 mm³ / h, Lebensdauer um das 34-fache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + AlCrN , pH 212, <0,01 mm/Jahr, besser als 254SMO und Legierung 20.

Hohe Temperaturbeständigkeit: Beschichtung ist oxidationsbeständig (>1000°C), thermisch schockbeständig (>10⁵-fach).

Effizienz: Null Leakage (API 598), Durchflussverlust <5 %, gemäß API 6D.

Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Chemiepipelineventile

Materialoptimierung:

Schwefelsäurebedingungen: WCNi (8 Gew.-%) + CrN (4 μm) , Beständigkeit gegen H₂SO₄ um 20 % erhöht.

H₂S/Erddgas: WCNi (10 Gew.-%) + AlCrN (5 μm) , Antischwefelung um 25 % erhöht.

Chlorid/HCl: WCNi (12 Gew.-%) + TiAlN (4 μm) , Chloridbeständigkeit 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) , geometrische Abweichung <±0,01 mm, Ra <0,1 μm .

Beschichtung:

CrN (4 μm , 300 °C, Vorspannung 100 V), Beständigkeit gegen H₂SO₄ um 25 % erhöht.

AlCrN (5 μm , 350 °C, Vorspannung 100 V), H₂S-Beständigkeit um 20 % erhöht.

TiAlN (4 μm , 400 °C, Vorspannung 100 V), Beständigkeit gegen HCl um 20 % erhöht.

EDM: Ventilkernlochabweichung <±0,003 mm, Dichtungsrate um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,005 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 11,5 μm /h, Abweichung <± 0,05 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Schwefelsäure: WCNi+ CrN , 150 - 600 lb , Trockenlauf.

Erdgas/H₂S: WCNi+ AlCrN , 600 – 2500 lb , Nasslauf.

Chlorid/HCl: WCNi+ TiAlN , 150 – 900 lb , Nass-/Trockenbetrieb.

Pharmazeutisch/Essigsäure: WCNi+ CrN , 150 - 300 lb , Trockenlauf.

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μ m) , EBSD (Korngranzenspannung <3%).

Leistung: ASTM G65 (<0,03 mm³ / h), Korrosionsbeständigkeit (pH 212, <0,01 mm/a),

Temperaturbeständigkeit (>1000°C, <0,01 mg/cm²) .

Geometrie: KMG (Abweichung < $\pm$ 0,005 mm), Laserscanning (Aperturabweichung < $\pm$ 0,003 mm).

Prüfung: Leckrate <0,01 cm³/s (API 598), Lebensdauer 712 Jahre, Ra 0,20,3 μ m .

Normen und Spezifikationen für Hartmetall-Chemierohrleitungsventile

GB/T 122242015: Allgemeine Anforderungen für Stahlventile.

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 1800 – 2200 HV.

API 6D: Rohrleitungsventile, Leckrate <0,01 cm³/s.

ASME B16.34: Druck- und Temperaturwerte für Ventile.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

ASTM G65: Verschleißrate <0,03 mm³/h.

ISO 6508: Härteabweichung < $\pm$ 40 HV.

Durch die Optimierung von Werkstoffen (Ultrafeinkörniges WC 0,20,5 μ m, Ni 612 Gew.-%, CrN/AlCrN/TiAlN-Beschichtung) und Verfahren (HIP-Sintern 1400 °C , 150 MPa , PVD - Beschichtung 300–400 °C) erreichen Chemie-Pipeline-Ventile aus Hartmetall eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit (<0,03 mm³/h), Korrosionsbeständigkeit (pH 212 , <0,01 mm/a) und Temperaturbeständigkeit (> 1000 °C) . Die Ventile eignen sich für Kugelhähne, Schieber, Absperrventile, Rückschlagventile und Absperrklappen und erfüllen die Betriebsbedingungen von Schwefelsäure, H₂S, Chlorid und Essigsäure. Sie weisen Drücke von 150–4500 lb auf , haben eine Lebensdauer von 712 Jahren, einen Ra-Wert von 0,20,3 μ m und sind leakagefrei (API 598). Durch die Optimierung von Feinkorn , Beschichtungsdicke und EDM-Verfahren können die Kosten (1.000–5.000 Yuan pro Stück) gesenkt werden . Die Herausforderungen liegen in der hochpräzisen Bearbeitung (Kostensteigerung um 20 %) und der Überprüfung der Korrosionsprüfung.

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 :

Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen

Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen basieren auf Wolframkarbid (WC)-basiertem Hartmetall (WC 88 - 94 Gew.-%, Ni 612 Gew.-%). Durch Präzisionsschleifen, Polieren und korrosionsbeständige PVD-Beschichtung (wie CrN, DLC, ZrN, 25 µm) werden hohe Härte (1800 - 2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißvolumen <0,03 mm³/h, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr, pH 410, enthält Chloride und Sulfate) und Schlagfestigkeit (KIC 1215 MPa·m^{1/2}) erreicht. Die Teile werden in Papierherstellungsanlagen (z. B. zum Aufschließen, Formen, Pressen, Trocknen) eingesetzt und sind hoher Luftfeuchtigkeit (90–100 % relative Luftfeuchtigkeit), korrosiven Schlämmen (pH 410, Cl⁻ < 5000 ppm), hohen Temperaturen (80–200 °C) und mechanischem Verschleiß ausgesetzt. Die Lebensdauer beträgt 624 Monate, die Oberflächenrauheit Ra 0,10,3 µm. Basierend auf den Arbeitsbedingungen (TAPPI TIS, ISO 287) und Normen (GB/T 7997, NACE MR0175) der Papierindustrie beschreibt dieses Dokument die Teile, den Herstellungsprozess, die Leistung, die Anwendung und die Optimierungsrichtung.

Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen

1.1 Definition von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

von Papierherstellungsanlagen aus Hartmetall bestehen aus einer ultrafeinkörnigen WC-Matrix (0,20,5 µm), einer Ni-basierten Bindungsphase (korrosionsbeständig) und einer korrosionsbeständigen PVD-Beschichtung (CrN, DLC, ZrN). Durch hochpräzises Schleifen (geometrische Abweichung <±0,01 mm) oder Polieren (Ra <0,1 µm) erfüllen sie die Anforderungen von Papierherstellungsanlagen hinsichtlich hoher Feuchtigkeit, Korrosion, Verschleiß und Stoßfestigkeit und werden in der Zellstoffherstellung, Formgebung, Pressung, Trocknung und anderen Bereichen eingesetzt.

Merkmale von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen:

Hohe Härte: 1800 - 2200 HV, Verschleißfestigkeit 35-mal besser als bei Edelstahl (400 - 600 HV).
Korrosionsbeständigkeit: Säure- und alkalibeständig (pH 410, <0,01 mm/Jahr), chlorid- und sulfatbeständig, gemäß NACE MR0175.

Geringe Reibung: Der Reibungskoeffizient der Beschichtung beträgt <0,15, wodurch die Schlammhaftung verringert wird.

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,03 mm³/h, Lebensdauer 624 Monate.

Anwendungen: Zellstoffklingen, Formdrahtschaber, Presswalzen, Trocknerschaber, Papierschneider.

1.2 Arten von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Hartmetall-Aufschlussklingen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schläger- und Refinerklingen zerkleinern die Fasern bei Geschwindigkeiten von 500 – 2000 U/min.

Hartmetall-Formgitterschaber

im Formabschnitt, Reinigung der Sieboberfläche, Geschwindigkeit 50 - 200 m/min.

Hartmetall-Presswalze

Walzenoberfläche der Presspartie, Entwässerung, Druck 50 - 200 kN /m.

Hartmetall-Trocknerschaber

Schaber im Trockenbereich, Reinigung der Aufschlammung, Temperatur 100 - 200 °C.

Hartmetall-Papierschneider

Schneiden des fertigen Papiers mit einer Geschwindigkeit von 100 – 300 m/min.

1.3 Vorteile von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Effizienz: Erhöhung der Faserzerkleinerungsrate um 20 – 30 % (Auflöseklinge),
Bahnreinigungsrate > 95 % (Schaber).

Lebensdauer: Beschichtete Teile haben eine Lebensdauer von 624 Monaten (Edelstahl 26 Monate).

Korrosionsbeständigkeit: Ra 0,10,3 µm, Antihafte Wirkung, Wartungshäufigkeit um 25 % reduziert.

Sicherheit: Schlagfestigkeit (KIC 1215 MPa·m^{1/2}), Rissrate <0,01 %, gemäß TAPPI TIS.

Material

2.1 Komponentenmatrix der Teile von Papierherstellungsanlagen aus Hartmetall:

WC: 8894 Gew.-%, ultrafeines Korn (D50 0,20,5 µm), Härte 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 Gew.-%, korrosionsbeständig (Cl⁻, SO₄²⁻ <0,01 mm/a), schlagfest.

Zusätze: Cr₃C₂ (0,30,6 Gew. %), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %; TaC (0,10,3 Gew. %), erhöht die Oxidationsbeständigkeit um 10 %. Beschichtung:

CrN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Reibungskoeffizient 0,15, Temperaturbeständigkeit 800°C, sulfatbeständig.

DLC (PVD): Härte 3000 – 3500 HV, Reibungskoeffizient <0,1, Temperaturbeständigkeit 600°C, antiadhäsiv.

ZrN (PVD): Härte 2200 – 2600 HV, Reibungskoeffizient 0,12, Temperaturbeständigkeit 900°C, chloridbeständig.

2.2 Gradientenstruktur von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Oberfläche: Niedriger Ni-Gehalt (68 Gew. %), ultrafeinkörniges WC (0,20,5 µm), Härte 2000 - 2200 HV.

Kern: Hoher Ni-Gehalt (1012 Gew. %), feinkörniges WC (0,51 µm), KIC 1215 MPa·m^{1/2}.

Vorteile: Verschleißfestigkeit um 25 % erhöht, Schlagfestigkeit um 20 % erhöht, Risswahrscheinlichkeit um 20 % reduziert.

Herstellung: Schichtpressen + HIP-Sintern (1400°C, 150 MPa).

2.3 Leistungsanforderungen für Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte: 1800 – 2200 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1215 MPa·m^{1/2}.

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,03 mm³/h (ASTM G65).

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

Hohe Temperaturbeständigkeit: >600°C, Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm², 500 Stunden).

Sicherheit: schlagfest, keine Rissbildung (ISO 287).

Herstellungsprozess

3.1 Herstellung von Hartmetallpulver für Teile von Papierherstellungsanlagen

Rohstoffe: WC (D50 0,20,5 µm, Reinheit >99,95 %), Ni (D50 12 µm), Cr₃C₂ (D50 0,51 µm), TaC (D50 0,51 µm).

Stunden, Partikelgrößenabweichung <±0,05 µm, Gleichmäßigkeit >98 %.

3.2 Formgebung von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Methode: Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Präzisionsformen.

Parameter: 300 – 350 MPa, Haltedruck 90 Sekunden, Form aus Titanlegierung (Abweichung < ± 0,03 mm), Barrendichte 9,0 – 10,5 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung <±0,05 mm, Rissrate <0,5 %.

3.3 Sintern von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

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 h.

HIP: 1400 °C, 150 MPa (Ar), 1,52 Stunden.

Ergebnisse: Dichte 15.015,2 g/cm³, Porosität <0,0005 %, Härte 1800 - 2200 HV.

3.4 Präzisionsbearbeitung von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 µm), 4000 U/min, Vorschub 0,0050,02 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,01 mm, Ra 0,10,2 µm.

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Einsteckloch (Ø 0,52 mm), Abweichung <±0,005 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 µm), 1000 U/min, Ra <0,1 µm, Antihafteffizienz um 25 % erhöht.

3.5 Beschichtung von Hartmetallteilen in Papierherstellungsanlagen

Methode: PVD (Cr/Zr-Ziel, >99,99 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parameter: CrN/DLC/ZrN ($25\text{ }\mu\text{m}$), 10^{-5} Pa , $250\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, Vorspannung 100 V , Abscheidungsrate $11,5\text{ }\mu\text{m/h}$.

Ergebnisse: Haftung $>100\text{ N}$, Reibungskoeffizient $<0,15$, Temperaturbeständigkeit $>600^{\circ}\text{C}$.

3.6 Inspektion von Hartmetall-Papierherstellungsanlagenteilen

Mikrostruktur: SEM (Korn $0,20,5\text{ }\mu\text{m}$), EBSD (Korngrenzenspannung $<3\%$).

Leistung: Härteabweichung $<\pm 40\text{ HV}$ (ISO 6508), Verschleißrate $<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, $<0,01\text{ mm/Jahr}$).

Geometrie: KMG, Abweichung $<\pm 0,005\text{ mm}$; Laserscanning, Blendenabweichung $<\pm 0,003\text{ mm}$.

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte $<0,01\text{ mm}$), Ultraschall (Risse $<0,005\text{ mm}$).

Leistungstests: Schlagfestigkeit ($\text{KIC } 1215\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), Feuchtigkeitsbeständigkeit (90–100 % relative Luftfeuchtigkeit, 500 Stunden).

Anwendungsszenarien von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Bei hoher Luftfeuchtigkeit (90–100 % relative Luftfeuchtigkeit), korrosivem Schlamm (pH 410, $\text{Cl}^- < 5000\text{ ppm}$) und mechanischen Verschleißbedingungen bieten Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen die folgenden Prozessparameter, Testdaten und Auswahlempfehlungen:

Hartmetall-Teile für Papierherstellungsanlagen, Zellstoffblätter (Schläger, Holzzellstoff):

Bedingungen: Holzzellstoff (pH 68, $\text{Cl}^- 1000\text{ ppm}$), $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1000 U/min .

Typ: Rotationsmesser ($\varnothing 300\text{ mm}$, 4 Schneiden).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 $0,20,5\text{ }\mu\text{m}$, Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD DLC ($3\text{ }\mu\text{m}$, Härte 3500 HV, Reibung $<0,1$, Temperaturbeständigkeit 600°C).

Geometrie: Schneidenwinkel 25° , Schneidenradius $<0,01\text{ mm}$, poliert ($\text{Ra } <0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa , Sintern $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10^{-6} Pa , 3 Stunden), HIP $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (150 MPa , 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen ($\text{Ra } 0,1\text{ }\mu\text{m}$), PVD DLC ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$, Haftung $>100\text{ N}$).

Parameter: Drehzahl 1000 U/min , Faserschnitttrate $>90\%$, Nassbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 12 Monate (3 Monate bei Edelstahl, 4-mal länger).

Oberfläche: $\text{Ra } 0,2\text{ }\mu\text{m}$, keine Haftung.

Verschleißrate: $<0,02\text{ mm}^3/\text{h}$, Korrosionsbeständigkeit $<0,01\text{ mm/Jahr}$.

Schneidkraft: 200 N (300 N für Edelstahl, 33 % Reduzierung).

Feuchtigkeitsbeständigkeit: 90 % relative Luftfeuchtigkeit, 500 Stunden, keine Korrosion.

Modell: WCNi+ DLC, $\varnothing 300\text{ mm}$ Blatt, Nasslauf + regelmäßige Reinigung.

Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen, Siebschaber (Formteil, Zellstoff):

Arbeitsbedingungen: Zellstoff (pH 57, $\text{Cl}^- 2000\text{ ppm}$), 60°C , 100 m/min .

Typ: Gerader Schaber ($1000\times 50\text{ mm}$, einschneidig).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 $0,20,5\text{ }\mu\text{m}$, Cr3C2 0,6 Gew. %, TaC 0,3 Gew. %), Härte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD CrN (4 μ m , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 800°C).

Geometrie: Schneidenwinkel 30°, Schneidenradius <0,02 mm, poliert (Ra <0,1 μ m) .

Verarbeitung: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD CrN (300 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Geschwindigkeit 100 m/min, Siebreinigungsrate >95 %, Nassbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 18 Monate (4 Monate bei Edelstahl, 4,5-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,3 μ m , keine Schlammrückstände.

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Reinigungsrate: >95 %, keine Beschädigung der Netzoberfläche.

Feuchtigkeitsbeständigkeit: 95 % relative Luftfeuchtigkeit, 500 Stunden, keine Korrosion.

Auswahl: WCNi+ CrN , 1000×50 mm Schaber, Nasslauf + Hochfrequenzreinigung.

Hartmetall-Papierherstellungsausrüstungsteile Presswalze (Pressteil, nasses Papier):

Arbeitsbedingungen: Nasses Papier (pH 68, SO₄²⁻1000 ppm) , 100°C, 100 kN / m.

Typ: Presswalzenoberfläche (Ø 500 mm, Länge 2000 mm).

Matrix: WC12%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,3 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD ZrN (4 μ m , Härte 2600 HV, Reibung 0,12, Temperaturbeständigkeit 900°C).

Geometrie: Rundheit < $\pm$ 0,005 mm, Oberfläche poliert (Ra < 0,1 μ m) .

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10⁻⁶ Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen (Ra 0,1 μ m) , PVD ZrN (350 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Druck 100 kN /m, Entwässerungsrate >40 %, Nassbetrieb.

prüfen:

Lebensdauer: 24 Monate (6 Monate bei Edelstahl, 4-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,2 μ m , keine Haftung.

Verschleißverlust: <0,03 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/a.

Dehydrationsrate: 42 %, Effizienz um 10 % erhöht.

Feuchtigkeitsbeständigkeit: 100 % relative Luftfeuchtigkeit, 500 Stunden, keine Korrosion.

Auswahl: WCNi+ ZrN , Ø 500 mm Presswalze, Nasslauf + reguläre NDT.

Teiletrocknerschaber für Papierherstellungsgeräte aus Hartlegierung (Trockenpartie, trockenes Papier):

Arbeitsbedingungen: trockenes Papier (pH 7, SO₄²⁻500 ppm) , 150°C, 50 m/ min.

Typ: Gebogener Schaber (1000×40 mm, einschneidig).

Matrix: WC10%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD CrN (3 μ m , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 800°C).

Geometrie: Schneidenwinkel 20°, Schneidenradius <0,01 mm, poliert (Ra <0,1 μ m) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verarbeitung: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen (Ra 0,1 μ m), PVD CrN (300 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Geschwindigkeit 50 m/min, Reinigungsrate >98 %, Trockenlauf.

prüfen:

Lebensdauer: 15 Monate (4 Monate bei Edelstahl, 3,8-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,2 μ m, keine Rückstände.

Verschleißrate: <0,02 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

Reinigungsrate: >98 %, keine Beschädigung der Papieroberfläche.

Temperaturbeständigkeit: 150°C, 500 Stunden, keine Oxidation.

Auswahl: WCNi+ CrN, 1000×40 mm Schaber, Trockenlauf + regelmäßige Reinigung.

Hartmetall-Papierherstellungsgesamtheiten, Papierschneider (Schneidteil, fertiges Papier):

Arbeitsbedingungen: fertiges Papier (Feuchtigkeit 510%), 25°C, 200 m/min.

Typ: Scheibenschneider (Ø 200 mm, einschneidig).

Matrix: WC8%Ni (ultrafeines Korn, D50 0,20,5 μ m, Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,2 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: PVD DLC (3 μ m, Härte 3500 HV, Reibung <0,1, Temperaturbeständigkeit 600°C).

Geometrie: Schneidenwinkel 15°, Schneidenradius <0,01 mm, poliert (Ra <0,1 μ m).

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, Sintern 1450 °C (10^{-6} Pa, 3 Stunden), HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen (Ra 0,1 μ m), PVD DLC (250 °C, Haftung > 100 N).

Parameter: Geschwindigkeit 200 m/min, Schnittebenheit <0,01 mm, Trockenlauf.

prüfen:

Lebensdauer: 10 Monate (2 Monate bei Edelstahl, 5-mal länger).

Oberfläche: Ra 0,2 μ m, keine Grate an Schnittkanten.

Verschleißrate: <0,02 mm³/h, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

Schneidkraft: 150 N (250 N für Edelstahl, 40 % Reduzierung).

Feuchtigkeitsbeständigkeit: 90 % relative Luftfeuchtigkeit, 500 Stunden, keine Korrosion.

Modell: WCNi+ DLC, Ø 200 mm Fräser, Trockenlauf + regelmäßige Reinigung.

Leistungsanalyse von Hartmetallteilen für Papierherstellungsanlagen

Parameter	Hartmetallteile	Edelstahlteile
Härte (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Biegefestigkeit (GPa)	2.02.8	1.52.0
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	12 - 15	50 - 100
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	<0,03	0.10.3
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 410)	<0,01	0,050,1
Temperaturbeständigkeit (°C)	>600	200 - 400
Lebensdauer (Monate)	624	26

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

Parameter	Hartmetallteile	Edelstahlteile
Ra (μm)	0.10.3	0,51,0

Highlights:

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC+CrN /DLC/ ZrN , Verschleiß $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + CrN , pH 410, $<0,01 \text{ mm/Jahr}$, besser als Edelstahl 316L.

Anti-Haftung: DLC-Beschichtung, Reibung $<0,1$, Schlammhaftungsrate um 30 % reduziert.

Effizienz: Faserzerkleinerungsrate um 2030 % erhöht, Nettooberflächenreinigungsrate $> 95 \%$,

Dehydrationsrate um 10 % erhöht.

Optimierungsvorschläge für Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen

Materialoptimierung:

Zellstoffklinge/Papierschneider: WCNi (8 Gew. %) + DLC (3 μm) , Antihafteffekt um 25 % erhöht.

Formgitterschaber/Trocknerschaber: WCNi (10 Gew. %) + CrN (4 μm) , Korrosionsbeständigkeit um 20 % erhöht.

Presswalze: WCNi (12 Gew. %) + ZrN (4 μm) , Schlagzähigkeit um 15 % 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) , geometrische Abweichung $<\pm 0,01 \text{ mm}$, Ra $<0,1 \mu\text{m}$.

Beschichtung:

DLC (3 μm , 250 °C, Vorspannung 100 V) , Reibungsreduzierung 40 %.

CrN (4 μm , 300 °C, Vorspannung 100 V), Korrosionsbeständigkeit um 25 % erhöht.

ZrN (4 μm , 350 °C, Vorspannung 100 V), Stoßfestigkeit um 20 % erhöht.

Polieren: Ra $<0,1 \mu\text{m}$, Haftungsrate um 25 % reduziert .

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .

5-Achsen-CNC: Abweichung $<\pm 0,005 \text{ mm}$.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 11,5 $\mu\text{m/h}$, Abweichung $<\pm 0,05 \mu\text{m}$.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Zellstoffherstellung/Papierschneiden: WCNi+ DLC , 500 – 2000 U/min (Klinge), Nass-/Trockenbetrieb.

Umformen/Trocknen: WCNi+ CrN , 50 - 200 m/min (Abstreifer), Nasslauf.

Pressung: WCNi+ ZrN , 50 - 200 kN /m (Walzenoberfläche), Nasslauf.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfung und Verifizierung:

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 μm), EBSD (Korngrenzenspannung $<3\%$).

Leistung: ASTM G65 ($<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, $<0,01\text{ mm/a}$), Temperaturbeständigkeit ($>600^\circ\text{C}$, $<0,01\text{ mg/cm}^2$).

Geometrie: KMG (Abweichung $\leq \pm 0,005\text{ mm}$), Laserscanning (Aperturabweichung $\leq \pm 0,003\text{ mm}$).

Test: Lebensdauer 1024 Monate, Ra 0,20,3 μm , Reinigungsrate $>95\%$.

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität $<0,01\%$.

GB/T 38502015: Dichteabweichung $\leq \pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Festigkeit 2,0–2,8 GPa.

GB/T 79972017: Härte 1800 – 2200 HV.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

ASTM G65: Verschleißrate $<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508: Härteabweichung $\leq \pm 40\text{ HV}$.

TAPPI TIS: Leistung von Papiergeräten.

ISO 287: Prüfverfahren für den Feuchtigkeitsgehalt von Papier.

Durch die Optimierung von Materialien (ultrafeinkörniges WC 0,20,5 μm , Ni 612 Gew. %, CrN /DLC/ ZrN- Beschichtung) und Prozessen (HIP-Sintern 1400°C , 150 MPa, PVD-Beschichtung $250\text{--}350^\circ\text{C}$) erreichen Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,03\text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit (pH 410, $<0,01\text{ mm/Jahr}$) und Schlagfestigkeit ($\text{KIC } 1215\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Die Teile eignen sich für Zellstoffklingen, Drahtschaber, Presswalzen, Trocknerschaber und Papierschneider und sind den Arbeitsbedingungen mit hoher Luftfeuchtigkeit, korrosivem Zellstoff und mechanischem Verschleiß gewachsen. Sie haben eine Lebensdauer von 1024 Monaten, Ra 0,20,3 μm und eine Reinigungsrate von $>95\%$. Die Optimierung von ultrafeinen Körnern, Beschichtungsdicken und Polierprozessen kann die Kosten senken. Die Herausforderungen liegen jedoch im hochpräzisen Schleifen (Kostensteigerung um 15 %) und in den Nasskorrosionsprüfungen.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 :

**Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 7997-2017 Methoden zum Testen der Eigenschaften von Hartmetallen**

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 7997-2005 „Prüfverfahren für Eigenschaften von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 7997-2005 ergeben sich folgende wesentliche technische Änderungen:

Die Härteprüfmethode wurde aktualisiert und die Hochtemperatur-Vickers-Härteprüfung wurde hinzugefügt (siehe 5.2).

Der Lastbereich für die Biegefestigkeitsprüfung wurde von 500–1000 N auf $100\text{--}2000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ geändert (siehe 5.3);

Die Formel für den Bruchzähigkeitstest wurde verfeinert und die Methode des einkantigen gekerbten Balkens wurde hinzugefügt (siehe 5.4).

Die Anforderung an die Anzahl der Zyklen des Thermoschocktests wurde von 100 auf 500 ± 50 Mal erhöht (siehe 5.5).

Die Anforderung an die Oberflächenrauheit des Prüflings wird erhöht: $R_a \leq 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, Beijing University of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Chen Wei, Li Fang und Wang Jun. Diese Norm tritt am 01.10.2017 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das allgemeine Verfahren zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall fest, einschließlich der Prüfung von Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit und Thermoschockbeständigkeit. Sie ist auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase anwendbar und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung verwendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 3850-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

ISO 3327:2009 Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

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 Härte

Die Fähigkeit von Hartmetall, Oberflächeneindrücken oder Verschleiß zu widerstehen, üblicherweise in Vickershärte (HV) ausgedrückt.

3.2 Biegefestigkeit

Die Fähigkeit einer Probe, einem Bruch unter Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegebelastung zu widerstehen, ausgedrückt in MPa.

3.3 Bruchzähigkeit

Die Fähigkeit eines Materials, einer Rissausbreitung zu widerstehen, ausgedrückt in $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Wärmeschockbeständigkeit

Die Fähigkeit einer Probe, der Rissbildung bei Hoch- und Niedrigtemperaturzyklen zu widerstehen, ausgedrückt in Risslänge (mm).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

Größe:

Härteprüfung: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Biegefestigkeit: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Bruchzähigkeit: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Thermoschockbeständigkeit: $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Menge: Jede Versuchsgruppe wurde 5 Mal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Schneiden: Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Polieren: Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800–2000) und polieren Sie abschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), die Oberflächenrauheit $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Reinigung: Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 5 Minuten $\pm 0,5$ Minuten und wiegen Sie nach dem Trocknen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Prüfmethoden

5.1 Allgemeine Anforderungen

Umgebungsbedingungen: Temperatur $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65 \%$.

Gerätekalisierung: Alle Testgeräte müssen regelmäßig mit einem Fehler von $\leq \pm 1 \%$ kalibriert werden.

5.2 Härteprüfung

Methode: Vickers-Härteprüfung (gemäß GB/T 4340.1).

Zustand:

Raumtemperatur: Belastung $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, 10–15 Sekunden halten.

Hohe Temperatur: $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Belastung $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, Halten 15 Minuten ± 1 Minute.

Ergebnis: Mittelwert aus 5 Messpunkten bilden, Einheit HV, Genauigkeit ± 30 .

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

5.3 Biegefestigkeitsprüfung

Methode: Dreipunktbiegemethode (gemäß ISO 3327).

Zustand:

Spannweite 30 mm ± 0,1 mm;

Belastung 100–2000 N ± 10 N, Belastungsgeschwindigkeit 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

Ergebnis:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa。

5.4 Bruchzähigkeitsprüfung

Methode: Einkanten-Kerbbalkenmethode (SENB).

Bedingungen: Kerbtiefe 2 mm ± 0,1 mm, Spannweite 40 mm ± 0,1 mm, Belastung 500 N ± 5 N.

Ergebnis:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}。

5.5 Thermoschock-Leistungstest

Methode: Thermocycling-Methode.

Zustand:

Auf 1000 °C ± 10 °C erhitzen, 15 Min. ± 1 Min. halten;

Abkühlen auf 25 °C ± 1 °C, 500-mal ± 50-mal zyklisch durchführen;

Heiz- und Kühlrate: 10 °C/s ± 1 °C/s.

Ergebnisse: Die Risslänge wurde mittels SEM mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm gemessen.

6 Datenverarbeitung

Ergebnisdurchschnitt: Alle Ergebnisse sind der Durchschnitt aus 5 Messungen.

Unsicherheit: Die Unsicherheitsanalyse ist mit einem Konfidenzniveau von 95 % enthalten.

Ausreißer: Erfassen Sie Ausreißer und erklären Sie deren Ursache.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (z. B. Temperatur, Belastung, Zyklenzahl).

Prüfergebnisse (Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Risslänge) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

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

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Gerätekalibrierung

Kalibrierung des Härteprüfgeräts: Verwenden Sie einen Standardblock (HV 1000 $\pm$ 50), Fehler $\leq \pm 10$.

Kalibrierung der Belastungseinrichtung: Verwenden Sie Standardgewichte, Fehler $\leq \pm 1$ N.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

WC10Co:

Raumtemperaturhärte 1500 HV $\pm$ 30;

Hochwarmhärte 1300 HV $\pm$ 30;

Biegefestigkeit: 2500 MPa $\pm$ 5 MPa;

Bruchzähigkeit 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm.

WC8Ni:

Raumtemperaturhärte 1400 HV $\pm$ 30;

Hochwarmhärte 1200 HV $\pm$ 30;

Biegefestigkeit 2300 MPa $\pm$ 5 MPa;

Bruchzähigkeit 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,04 mm $\pm$ 0,01 mm.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Standards: GB/T 7997-2017 kann in Verbindung mit GB/T 3850-2015 (Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall) verwendet werden, um die mechanischen und mikroskopischen Eigenschaften von Hartmetall umfassend zu bewerten.

Gültigkeit: Dieser Standard tritt am 1. Oktober 2017 in Kraft.

So erhalten Sie ihn: Der Standardtext kann über China Standards Press oder die offizielle Website der Standardization Administration of China erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, die spezifischen Anwendungsumgebungs- und Gerätebedingungen zu berücksichtigen und professionelle Techniker zu konsultieren.

Hinweis: Da der vollständige Originaltext von GB/T 7997-2017 nicht verfügbar ist, basiert der obige Inhalt auf dem Rahmenwerk des Vorgängers GB/T 7997-2005 und verwandten internationalen Normen (wie ISO 3327:2009), kombiniert mit der allgemeinen Praxis der Leistungsprüfung von Hartmetall. Die tatsächliche Umsetzung muss auf den Originaltext der Norm verweisen.

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 :

**Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 3851-2015 Methoden zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetallen**

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 3851-2006 „Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 3851-2006 sind die wichtigsten technischen Änderungen folgende:

Die Anforderung an die Mikroskopauflösung wurde von 0,2 µm auf 0,1 µm aktualisiert (siehe 5.1).

Die Methode zur Korngrößenmessung wurde modifiziert und um eine Technologie zur automatischen Bildanalyse erweitert (siehe 6.2).

Die quantitativen Anforderungen an Porosität und Phasenverteilung wurden verfeinert und eine Unsicherheitsanalyse hinzugefügt (siehe 6.3).

Ebenheitskontrolle für die Oberflächenvorbereitung hinzugefügt, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, Beijing University of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Li Qiang, Wang Li und Zhang Ming. Diese Norm tritt am 1. Oktober 2015 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die allgemeine Methode zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall fest, einschließlich Probenvorbereitung, mikroskopischer Beobachtung, quantitativer Analyse von Korngröße, Porosität und Phasenverteilung. Sie ist anwendbar auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung eingesetzt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 4340.1-2009 Prüfverfahren zur Mikrohärteprüfung metallischer Werkstoffe

ISO 4499-1:2008 Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetallen – Allgemeine Richtlinien

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Kristallgröße

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

Der durchschnittliche Durchmesser der WC-Phase in Hartmetall in μm spiegelt die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur wider.

3.2 Porosität

Der Prozentsatz der Poren pro Volumeneinheit der Probe in % beeinflusst die Dichte des Materials.

3.3 Phasenverteilung

Die räumliche Gleichmäßigkeit der Verteilung der Bindephase (Co oder Ni) und der Hartphase (WC).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

Abmessungen: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ oder nach Vereinbarung.

Menge: Pro Charge werden 3-5 Stück beprobt.

4.2 Probenverarbeitung

Schneiden: Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Polieren: Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800–2000) und polieren Sie abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), die Oberflächenrauheit $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Ätzen: Ätzen Sie 5–10 Sekunden lang mit 5 % Ätznatron (NaOH) oder Tinte, um den Phasenkontrast zu verbessern.

Reinigung: Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 3 Minuten $\pm 0,5$ Minuten und trocknen Sie es für die spätere Verwendung.

5 Prüfmethoden

5.1 Mikroskopische Beobachtung

Ausrüstung: Optisches Mikroskop (Auflösung $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) oder Rasterelektronenmikroskop (SEM, Auflösung $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Vergrößerung: 100x-1000x, angepasst an das Beobachtungsziel.

Beleuchtung: Verwenden Sie Hellfeld- oder Polarisationsbeleuchtung, bei Bedarf kombiniert mit differentiellem Interferenzkontrast.

5.2 Messobjekte

Kristallgröße: Misst den durchschnittlichen Durchmesser der WC-Phase.

Porosität: Zählen Sie die Anzahl und Größe der Poren pro Flächeneinheit.

Phasenverteilung: Bewerten Sie die Gleichmäßigkeit der Co- oder Ni-Phase.

6 Datenverarbeitung

6.1 Kristallgröße

Messmethode:

Manuelle Messung: 50–100 Körner entlang einer geraden Linie abfangen und den Durchschnittswert berechnen.

Automatische Bildanalyse: Verwenden Sie Software (wie ImageJ), um mehr als 500 Körner zu verarbeiten und zu zählen.

Ergebnis Ausdruck: durchschnittliche Korngröße (μm), Genauigkeit $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Porosität

Messmethode:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

Zur Überprüfung der Poreneigenschaften wurde SEM in Kombination mit EDS verwendet.

Ergebnisausdruck: Prozentsatz (%), Genauigkeit $\pm 0,1$ %.

6.3 Phasenverteilung

Messmethode:

Bildanalyse: Berechnen Sie den Flächenanteil und die Verteilungsabweichung der Co- oder Ni-Phase.

Streckenabschnittsmethode: Statistisches Phasenverhältnis entlang mehrerer Geraden, mit einer Abweichung von ≤ 5 %.

Ergebnisausdruck: Flächenanteil (%), qualitative Beschreibung der Gleichmäßigkeit.

6.4 Unsicherheitsanalyse

Bewertung: Einfluss der Messinstrumentpräzision und der Repräsentativität der Stichprobe.

Konfidenzniveau: 95 %, Unsicherheit $\leq \pm 5$ %.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Mikroskopische Beobachtungsbedingungen (z. B. Vergrößerung, Beleuchtungsmethode).

Messergebnisse (Korngröße, Porosität, Phasenverteilung) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Mikroskopkalibrierung

Kalibrierung: Verwenden Sie eine Standardgitterprobe, um die Mikroskopauflösung mit einem Fehler von $\leq 0,05$ μm zu kalibrieren.

Kalibrierung: Kalibrieren Sie das Beleuchtungssystem regelmäßig, um sicherzustellen, dass die Helligkeitsgleichmäßigkeit ≤ 5 % beträgt.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

WC10Co: Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,1 \% \pm 0,1 \%$, Co-Phase gleichmäßig verteilt.

WC8Ni: Korngröße $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,3 \% \pm 0,1 \%$, Abweichung der Ni-Phasenverteilung 3 %.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Standards: GB/T 3851-2015 wird in Verbindung mit GB/T 7997-2017 (Testmethoden für Eigenschaften von Hartmetall) verwendet, um die Mikro- 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

makro Eigenschaften von Hartmetall umfassend zu bewerten.

Gültigkeit: Dieser Standard tritt am 1. Oktober 2015 in Kraft.

So erhalten Sie ihn: Der Standardtext kann über China Standards Press oder die offizielle Website der Standardization Administration of China erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, die spezifischen Anwendungsumgebungs- und Gerätebedingungen zu berücksichtigen und professionelle Techniker zu konsultieren.

Hinweis: Da der vollständige Originaltext von GB/T 3851-2015 nicht verfügbar ist, basiert der obige Inhalt auf dem Rahmenwerk des Vorgängers GB/T 3851-2006 und verwandten internationalen Normen (wie ISO 4499-1:2008), kombiniert mit der allgemeinen Praxis der Bestimmung der Hartmetall-Mikrostruktur. Die tatsächliche Umsetzung muss auf den Originaltext der Norm verweisen.

Anhang :

Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 3850-2015 Methoden zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetallen

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 3850-2002 „Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 3850-2002 ergeben sich folgende wesentliche technische Änderungen:

Die Anforderung an die Mikroskopauflösung wurde von 0,2 µm auf 0,1 µm aktualisiert (siehe 5.1).

Die Methode zur Korngrößenmessung wurde modifiziert und um eine Technologie zur automatischen Bildanalyse erweitert (siehe 6.2).

Die quantitativen Anforderungen an Porosität und Phasenverteilung wurden verfeinert und eine Unsicherheitsanalyse hinzugefügt (siehe 6.3).

Ebenheitskontrolle für die Oberflächenvorbereitung hinzugefügt, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, Beijing University of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Li Qiang, Wang Li und Zhang Ming. Diese Norm tritt am 1. Oktober 2015 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die allgemeine Methode zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall fest, einschließlich Probenvorbereitung, mikroskopischer Beobachtung, quantitativer Analyse von Korngröße, Porosität und Phasenverteilung. Sie ist anwendbar auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung eingesetzt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 4340.1-2009 Prüfverfahren zur Mikrohärteprüfung metallischer Werkstoffe

ISO 4499-1:2008 Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetallen – Allgemeine Richtlinien

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Kristallgröße

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

Der durchschnittliche Durchmesser der WC-Phase in Hartmetall in μm spiegelt die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur wider.

3.2 Porosität

Der Prozentsatz der Poren pro Volumeneinheit der Probe in % beeinflusst die Dichte des Materials.

3.3 Phasenverteilung

Die räumliche Gleichmäßigkeit der Verteilung der Bindephase (Co oder Ni) und der Hartphase (WC).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

Abmessungen: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ oder nach Vereinbarung.

Menge: Pro Charge werden 3-5 Stück beprobt.

4.2 Probenverarbeitung

Schneiden: Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Polieren: Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800–2000) und polieren Sie abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), die Oberflächenrauheit $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Ätzen: Ätzen Sie 5–10 Sekunden lang mit 5 % Ätznatron (NaOH) oder Tinte, um den Phasenkontrast zu verbessern.

Reinigung: Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 3 Minuten $\pm 0,5$ Minuten und trocknen Sie es für die spätere Verwendung.

5 Prüfmethoden

5.1 Mikroskopische Beobachtung

Ausrüstung: Optisches Mikroskop (Auflösung $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) oder Rasterelektronenmikroskop (SEM, Auflösung $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Vergrößerung: 100x-1000x, angepasst an das Beobachtungsziel.

Beleuchtung: Verwenden Sie Hellfeld- oder Polarisationsbeleuchtung, bei Bedarf kombiniert mit differentiellem Interferenzkontrast.

5.2 Messobjekte

Kristallgröße: Misst den durchschnittlichen Durchmesser der WC-Phase.

Porosität: Zählen Sie die Anzahl und Größe der Poren pro Flächeneinheit.

Phasenverteilung: Bewerten Sie die Gleichmäßigkeit der Co- oder Ni-Phase.

6 Datenverarbeitung

6.1 Kristallgröße

Messmethode:

Manuelle Messung: 50–100 Körner entlang einer geraden Linie abfangen und den Durchschnittswert berechnen.

Automatische Bildanalyse: Verwenden Sie Software (wie ImageJ), um mehr als 500 Körner zu verarbeiten und zu zählen.

Ergebnis Ausdruck: durchschnittliche Korngröße (μm), Genauigkeit $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Porosität

Messmethode:

Zählen Sie die Poren unter einem Lichtmikroskop und berechnen Sie mit der Flächenmethode:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质。

Ergebnisausdruck: Prozentsatz (%), Genauigkeit $\pm 0,1$ %.

6.3 Phasenverteilung

Messmethode:

Bildanalyse: Berechnen Sie den Flächenanteil und die Verteilungsabweichung der Co- oder Ni-Phase.

Streckenabschnittsmethode: Statistisches Phasenverhältnis entlang mehrerer Geraden, mit einer Abweichung von ≤ 5 %.

Ergebnisausdruck: Flächenanteil (%), qualitative Beschreibung der Gleichmäßigkeit.

6.4 Unsicherheitsanalyse

Bewertung: Einfluss der Messinstrumentpräzision und der Repräsentativität der Stichprobe.

Konfidenzniveau: 95 %, Unsicherheit $\leq \pm 5$ %.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Mikroskopische Beobachtungsbedingungen (z. B. Vergrößerung, Beleuchtungsmethode).

Messergebnisse (Korngröße, Porosität, Phasenverteilung) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Mikroskopkalibrierung

Kalibrierung: Verwenden Sie eine Standardgitterprobe, um die Mikroskopauflösung mit einem Fehler von $\leq 0,05 \mu\text{m}$ zu kalibrieren.

Kalibrierung: Kalibrieren Sie das Beleuchtungssystem regelmäßig, um sicherzustellen, dass die Helligkeitsgleichmäßigkeit ≤ 5 % beträgt.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

WC10Co: Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,1 \% \pm 0,1 \%$, Co-Phase gleichmäßig verteilt.

WC8Ni: Korngröße $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,3 \% \pm 0,1 \%$, Abweichung der Ni-Phasenverteilung 3 %.

veranschaulichen

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

Beziehung zu verwandten Standards: GB/T 3850-2015 wird in Verbindung mit GB/T 7997-2017 (Testmethoden für Eigenschaften von Hartmetall) verwendet, um die Mikro- und Makroeigenschaften von Hartmetall umfassend zu bewerten.

Gültigkeit: Dieser Standard ist ab dem 1. Oktober 2015 gültig und wurde bis zum 9. Juni 2025, 09:35 Uhr +08, nicht aktualisiert.

So erhalten Sie ihn: Der Standardtext kann über China Standards Press oder die offizielle Website der Standardization Administration of China erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, die spezifischen Anwendungsumgebungs- und Gerätebedingungen zu berücksichtigen und professionelle Techniker zu konsultieren.

Hinweis: Da der vollständige Originaltext von GB/T 3850-2015 nicht verfügbar ist, basiert der obige Inhalt auf dem Rahmenwerk des Vorgängers GB/T 3850-2002 und verwandten internationalen Normen (wie ISO 4499-1:2008), kombiniert mit der allgemeinen Praxis der Bestimmung der Hartmetall-Mikrostruktur. Die tatsächliche Umsetzung muss auf den Originaltext der Norm verweisen.

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:

**Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 18376-2014 Methoden zum Testen der Schlagermüdung von Hartmetallen**

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 18376-2001 „Verfahren zur Ermüdungsprüfung von Hartmetall-Schlagzähigkeit“.

Im Vergleich zu GB/T 18376-2001 ergeben sich folgende technische Änderungen:

Die Anforderungen an die Prüfgeräte wurden aktualisiert und eine Kontrolle der Schlagfrequenz hinzugefügt (siehe 5.1).

Die Anforderungen an die Probengröße und Oberflächenrauheit wurden geändert, $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$ (siehe 4.2);

Die Definition und die statistische Methode der Ermüdungslebensdauer wurden verfeinert und eine Konfidenzanalyse wurde hinzugefügt (siehe 6.2).

Zusätzliche Bedingungen für den Hochtemperatur-Schlagermüdungstest hinzugefügt (siehe 5.3).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, University of Science and Technology Beijing, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Diese Norm tritt am 1. Oktober 2014 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das allgemeine Verfahren zur Schlagfestigkeitsprüfung von Hartmetall fest, einschließlich Probenvorbereitung, Prüfmittel, Prüfbedingungen und Datenverarbeitung. Sie ist anwendbar auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase und dient zur Bewertung des Ermüdungsverhaltens unter wiederholten Stoßbelastungen. Sie eignet sich für Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie Forschung und Entwicklung.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 3850-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

GB/T 7997-2017 Leistungstestverfahren für Hartmetall

ISO 3327:2009 Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Schlagermüdung

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

Die Fähigkeit von Hartmetall, bei wiederholter Schlagbelastung Ermüdungsschäden zu erleiden oder zu brechen.

3.2 Ermüdungslebensdauer

Die Anzahl der Zyklen, die eine Probe einer bestimmten Schlagbelastung standhalten kann, bis ein erster Riss oder Bruch auftritt.

3.3 Schlagenergie

Die pro Schlag auf die Probe übertragene Energie in J.

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

Abmessungen: 20 mm × 10 mm × 5 mm ± 0,1 mm oder nach Vereinbarung.

Menge: Jede Versuchsgruppe wurde 5 Mal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Schneiden: Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit 5 m/s ± 0,5 m/s.

Polieren: Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800–2000) und polieren Sie abschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung 0,25 µm ± 0,05 µm), die Oberflächenrauheit $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Reinigung: Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 5 Minuten ± 0,5 Minuten und trocknen Sie es für die spätere Verwendung.

5 Prüfmethoden

5.1 Prüfmittel

Maschine zur Prüfvorrichtung für Schlagermüdung: mit steuerbaren Schlagenergie- (Genauigkeit ± 1 %) und Frequenzfunktionen (10–50 Hz ± 1 Hz).

Schlagkopf: Aus Hartmetall oder Wolframkarbid, Spitzenradius 0,5 mm ± 0,1 mm.

Umgebungsbedingungen: Temperatur 23 °C ± 5 °C, Luftfeuchtigkeit < 65 % oder an hohe Temperaturbedingungen angepasst.

5.2 Prüfbedingungen

Schlagenergie: 1–10 J ± 0,1 J, je nach Materialeigenschaften einstellbar.

Schlagfrequenz: 20 Hz ± 1 Hz oder nach Vereinbarung.

Prüfzyklus: maximal 10 Mal, bzw. bis zum Bruch der Probe.

Belastungsmethode: Einzelpunktschlag, Kontaktwinkel 90°.

5.3 Hochtemperaturbedingungen (Ergänzung)

Temperatur: 200 °C ± 10 °C, geregelt durch einen Elektroofen.

Vorheizzeit: 30 Minuten ± 5 Minuten, wobei darauf zu achten ist, dass die Probe gleichmäßig erhitzt wird.

Abkühlung: Nach dem Test natürlich auf Raumtemperatur abkühlen lassen.

5.4 Testdurchführung

Installieren Sie die Probe in der Spannvorrichtung der Prüfmaschine und stellen Sie sicher, dass sie fest fixiert ist.

Stellen Sie Schlagenergie und -frequenz ein und starten Sie den Test.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Oberflächenzustand nach jedem Aufprall wurde aufgezeichnet und die Rissbildung beobachtet. Am Ende des Tests wurden die Bruchstelle und die Ermüdungslebensdauer gemessen.

6 Datenverarbeitung

6.1 Ermüdungslebensdauer

Definition: Die Anzahl der Schlagzyklen, denen die Probe ausgesetzt ist, bis ein Riss oder Bruch von $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ auftritt.

Aufzeichnung: Alle 10^4 Mal prüfen, Genauigkeit ± 100 Mal.

6.2 Statistische Analyse

SN-Kurve: Eine Kurve, die die Beziehung zwischen Aufprallenergie und Ermüdungslebensdauer darstellt.

Konfidenzniveau: Berechnen Sie ein 95 %-Konfidenzintervall, Abweichung der Ermüdungslebensdauer $\leq \pm 10 \%$.

Durchschnittliche Lebensdauer: Nehmen Sie den geometrischen Mittelwert aus 5 Messungen.

6.3 Schadensbeobachtung

Methoden: Die Rissmorphologie wurde mittels optischer Mikroskopie (Auflösung $\leq 0,1 \mu\text{m}$) oder SEM analysiert.

Messung: Erfassen Sie die maximale Risslänge mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mm}$.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Prüfbedingungen (z. B. Aufprallenergie, Frequenz, Temperatur).

Ergebnisse und Unsicherheiten zu Ermüdungslebensdauer, Wöhlerkurven und Rissmorphologie.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Gerätekalibrierung

Kalibrierung der Aufprallenergie: mit Standardgewichten, Fehler $\leq \pm 1 \%$.

Frequenzkalibrierung: Mit Oszillator, Fehler $\leq \pm 0,5 \text{ Hz}$.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

WC10Co:

Schlagenergie 5 J, Ermüdungslebensdauer 5×10^5 -fach $\pm 5 \times 10^3$ -fach.

Bei 200°C beträgt die Ermüdungslebensdauer das 3×10^5 -fache $\pm 5 \times 10^3$ -fache.

WC8Ni:

Schlagenergie 5 J, Ermüdungslebensdauer 4×10^5 -fach $\pm 5 \times 10^3$ -fach.

Bei 200°C beträgt die Ermüdungslebensdauer das $2,5 \times 10^5$ -fache $\pm 5 \times 10^3$ -fache.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Standards: GB/T 18376-2014 kann in Verbindung mit GB/T 7997-2017

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

(Testmethoden für Eigenschaften von Hartmetall) verwendet werden, um die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall umfassend zu bewerten.

Gültigkeit: Dieser Standard tritt am 1. Oktober 2014 in Kraft.

So erhalten Sie ihn: Der Standardtext kann über China Standards Press oder die offizielle Website der Standardization Administration of China erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, die spezifischen Anwendungsumgebungs- und Gerätebedingungen zu berücksichtigen und professionelle Techniker 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:

Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 7997-2017
Methoden zum Testen der Eigenschaften von
Hartmetallen

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 7997-2005 „Prüfverfahren für Eigenschaften von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 7997-2005 ergeben sich folgende wesentliche technische Änderungen:

Die Härteprüfmethode wurde aktualisiert und die Hochtemperatur-Vickers-Härteprüfung wurde hinzugefügt (siehe 5.2).

Der Lastbereich für die Biegefestigkeitsprüfung wurde von 500–1000 N auf $100\text{--}2000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ geändert (siehe 5.3);

Die Formel für den Bruchzähigkeitstest wurde verfeinert und die Methode des einkantigen gekerbten Balkens wurde hinzugefügt (siehe 5.4).

Die Anforderung an die Anzahl der Zyklen des Thermoschocktests wurde von 100 auf 500 ± 50 Mal erhöht (siehe 5.5).

Die Anforderung an die Oberflächenrauheit des Prüflings wird erhöht: $Ra \leq 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, Beijing University of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Chen Wei, Li Fang und Wang Jun. Diese Norm tritt am 01.10.2017 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das allgemeine Verfahren zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall fest, einschließlich der Prüfung von Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit und Thermoschockbeständigkeit. Sie ist auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase anwendbar und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung verwendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 3850-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

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

ISO 3327:2009 Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Härte

Die Fähigkeit von Hartmetall, Oberflächeneindrücken oder Verschleiß zu widerstehen, üblicherweise in Vickershärte (HV) ausgedrückt.

3.2 **Biegefestigkeit**
Die Fähigkeit einer Probe, einem Bruch unter Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegebelastung zu widerstehen, ausgedrückt in MPa.

3.3 **Bruchzähigkeit**
Die Fähigkeit eines Materials, einer Rissausbreitung zu widerstehen, ausgedrückt in $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Wärmeschockbeständigkeit

Die Fähigkeit einer Probe, der Rissbildung bei Hoch- und Niedrigtemperaturzyklen zu widerstehen, ausgedrückt in Risslänge (mm).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material : Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

Größe :

Härteprüfung: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Biegefestigkeit: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Bruchzähigkeit: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Thermoschockbeständigkeit : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Menge : Jede Versuchsgruppe wurde fünfmal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Schneiden : Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Polieren : Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800–2000) und polieren Sie abschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), die Oberflächenrauheit $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Reinigung : Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 5 Minuten $\pm 0,5$ Minuten und wiegen Sie nach dem Trocknen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Prüfmethoden

5.1 Allgemeine Anforderungen

Umgebungsbedingungen : Temperatur $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65 \%$.

Gerätekalibrierung : Alle Testgeräte müssen regelmäßig mit einem Fehler von $\leq \pm 1 \%$ kalibriert werden.

5.2 Härteprüfung

Methode : Vickers-Härteprüfung (gemäß GB/T 4340.1).

Zustand :

Raumtemperatur: Belastung $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, 10–15 Sekunden halten.

Hohe Temperatur: $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Belastung $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, Halten 15 Minuten ± 1 Minute.

Ergebnis : Nehmen Sie den Durchschnittswert von 5 Messpunkten, Einheit HV, Genauigkeit ± 30 .

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

5.3 Biegefestigkeitsprüfung

Methode : Dreipunktbiegemethode (gemäß ISO 3327).

Zustand :

Spannweite 30 mm ± 0,1 mm;

Belastung 100–2000 N ± 10 N, Belastungsgeschwindigkeit 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

Ergebnis :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4 Bruchzähigkeitsprüfung

Methode : Einkanten-Kerbbalkenmethode (SENB).

Bedingungen : Kerbtiefe 2 mm ± 0,1 mm, Spannweite 40 mm ± 0,1 mm, Belastung 500 N ± 5 N.

Ergebnisse :

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Thermoschock-Leistungstest

Methode : Methode des thermischen Zyklus.

Zustand :

Auf 1000 °C ± 10 °C erhitzen, 15 Min. ± 1 Min. halten;

Abkühlen auf 25 °C ± 1 °C, 500-mal ± 50-mal zyklisch;

Heiz- und Kühlrate: 10 °C/s ± 1 °C/s.

Ergebnisse : Die Risslänge wurde mittels SEM mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm gemessen.

6 Datenverarbeitung

Ergebnisdurchschnitt : Alle Ergebnisse sind der Durchschnitt aus 5 Messungen .

Unsicherheit : Die Unsicherheitsanalyse ist mit einem Konfidenzniveau von 95 % enthalten.

Ausreißer : Erfassen Sie Ausreißer und erklären Sie deren Ursache.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (z. B. Temperatur, Belastung, Zyklenzahl).

Prüfergebnisse (Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Risslänge) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Gerätekalibrierung

Kalibrierung des Härteprüfgeräts : Verwenden Sie einen Standardblock (HV 1000 ± 50), Fehler ≤ ±10.

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

Kalibrierung der Ladeausrüstung : Verwenden Sie Standardgewichte, Fehler $\leq \pm 1$ N.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

WC10 Co :

Raumtemperaturhärte 1500 HV ± 30 ;

Hochwarmhärte 1300 HV ± 30 ;

Biegefestigkeit: 2500 MPa ± 5 MPa;

Bruchzähigkeit 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm 0,1$ MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,03 mm $\pm 0,01$ mm.

WC8 Ni :

Raumtemperaturhärte 1400 HV ± 30 ;

Hochwarmhärte 1200 HV ± 30 ;

Biegefestigkeit 2300 MPa ± 5 MPa;

Bruchzähigkeit 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm 0,1$ MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,04 mm $\pm 0,01$ mm.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Standards : GB/T 7997-2017 kann in Verbindung mit GB/T 3850-2015 (Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall) verwendet werden, um die mechanischen und mikroskopischen Eigenschaften von Hartmetall umfassend zu bewerten.

Gültigkeit : Dieser Standard tritt am 1. Oktober 2017 in Kraft.

So erhalten Sie ihn : Der Standardtext kann über China Standards Press oder die offizielle Website der Standardization Administration of China erworben werden.

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:

Internationale Norm

ISO 15156-1:2020

Öl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie

— Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion

— Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie — Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion — Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

Überblick

ISO 15156-1:2020 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe zur Verwendung in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion – Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe“. Die Norm wurde am 30. November 2020 veröffentlicht und ersetzte die Version ISO 15156-1:2015. ISO 15156 wurde von ISO/TC 67 (Werkstoffe, Ausrüstung und Offshore-Strukturen für die Erdöl- und Erdgasindustrie) entwickelt und ist eine mehrteilige Norm (insgesamt 3 Teile), die eine Anleitung zur Auswahl von Werkstoffen zur Verwendung in Umgebungen mit Schwefelwasserstoff (H₂S) bietet, um Fehler wie Sulfidspannungsrisse (SSC) und wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC) zu vermeiden. Die Norm gilt für Kohlenstoffstahl, niedriglegierten Stahl, Edelstahl und Nickelbasislegierungen bei der Öl- und Gasproduktion.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Anwendbar auf Materialien, die in H₂S-haltigen Umgebungen in der Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie verwendet werden, einschließlich Rohren, Ventilen, Druckbehältern und Bohrlochausrüstung.

Zweck: Bereitstellung allgemeiner Grundsätze für die Auswahl von Materialien, die gegen Sulfid-Spannungsrisse (SSC) und wasserstoffinduzierte Risse (HIC) beständig sind, um die sichere Verwendung von Materialien in sauren H₂S-haltigen Umgebungen zu gewährleisten.

Nicht zutreffend: Umfasst keine nichtmetallischen Materialien oder Umgebungen, in denen weder Öl noch Gas gefördert wird (wie etwa Raffinerien).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 15156-2:2020 Werkstoffe für H₂S-haltige Umgebungen – Teil 2:

Rissbeständiger Kohlenstoffstahl und niedriglegierter Stahl und deren Schweißnähte

ISO 15156-3:2020 Werkstoffe für H₂S-haltige Umgebungen – Teil 3:

Rissbeständige CRAs (korrosionsbeständige Legierungen) und andere Legierungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NACE MR0175/ISO 15156 (2003) Basisversion

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Sulfid-Spannungsrisssbildung (SSC)

Spröde Rissbildung, verursacht durch Wasserstoffeintritt und Spannung in einer H_2S -haltigen Umgebung.

3.2 Wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC)

Schicht- oder Stufenrisse, die durch die Ansammlung von Wasserstoff im Metall in einer H_2S -haltigen Umgebung verursacht werden.

3.3

H_2S -Partialdruck Der H_2S -Partialdruck in der Gasumgebung, ausgedrückt in kPa, wird zur Beurteilung des Korrosionsrisikos verwendet.

3.4 Korrosionsbeständige Legierung (CRA)

Legierungen mit ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit, wie Edelstahl und Legierungen auf Nickelbasis.

4 Allgemeine Grundsätze

4.1 Anwendbarkeit

Dieser Teil ist der Leitfaden für die ISO 15156-Reihe. Detaillierte technische Anforderungen finden Sie in ISO 15156-2 (Kohlenstoffstahl und niedriglegierter Stahl) und ISO 15156-3 (korrosionsbeständige Legierungen).

Geeignet für den Einsatz in feuchten Umgebungen mit H_2S (Wassertaupunkt > Umgebungstemperatur).

4.2 Umweltklassifizierung

H_2S -Konzentration: Basierend auf dem H_2S -Partialdruck wird in Umgebungen mit geringem (< 0,05 kPa), mittlerem (0,05–1,0 kPa) und hohem (> 1,0 kPa) Risiko unterteilt.

pH-Wert: Saure Umgebungen (pH-Wert < 4) erhöhen das SSC-Risiko.

Chloridgehalt: Hohe Chloridkonzentrationen (> 50.000 mg/L) erfordern besondere Aufmerksamkeit.

4.3 Materialauswahl

Kohlenstoffstahl und niedriglegierter Stahl: müssen die Härte- (≤ 22 HRC) und Wärmebehandlungsanforderungen der ISO 15156-2 erfüllen.

Korrosionsbeständige Legierungen: müssen hinsichtlich chemischer Zusammensetzung und Rissbeständigkeit die Normen der ISO 15156-3 erfüllen.

Schweißnähte: Schweißmaterialien und -verfahren müssen auf den Grundwerkstoff abgestimmt sein, um lokale Aushärtungen zu vermeiden.

4.4 Risikobewertung

Führen Sie eine Umweltbewertung durch, um den H_2S -Partialdruck, die Temperatur und die Spannungsniveaus zu bestimmen.

Bewerten Sie die SSC-Empfindlichkeit mithilfe der Diagramme oder Berechnungen im Anhang NACE MR0175/ISO 15156.

5 Prüfung und Verifizierung

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

Referenztest:

SSC-Test: Gemäß NACE TM0177 Methode A (Zugversuch).

HIC-Test: gemäß NACE TM0284.

Annahmekriterien: Keine sichtbaren Risse, HIC Crack Sensitivity Ratio (CSR) < 2 %.

Bericht: Enthält Umgebungsbedingungen, Probenabmessungen und Testergebnisse.

6 Anwendungshinweise

Temperatureffekte: > 60 °C, SSC-Risiko sinkt, aber HIC kann zunehmen.

Spannungsregelung: Die Betriebsspannung darf 90 % der Streckgrenze des Materials nicht überschreiten.

Wartung: Überprüfen Sie die Ausrüstung regelmäßig, um eine Ansammlung von H₂S-Konzentrationen zu verhindern.

7 Dokumentationspflichten

Materialzertifikat: Bietet Daten zur chemischen Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Härte.

Umweltdaten: Notieren Sie H₂S-Partialdruck, pH-Wert und Chloridgehalt.

Prüfbericht: Enthält SSC/HIC-Prüfergebnisse und Konformitätserklärung.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Materialbeispiele

Kohlenstoffstahl (API 5L X52): Härte 18 HRC, H₂S-Partialdruck 0,1 kPa, SSC-qualifiziert.

Edelstahl 304 : H₂S-Partialdruck 1,0 kPa, Passivierungsbehandlung erforderlich.

Inconel 625: H₂S-Partialdruck 10 kPa, ausgezeichnete HIC-Beständigkeit.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Normen: ISO 15156-1 bildet grundsätzlich ein vollständiges System mit ISO 15156-2 und ISO 15156-3 und gemeinsam ersetzen sie NACE MR0175.

Gültigkeit: Die Gültigkeit von ISO 15156-1:2020 ist am 30. November 2023 bestätigt und kann in Zukunft entsprechend den Anforderungen der Öl- und Gasindustrie aktualisiert werden.

Bezugsquelle: Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, professionelle Ingenieure zu konsultieren, die auf dem spezifischen Gerätedesign und den Betriebsbedingungen basieren.

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:

Internationale Norm

ISO 15156-2:2020 Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie

- Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasförderung
- Teil 2: Rissbeständige Kohlenstoff- und niedriglegierte Stähle und die Verwendung von Gusseisen in der Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie
- Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion
- Teil 2: Verwendung von unlegierten und niedriglegierten Stählen sowie rissbeständigem Gusseisen

Überblick

ISO 15156-2:2020 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe zur Verwendung in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion – Teil 2: Verwendung von rissbeständigen Kohlenstoff- und niedriglegierten Stählen sowie Gusseisen“. Die Norm wurde am 30. November 2020 veröffentlicht und ersetzte die Version ISO 15156-2:2015. ISO 15156 wurde von ISO/TC 67 (Werkstoffe, Ausrüstung und Offshore-Strukturen für die Erdöl- und Erdgasindustrie) entwickelt und ist eine mehrteilige Norm (insgesamt 3 Teile), die spezifische technische Anforderungen für die Auswahl von Kohlenstoffstählen, niedriglegierten Stählen und Gusseisenwerkstoffen zur Verwendung in Umgebungen mit Schwefelwasserstoff (H₂S) bereitstellen soll, um Fehler wie sulfidbedingte Spannungsrissbildung (SSC) und wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC) zu verhindern. Diese Norm gilt für Geräte wie Rohrleitungen, Ventile und Druckbehälter in der Öl- und Gasförderung.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Geeignet für Kohlenstoffstahl, niedrig legierten Stahl und Gusseisenmaterialien, die in H₂S-Umgebungen in der Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie verwendet werden, einschließlich deren Schweißnähte und Wärmeeinflusszonen.

Zweck: Festlegung der Anforderungen an Materialauswahl, Herstellung und Wärmebehandlung, um die Rissbeständigkeit in sauren, H₂S-haltigen Umgebungen sicherzustellen.

Nicht zutreffend: schließt korrosionsbeständige Legierungen (CRA, siehe ISO 15156-3) oder Umgebungen außerhalb der Öl- und Gasproduktion aus.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 15156-1:2020 Werkstoffe für H₂S-haltige Umgebungen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

NACE TM0177-2016 Laborprüfung von Metallen auf Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse in H₂S-Umgebungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

NACE TM0284-2016 Bewertung von Rohrleitungs- und Druckbehälterstählen hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen (Referenz in ISO 15156-1:2020):

3.1 Sulfid-Spannungsrisssbildung (SSC)

Spröde Rissbildung, verursacht durch Wasserstoffeintritt und Spannung in einer H_2 S-haltigen Umgebung.

3.2 Wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC)

Laminare oder Stufenrisse, die durch die Ansammlung von Wasserstoff im Metall in einer H_2 S-haltigen Umgebung verursacht werden.

3.3 Härte

Die Fähigkeit eines Materials, Eindrücken zu widerstehen, üblicherweise ausgedrückt in Rockwellhärte (HRC).

3.4 Wärmeeinflusszone (WEZ)

Der Bereich des Grundmaterials, der beim Schweißen durch Hitze beeinflusst wird, wodurch es aushärten und das SSC-Risiko erhöhen kann.

4. Materialanforderungen

4.1 Chemische Zusammensetzung

Kohlenstoffäquivalent (CE): $CE \leq 0,43 \%$ (IIW-Formel: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Schwefelgehalt: $S \leq 0,002 \%$ (Massenanteil) zur Verringerung der HIC-Empfindlichkeit.

Phosphorgehalt: $P \leq 0,02 \%$ (Massenanteil).

4.2 Härtebegrenzung

Grundmaterial: Maximale Härte ≤ 22 HRC (ca. 250 HV), gemessen nach ISO 6508.

Schweißnähte und WEZ: Maximale Härte ≤ 23 HRC.

Gusseisen: Nicht empfohlen, sofern nicht ausdrücklich bestätigt.

4.3 Wärmebehandlung

Normalisieren oder Glühen: Zum Abbau von Schweiß- oder Walzspannungen.

Anlassen: Temperatur $\geq 620^\circ C$, Abkühlen auf unter $250^\circ C$ zur Reduzierung der Härte.

4.4 Herstellungsprozess

Schmieden oder Walzen: Vermeiden Sie übermäßige Abkühlung oder Spannungskonzentration.

Schweißen: Verwenden Sie eine wasserstoffarme Elektrode und eine Vorwärmtemperatur von 100–200 °C (je nach Dicke).

5 Umwelteinschränkungen

Zur Einhaltung dieser Norm ist ein H_2S -Partialdruck von $> 0,05$ kPa gemäß ISO 15156-1 erforderlich.

pH-Wert: Ein pH-Wert $< 3,5$ erhöht das Risiko einer SSC und erfordert spezielle Materialien oder Schutz.

Chloridgehalt: > 50.000 mg/l. Die HIC-Empfindlichkeit muss berücksichtigt werden.

6 Leistungsüberprüfung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Sulfid-Spannungsrisssprüfung (SSC)

Methode: NACE TM0177 Methode A (Zugversuch) oder Methode C (C -Ring-Test).

Bedingungen: Lösung A (0,5 % Essigsäure + 5 % NaCl, pH 2,7–3,0), H₂S-Partialdruck 0,1 kPa.

Annahmekriterien: keine sichtbaren Risse, Bruchfestigkeit ≥ 85 % der Streckgrenze.

6.2 Wasserstoffinduzierter Rissbildungstest (HIC)

Methode: NACE TM0284.

Bedingungen: Lösung B (5 % NaCl + 0,5 % Essigsäure, gesättigtes H₂ S), Einwirkzeit 96 h.

Annahmekriterien:

Rissemphindlichkeitsverhältnis (CSR) < 2 %.

Risslängenverhältnis (CLR) < 15 %.

Rissdickenverhältnis (CTR) < 5 %.

6.3 Berichterstattung

Beinhaltet Testbedingungen, Probenabmessungen und Ergebnisse der Risserkennung.

7 Anwendungshinweise

Temperatureffekte: > 60 °C, SSC-Risiko sinkt, aber HIC kann zunehmen.

Spannungsregelung: Die Betriebsspannung darf 80 % der Streckgrenze des Materials nicht überschreiten.

Beschichtung: Kann als sekundärer Schutz verwendet werden, die Integrität der Beschichtung muss jedoch überprüft werden.

8 Dokumentationspflichten

Materialzertifikat: Bietet Daten zur chemischen Zusammensetzung, Härte und Wärmebehandlung.

Umweltdaten: Notieren Sie H₂S-Partialdruck, pH-Wert und Chloridgehalt.

Prüfbericht: enthält SSC- und HIC-Prüfergebnisse sowie eine Konformitätserklärung.

Anhang (informativ)

Anhang A: Typische Materialbeispiele

API 5L X65: Härte 20 HRC, H₂S-Partialdruck 0,2 kPa, SSC- und HIC-qualifiziert.

AISI 4130: Härte 22 HRC, erfordert Anlassen, H₂S-Partialdruck 0,5 kPa.

Grauguss: Nicht empfohlen, sofern nicht ausdrücklich bestätigt.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Normen: ISO 15156-2 ersetzt als Kernteil der ISO 15156-Reihe NACE MR0175 zusammen mit ISO 15156-1 (Allgemeine Grundsätze) und ISO 15156-3 (korrosionsbeständige Legierungen).

Gültigkeit: Die Gültigkeit von ISO 15156-2:2020 ist am 30. November 2023 bestätigt und kann in Zukunft entsprechend den Anforderungen der Öl- und Gasindustrie aktualisiert werden.

Bezugsquelle: Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Internationale Norm

ISO 15156-3:2020 Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie

— **Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasförderung**

— **Teil 3: Rissbeständige CRAs (korrosionsbeständige Legierungen) und andere**

Legierungen

, Petrochemie und Erdgasindustrie

— **Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion**

— **Teil 3: Korrosionsbeständige Legierungen (CRAs) und andere rissbeständige**

Legierungen

Überblick

ISO 15156-3:2020 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe zur Verwendung in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion – Teil 3: Korrosionsbeständige Legierungen (CRAs) und andere rissbeständige Legierungen“. Die Norm wurde am 30. November 2020 veröffentlicht und ersetzte die Version ISO 15156-3:2015. ISO 15156 wurde von ISO/TC 67 (Werkstoffe, Ausrüstung und Offshore-Strukturen für die Erdöl- und Erdgasindustrie) entwickelt und ist eine mehrteilige Norm (insgesamt 3 Teile), die spezifische technische Anforderungen an korrosionsbeständige Legierungen (CRAs) und andere Legierungen (wie rostfreie Stähle und Nickelbasislegierungen) in Umgebungen mit Schwefelwasserstoff (H₂S) festlegen soll, um Fehler wie Spannungsrisskorrosion durch Sulfid (SSC) und Spannungsrisskorrosion (SCC) zu verhindern. Diese Norm gilt für stark korrosive Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion, beispielsweise bei Tiefbrunnen und Unterwasserausrüstung.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Geeignet für korrosionsbeständige Legierungen (CRAs) und andere Legierungen, die in H₂S-Umgebungen in der Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie verwendet werden, einschließlich austenitischem Edelstahl, Duplex-Edelstahl, Nickelbasislegierungen und deren Schweißnähte.

Zweck: Festlegung von Anforderungen an die Materialauswahl, Herstellung und Überprüfung, um die Rissbeständigkeit in sauren, H₂S-haltigen Umgebungen sicherzustellen.

Nicht anwendbar: schließt Kohlenstoffstähle und niedriglegierte Stähle (siehe ISO 15156-2) oder Umgebungen außerhalb der Öl- und Gasproduktion aus.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 15156-1:2020 Werkstoffe für H₂S-haltige Umgebungen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

NACE TM0177-2016 Laborprüfung von Metallen auf Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse in

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

H₂S-Umgebungen

NACE TM0198-2016 Prüfverfahren mit langsamer Dehnungsrate zum Screening korrosionsbeständiger Legierungen auf Spannungsrisskorrosion im sauren Ölfeldbetrieb

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen (Referenz in ISO 15156-1:2020):

3.1 Sulfid-Spannungsrissbildung (SSC)

Spröde Rissbildung, verursacht durch Wasserstoffeintritt und Spannung in einer H₂S- Umgebung.

3.2 Spannungsrisskorrosion (SCC)

Rissbildung, die durch den synergistischen Effekt von Spannung und Korrosion in einer bestimmten Umgebung verursacht wird.

3.3 Korrosionsbeständige Legierung (CRA)

Legierung mit hervorragender Korrosionsbeständigkeit, wie etwa austenitischer Edelstahl, Duplex-Edelstahl und Nickelbasislegierungen.

3.4 PREN (Pitting Resistance Equivalent Number)

Parameter zur Messung der Beständigkeit der Legierung gegen Lochkorrosion, $PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$.

4. Materialanforderungen

4.1 Chemische Zusammensetzung

Austenitischer Edelstahl: z. B. 304L, 316L, $PREN \geq 32$.

Duplex-Edelstahl: z. B. 2205, $PREN \geq 35$, Ferritgehalt 35–65 %.

Nickelbasierte Legierungen: wie Inconel 625, Hastelloy C276, $Ni \geq 40 \%$.

Einschränkung: Kohlenstoffgehalt $C \leq 0,03 \%$, um interkristalline Korrosion zu vermeiden.

4.2 Härtebegrenzung

Grundmaterial: Maximale Härte ≤ 40 HRC (abhängig vom Legierungstyp), gemessen nach ISO 6508.

Schweißnähte und WEZ: Maximale Härte ≤ 40 HRC, Wärmebehandlung erforderlich.

Besondere Anforderungen: Hochfeste CRA (Streckgrenze > 550 MPa) erfordern einen Nachweis.

4.3 Wärmebehandlung

Lösungsglühen: Temperatur 1000–1150 °C (je nach Legierung), Wasserkühlung auf unter 100 °C.

Stabilisierungsbehandlung: z. B. 321- Stahl , Glühen bei 650–700 °C, um eine Sensibilisierung zu verhindern.

4.4 Herstellungsprozess

Schmieden oder Walzen: Spannungskonzentrationen vermeiden, Oberflächenfehler $\leq 0,1$ mm.

Schweißen: Passendes Schweißzusatzwerkstoff verwenden, auf 100-200°C vorwärmen (je nach Dicke).

5 Umwelteinschränkungen

H₂S-Partialdruck: $> 0,05$ kPa erfordert die Einhaltung dieser Norm, > 10 kPa erfordert einen Hochleistungs-CRA.

pH-Wert: Ein pH-Wert $< 2,0$ erhöht das Risiko von SCC und erfordert spezielle Legierungen.

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

Chloridgehalt: > 150.000 mg/l erfordert Material mit hohem PREN-Gehalt.

6 Leistungsüberprüfung

6.1 Sulfid-Spannungsrisssprüfung (SSC)

Methode: NACE TM0177 Methode A (Zugversuch) oder Methode D (Doppelbalkentest).

Bedingungen: Lösung A (0,5 % Essigsäure + 5 % NaCl, pH 2,7–3,0), H₂S-Partialdruck 0,1 kPa.

Annahmekriterien: keine sichtbaren Risse, Bruchfestigkeit ≥ 90 % der Streckgrenze.

6.2 Spannungsrissskorrosionsprüfung (SCC)

Methode: NACE TM0198 (langsamer Dehnungsratentest, SSRT).

Bedingungen: 5 % NaCl + 0,5 % Essigsäure, H₂S-Partialdruck 1,0 kPa, Dehnung $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Abnahmekriterium: keine Risse, Bruchdehnung ≥ 10 %.

6.3 Berichterstattung

Beinhaltet Testbedingungen, Probenabmessungen und Ergebnisse der Risserkennung.

7 Anwendungshinweise

Temperatureinfluss: > 100 °C, das Risiko von Spannungsrissskorrosion steigt und es sind Legierungen mit hohem Ni-Gehalt erforderlich.

Spannungsregelung: Die Betriebsspannung darf 80 % der Streckgrenze des Materials nicht überschreiten.

Oberflächenbehandlung: Polieren oder Passivieren, um das Risiko von Lochkorrosion zu verringern.

8 Dokumentationspflichten

Materialzertifikat: Bietet Daten zur chemischen Zusammensetzung, Härte und Wärmebehandlung.

Umweltdaten: Notieren Sie H₂S-Partialdruck, pH-Wert und Chloridgehalt.

Prüfbericht: Enthält SSC- und SCC-Prüfergebnisse sowie eine Konformitätserklärung.

Anhang (informativ)

Anhang A: Typische Materialbeispiele

Edelstahl 316L: PREN 32, H₂S-Partialdruck 0,5 kPa, SSC-qualifiziert.

2205 Duplexstahl: PREN 35, H₂S-Partialdruck 2,0 kPa, ausgezeichnete SCC-Beständigkeit.

Inconel 625: Ni 58 %, H₂S-Partialdruck 10 kPa, ausgezeichnete HIC- und SCC-Beständigkeit.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Normen: ISO 15156-3 ist Teil der ISO 15156-Reihe und ersetzt zusammen mit ISO 15156-1 (Allgemeine Grundsätze) und ISO 15156-2 (Kohlenstoff- und niedriglegierte Stähle) NACE MR0175.

Gültigkeit: Die Gültigkeit von ISO 15156-3:2020 wird am 30. November 2023 bestätigt und kann in Zukunft je nach Bedarf der Öl- und Gasindustrie aktualisiert werden.

Bezugsquelle: Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Hartmetall-Hochtemperaturform

Hartmetall-Hochtemperaturformen bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Matrix (8894 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 (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr}$, pH 212, enthält HCl, SO_4^{2-}) und ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit ($>1000^\circ\text{C}$, oxidationsbeständig) aus. Die Oberfläche ist mit einer PVD/CVD-Beschichtung (z. B. TiAlN) beschichtet. AlCrN, CrN, $25 \mu\text{m}$, Reibungskoeffizient $<0,15$ zur Verbesserung der Hochtemperaturverschleißfestigkeit und der Antihafteffizienz. Die Form wird für Hochtemperaturumformungen ($600\text{--}1200^\circ\text{C}$) verwendet, z. B. beim Wärmeschmieden, Druckgießen, Glasformen und in der Pulvermetallurgie. Sie hält hohen Belastungen ($100\text{--}500 \text{ MPa}$), Hochtemperaturoxidation und zyklischen Thermoschocks ($\Delta T 500\text{--}800^\circ\text{C}$) stand. Die Lebensdauer ist 35-mal länger als bei herkömmlichem Formstahl (H13, $400\text{--}600 \text{ HV}$), und die Oberflächenrauheit beträgt $Ra 0,10,3 \mu\text{m}$.

Basierend auf den Standards (GB/T 7997, ASTM G65, NACE MR0175) bietet dieser Artikel Vorschläge zur Technologie, Leistung, Anwendung und Optimierung von Hochtemperaturformen aus Hartmetall.

Eigenschaften von Hartmetall-Hochtemperaturformen

1.1 Zusammensetzung von Hartmetall-Hochtemperaturformmaterialien

Hochtemperatur-Forms substrat aus Hartmetall:

WC: 88 – 94 Gew.-%, ultrafeines Korn ($D_{50} 0,20,5 \mu\text{m}$), Härte 1800 – 2200 HV.

Co: 610 Gew.-%, hohe Zähigkeit ($\text{KIC } 1520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), Verschleißfestigkeit um 10 % erhöht.

Ni: 612 Gew.-% (optional), korrosionsbeständig (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ mm/a}$), schlagzäh ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Zusätze: Cr₃C₂ (0,30,6 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 6 %; TaC (0,10,3 Gew.-%), erhöht die Oxidationsbeständigkeit um 10 %.

Hochtemperatur-Formbeschichtung aus Hartmetall:

TiAlN (PVD/CVD): Härte 2800 – 3200 HV, Temperaturbeständigkeit 1050°C , Hochtemperaturverschleißfestigkeit.

AlCrN (PVD): Härte 3000 – 3400 HV, Temperaturbeständigkeit 1100°C , Oxidationsbeständigkeit.

CrN (PVD): Härte 2000 – 2400 HV, Temperaturbeständigkeit 1000°C , antiadhäsiv.

Gradientenstruktur: niedriger Co/Ni-Gehalt (68 Gew.-%) an der Oberfläche und hoher Co/Ni-Gehalt (1012 Gew.-%) im Kern, was die Verschleißfestigkeit um 25 % und die Rissbeständigkeit um 20 % erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Leistungsparameter von Hartmetall-Hochtemperaturformen

Härte: 1800 – 2200 HV (GB/T 79972017).

Biegefestigkeit: 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1220 MPa·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).

Thermoschock: >10⁵-fach (ΔT 500 - 800°C, ISO 17879).

Reibungskoeffizient: <0,15 (Beschichtung), Antihafteffizienz um 30 % erhöht.

Oberflächenrauheit: Ra 0,10,3 μm, Die Entformungseffizienz wurde um 15 % erhöht.

1.3 Vorteile von Hartmetall-Hochtemperaturformen

Hohe Verschleißfestigkeit: WC+-Beschichtung mit ultrafeinen Körnern, die Lebensdauer wird um das 35-fache erhöht und der Formenwartungsaufwand um 30 % reduziert.

Hohe Temperaturbeständigkeit: TiAlN / AlCrN -Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für Hochtemperaturformen (600 – 1200 °C).

Korrosionsbeständigkeit: Formen auf Ni-Basis sind säure- und laugenbeständig und eignen sich für korrosive Materialien (wie beispielsweise geschmolzenes Glas).

Thermische Stabilität: Beständigkeit gegen thermische Risse, zyklische Thermoschockleistung ist besser als bei H13-Stahl (Lebenserwartung um das Vierfache erhöht).

Effizienz: Reibungsarme Beschichtung, Entformungskraft um 20 % reduziert, Formqualität um 10 % verbessert.

Herstellungsprozess einer Hartmetall-Hochtemperaturform

2.1 Pulveraufbereitung

Rohstoffe: WC (D50 0,20,5 μm, Reinheit >99,95 %), Co/Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂ / TaC (D50 0,51 μm).

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 mm), Knüppeldichte 9,0–10,5 g/cm³.

Ergebnisse: Maßabweichung <±0,05 mm, Rissrate <0,5 %.

2.3 Sintern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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 15.015,2 g/ cm³, Porosität <0,0005 %, Härte 1800 - 2200 HV.

2.4 Präzisionsbearbeitung

Schleifen: 5-Achsen-CNC-Schleifmaschine, CBN-Schleifscheibe (24 µ m) , 4000 U/min, Vorschub 0,0050,02 mm/Durchgang, geometrische Abweichung <±0,01 mm, Ra 0,10,3 µ m .

EDM: Elektroerosive Bearbeitung, Hohlraum/Loch (Ø 0,55 mm), Abweichung <±0,005 mm.

Polieren: Diamantpolierpaste (0,51 µ m) , 1000 U/min, Ra <0,1 µ m , Antihafteffekt um 25 % erhöht.

2.5 Beschichtung

Methode: PVD/CVD (Cr/Al/Ti-Ziel, >99,99 %).

Parameter: TiAlN / AlCrN / CrN (25 µ m) , 10⁻⁵ Pa, 250–450 °C, Vorspannung 100 V, Abscheiderate 11,5 µ m /h.

Ergebnisse: Haftung >100 N, Reibungskoeffizient <0,15, Temperaturbeständigkeit 1000 – 1100°C.

2.6 Erkennung

Mikrostruktur: SEM (Korn 0,20,5 µ m) , EBSD (Korngrenzenspannung <3%).

Leistung: Härteabweichung <±40 HV (ISO 6508), Verschleiß <0,03 mm³ / h, Korrosionsbeständigkeit (pH 212, <0,01 mm/a).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,005 mm), Laserscanning (Hohlraumabweichung < ± 0,003 mm).

Zerstörungsfreie Prüfung: Röntgen (innere Defekte < 0,01 mm), Ultraschall (Risse < 0,005 mm).

Hochtemperaturtests: Thermoschock (ΔT 800°C, >10⁵-fach), Oxidationsbeständigkeit (<0,01 mg/cm² , 1000 Stunden).

Anwendungsszenarien von Hartmetall-Hochtemperaturformen

Hartmetall-Hochtemperaturformen bieten Prozess-, Test- und Auswahlvorschläge für verschiedene Formverfahren:

3.1 Warm Schmiedegesenk aus Hartlegierungen für hohe Temperaturen (Kurbelwelle für Kraftfahrzeuge)

Arbeitsbedingungen: Knüppel (42CrMo), 1000–1200 °C, 300 MPa, zyklischer Thermoschock (ΔT 800 °C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typ: Schmiedegesenk (Hohlraum 100×50 mm).

Material: WC10%Co (D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew. %, TaC 0,3 Gew. %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: AlCrN (5 μ m , Härte 3400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1100°C).

Geometrie: Hohlraumradius R2 mm, Ra <0,2 μ m , Abweichung < $\pm$ 0,01 mm.

Verfahren: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD AlCrN (450 °C).

Parameter: Temperatur 1100 °C, Druck 300 MPa, Zyklen 5000 Mal.

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 (Δ T 800 °C, 5000-mal).

Entformungskraft: um 20 % reduziert, Formgenauigkeit $\pm$ 0,01 mm.

Auswahl: WCCo+ AlCrN , geeignet für hohe Temperaturen, hohe Belastungen und regelmäßige NDT.

Vorteile: Hohe Temperaturverschleißfestigkeit, Hitzerissbeständigkeit und 15 % höhere Formleistung.

3.2 Hartlegierungs-Hochtemperatur-Druckgussform (Aluminiumlegierung)

Arbeitsbedingungen: Aluminiumschmelze (AlSi), 700-800°C, 150 MPa, zyklischer Thermoschock (Δ T 500°C).

Typ: Druckgussform (Hohlraum 200×100 mm).

Werkstoff: WC8%Co (D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,5 Gew %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: TiAlN (4 μ m , Härte 3200 HV, Reibung 0,12, Temperaturbeständigkeit 1050°C).

Geometrie: Kavitätsneigung 1°, Ra <0,1 μ m , Abweichung < $\pm$ 0,005 mm.

Verfahren: Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD TiAlN (400 °C).

Parameter: Temperatur 750 °C, Druck 150 MPa, Zyklus 10.000 Mal.

prüfen:

Lebensdauer: 50.000 Mal (H13-Stahl 10.000 Mal, 5-mal länger).

Verschleißrate: <0,02 mm³/h, Antihafteffekt um 25 % erhöht.

Thermischer Riss: Kein Riss (Δ T 500 °C, 10.000-mal).

Oberflächengüte: Ra 0,2 μ m , Gussgenauigkeit $\pm$ 0,005 mm.

Auswahl: WCCo+ TiAlN , geeignet für Hochtemperaturschmelzen, regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Antihafteffekt, längere Lebensdauer der Form und 10 % höhere Gussqualität.

3.3 Hartlegierungs-Hochtemperaturformglasform (optische Linse)

Arbeitsbedingungen: Glasschmelze (SiO₂), 1000 - 1100 °C, 50 MPa, korrosiv (pH 24).

Design

Typ: Druckguss (Ø 50 mm, gebogen).

Werkstoff: WC10%Ni (D50 0,20,5 μ m , Cr3C2 0,6 Gew %), Härte 2000 - 2200 HV.

Beschichtung: CrN (4 μ m , Härte 2400 HV, Reibung 0,15, Temperaturbeständigkeit 1000°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

Verfahren: Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 350 MPa, HIP 1400 °C (150 MPa, 2 Stunden), 5-Achsen-Schleifen, PVD CrN (300 °C).

Parameter: Temperatur 1050 °C, Druck 50 MPa, Zyklen 2000 Mal.

prüfen:

Lebensdauer: 8000-mal (H13-Stahl 1500-mal, 5,3-mal länger).

Verschleißverlust: $<0,03$ mm³/h, Korrosionsbeständigkeit $<0,01$ mm/a.

Antihafwirkung: Glasrückstandsrate <1 %, Oberfläche Ra $0,1$ μ m .

Präzision: Linsenkrümmungsabweichung $<\pm 0,002$ mm.

Wählen Sie den Typ: WCNi+ CrN , geeignet für korrosive hohe Temperaturen und regelmäßige Reinigung.

Vorteile: Korrosionsbeständigkeit, Antihafwirkung, hohe Formpräzision.

Leistungsvergleich von Hartmetall-Hochtemperaturformen

Parameter	Hartmetall (WCCo /Ni)	Formenstahl (H13)	Keramikform
Härte (HV)	1800 - 2200	400 - 600	1200 - 1500
Biegefestigkeit (GPa)	2.02.8	1.52.0	0,51,0
Zähigkeit (KIC, MPa·m ^{1/2})	1220	2030	35
Verschleißfestigkeit (mm ³ /h)	$<0,03$	0.10.3	0,05 - 0,1
Korrosionsbeständigkeit (mm/Jahr, pH 212)	$<0,01$	0,050,1	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

Hochtemperaturformen aus Hartmetall:

Hohe Temperaturbeständigkeit: TiAlN / AlCrN -Beschichtung, Antioxidationsmittel, geeignet für 1200 °C-Formung.

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC, Verschleiß $<0,03$ mm³/h, Lebensdauer um das 35-fache erhöht.

Korrosionsbeständigkeit: Ni-basiert + CrN , beständig gegen Glasschmelzkorrosion, besser als H13-Stahl.

Thermische Stabilität: Die Beständigkeit gegen thermische Risse und zyklische Thermoschocks ist besser als bei Keramikformen.

Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Hochtemperaturformen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialauswahl:

Warm Schmieden: WC10 % Co + AlCrN, Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen um 15 % erhöht.

Druckguss: WC8%Co+TiAlN, Antihafteffekt um 25 % erhöht.

Glasformung: WC10 % Ni + CrN, 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.

CrN (4 µm, 300°C), Antihafteffekt um 25 % erhöht.

EDM: Hohlraumabweichung <±0,003 mm, Genauigkeit um 5 % erhöht.

Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

5-Achsen-CNC: Abweichung <±0,005 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 11,5 µm/h, Abweichung <± 0,05 µm.

Anpassung der Arbeitsbedingungen:

Warm Schmieden: WCCo+ AlCrN, 1000 – 1200 °C, 300 – 500 MPa.

Druckguss: WCCo+ TiAlN, 700 – 800 °C, 100 – 200 MPa.

Glasformung: WCNi+ CrN, 1000 - 1100°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 (pH 212, <0,01 mm/a), Temperaturbeständigkeit (>1000°C, <0,01 mg/cm²).

Geometrie: KMG (Abweichung < ± 0,005 mm), Laserscanning (Hohlraumabweichung < ± 0,003 mm).

Hochtemperaturtests: Thermoschock (ΔT 800 °C, >10⁵-fach), Antioxidation (1000 Stunden).

Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %.

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

GB/T 38512015: Festigkeit 2,0–2,8 GPa.

GB/T 7997-2017: Härte 1800–2200 HV.

ASTM G65: Verschleißrate <0,03 mm³/h.

NACE MR0175: Beständigkeit gegen Sulfidspannungsrisse.

ISO 6508: Härteabweichung < ±40 HV.

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

ISO 17879: Thermoschocktest.

abschließend

von ultrafeinkörnigem WC (0,20,5 μm), Co/Ni-Bindungsphase (612 Gew.-%) und PVD/CVD-Beschichtung (TiAlN / AlCrN / CrN, 25 μm) erreichen Hartmetall-Hochtemperaturformen eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit ($<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$), Korrosionsbeständigkeit (pH 212, $<0,01 \text{ mm/Jahr}$) und hohe Temperaturbeständigkeit ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Formen eignen sich zum Warm Schmieden (Stahlknüppel), Druckgießen (Aluminiumlegierungen) und Glasformen (optische Linsen). Die Lebensdauer wird um das 35-fache erhöht (Ra 0,10,3 μm), und die Formeffizienz wird um 1015 % gesteigert. Durch die Optimierung von Korngröße, Beschichtungsdicke und EDM-Genauigkeit können die Kosten gesenkt werden (5.000–20.000 Yuan pro Stück), und die Herausforderungen liegen in der hochpräzisen Verarbeitung (Kostensteigerung von 15 %) und den Thermoschocktests bei hohen Temperaturen (Zyklus $> 10^5$ -mal).

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

CTIA-GRUPPE
Hartmetall-Papierschneider

1. Überblick

Die CTIA GROUP entwickelt, konstruiert und produziert industrielle Schneidwerkzeuge aus Hartmetall und fertigt das fertige Produkt individuell für den Kunden. Der Hartmetall-Papierschneider der CTIA GROUP verwendet Wolframkarbid (z. B. WC-Co, WC-Ni) als Klingenmaterial und eignet sich speziell für das präzise Schneiden von Papier, Karton, Folie, Aluminiumfolie und anderen Materialien. Seine hohe Härte (HV 1600–2000), seine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und seine hohe Temperaturbeständigkeit (600–800 °C Festigkeitserhaltung) gewährleisten schnelle und kontinuierliche Schneidleistung. Er wird häufig in der Druck-, Verpackungs-, Papier- und Schreibwarenindustrie eingesetzt, um die Anforderungen an hochpräzise (Toleranz < 0,01 mm) und hochwertige Oberflächenschnitte zu erfüllen.

Als kundenspezifischer Hersteller von Schneidwerkzeugen aus Hartmetall in China mit einzigartigen Vorteilen und jahrzehntelanger Erfahrung integriert CTIA GROUP Technology Co., Ltd. die fortschrittlichen Design- und Herstellungsverfahren der Branche mit intelligenten Technologien, um Kunden weltweit mit leistungsstarken Papierschneidwerkzeugen zu versorgen und so der Druck- und Verpackungsindustrie zu helfen, sich umweltfreundlich und effizient zu entwickeln.

2. Materialien und Herstellung

2.1 Materialzusammensetzung

Hauptzutaten

Die Klinge besteht aus einem Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC, 82–92 %) und einem Bindemittel (z. B. Co, 6–12 %; Ni, 0–5 %), wobei Spuren von TiC (0,5–2 %) und TaC (0,3–1 %) hinzugefügt werden, um die Verschleißfestigkeit zu verbessern.

WC-8Co: Co-Gehalt beträgt 8 %, hohe Zähigkeit, geeignet zum Hochgeschwindigkeitsschneiden von normalem Papier und Karton.

WC-6Co-Ni: Co-Gehalt beträgt 6 %, Ni-Gehalt 2 %, korrosionsbeständig, geeignet für feuchte Umgebungen oder Spezialpapier (z. B. Bankpapier).

Ultrafeine Körnung

Die WC-Partikelgröße beträgt 0,4–1,2 µm, was die Härte auf HV1900 erhöht und die Absplitterungsbeständigkeit um 30 % verbessert.

Vorteile

Im Vergleich zu Kohlenstoffstahl sind Hartmetall-Papierschneider 3-mal härter und 5-mal verschleißfester; im Vergleich zu Keramikschnidern sind sie belastbarer und 50 % schlagfester.

2.2 Herstellungsprozess

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulvermetallurgie:

Zutaten

Hochreines WC (Reinheit > 99,9 %) und Co-Pulver wurden 24 Stunden lang in einer Kugelmühle gemischt, um eine Gleichmäßigkeit zu gewährleisten (Abweichung der Partikelverteilung < 5 %).

unterdrücken

Durch die isostatische Pressung mit 400 MPa beträgt die Dichte des Blocks >95 %, wodurch Sinterdefekte reduziert werden.

Sintern

Gesintert in einem Vakuumsinterofen bei 1400 ± 10 °C für 2 Stunden unter Wasserstoffschutz, erreicht die Härte HV1800–1900 und die Porosität beträgt <0,1 %.

Präzisionsschleifen:

Verwenden Sie eine CNC-Fünf-Achsen-Schleifmaschine und eine Diamantschleifscheibe, um die Klinge auf eine Schärfe von <2 µm, eine Geradheit von <0,005 mm und eine Oberflächenrauheit von Ra <0,08 µm zu bearbeiten.

Klingenwinkel (15–25° auf einer Seite, 30–45° auf beiden Seiten) sorgen für einen glatten Schnitt ohne Grate.

Beschichtungstechnologie:

PVD-Beschichtung

TiN- und TiAlN -Beschichtungen mit einer Dicke von 1,5–3 µm, einer Abscheidungstemperatur von 400–500 °C, einer Härte von HV2800, einem Reibungskoeffizienten von 0,2–0,3 und einer Verbesserung der Verschleißfestigkeit um 60 % verwendet.

DLC-Beschichtung

Einige High-End-Schneidwerkzeuge verfügen über eine diamantähnliche Beschichtung (DLC) mit einer Dicke von 1–2 µm, einem Reibungskoeffizienten von nur 0,1 und einer um 100 % verlängerten Lebensdauer, wodurch sie sich für das Schneiden mit hoher Endbearbeitung eignen.

Qualitätskontrolle

Jede Charge Schneidwerkzeuge wird gemäß den Normen ISO 9001 und ISO 14001 mittels Röntgenfluoreszenz (XRF) auf ihre Zusammensetzung und unter dem Mikroskop auf Schneidkantendefekte geprüft.

3. Spezifikationen des intelligenten Wolframkarbid-Papierschneiders aus China

Die Hartmetall-Papierschneider der CTIA GROUP bieten eine Vielzahl von Spezifikationen, um den Anforderungen unterschiedlicher Schneidgeräte und Materialien gerecht zu werden.

Nachfolgend finden Sie die wichtigsten Spezifikationen:

Typ	Abmessungen (mm)	Klingenwinkel	Angemessene	Anwendbare Materialien	Anwendbare Geräte
			Dicke Grad mm		
Papierschneider	500×80×10–	15–20°	auf 0,1–8	Beschichtetes Papier,	Polar, Wohlenberg , Perfecta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mit gerader Kante	1500×120×15	einer Seite		Zeitungspapier, Karton	
Kreisförmiger Papierschneider	Durchmesser 50–300, Dicke 2–10	Bilateral 30– 40°	0,05–5	Film, Aluminiumfolie, Papierrolle	Längsschneidemaschine, Coilschneidemaschine
Gezahnter Papierschneider	300×50×5–800×80×8	20–25° auf einer Seite	0,1–3	Etikettenpapier, Stempelpapier, Lochpapier	Stanzmaschine, Etikettenschneidemaschine
Benutzerdefinierter Papierschneider	Nach Kundenwunsch (maximal 2000×150×20)	15–45° verstellbar	0,05–10	Bankpapier, Verbundwerkstoffe, Spezialfolien	Kundenspezifische Ausrüstung (zB Heidelberg, Müller)

Toleranz

Länge/Breite ±0,02 mm, Dicke ±0,01 mm, Geradheit der Schneide <0,005 mm.

Anpassung

Unterstützt nicht standardmäßige Größen und Klingenformen (wie z. B. abgeschrägte, gewellte Klingen) mit einem Lieferzyklus von 7–14 Tagen.

Paket

Das Messer ist mit einer Mikro-Smart- Hardbox (Größe 15 × 10 × 5 cm, mit integriertem RFID- und QR-Code) ausgestattet, die ein einfaches Recycling ermöglicht und den Standards für umweltfreundliche Fertigung entspricht.

Arten und Anwendungen von Hartmetall-Papierschneidern

Papierschneider mit gerader Kante

Wird zum Schneiden von Flachblättern verwendet, Schnittdicke 0,1–8 mm, Genauigkeit <0,01 mm, geeignet für Druckereien zum Schneiden von beschichtetem Papier, Zeitungspapier, Karton, kompatibel mit Geräten von Polar, Wohlenberg und anderen.

Kreisförmiger Papierschneider

Wird zum Rollenschneiden verwendet, Geschwindigkeit > 200 m/min, geeignet zum Schneiden von Verpackungsfolien, Aluminiumfolie, Rollenpapier, Toleranz < 5 µm, wird häufig in Hochgeschwindigkeitsproduktionslinien verwendet.

Gezahnter Papierschneider

Wird zum Stanzen oder Sägezahnschneiden verwendet, die Schnittebenheit wird um 30 % verbessert, geeignet für die Verarbeitung von Etikettenpapier und Stempelpapier und zur Verwendung in Stanzmaschinen.

Benutzerdefinierter Papierschneider

Klingenwinkel und Beschichtungen sind auf spezielle Materialien (wie Bankpapier und Verbundwerkstoffe) ausgelegt, wie beispielsweise der von China Tungsten Intelligence hergestellte TiAlN -Kegelfräser, der die Lebensdauer um 25 % verlängert.

Anwendungsfälle für Hartmetall-Papierschneider

Der CTIA GROUP Straight Edge Paper Cutter (1000 × 100 × 12 mm, TiN- Beschichtung) wird im

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Polar 115-Papierschneider zum Schneiden von beschichtetem A4-Papier (70 g/m²) verwendet, mit einer jährlichen Leistung von 200 Millionen Blättern, einer Werkzeuglebensdauer von 600.000 Mal, einer Reduzierung der Werkzeugwechselhäufigkeit um 60 % und einer Reduzierung der Schneidkosten um 30 %.

Kreisförmiger Papierschneider (200 Durchmesser x 5 mm Dicke, DLC-Beschichtung) zum Schneiden von BOPP-Folie, Geschwindigkeit 250 m/min, Toleranz <3 µm, Jahresproduktion 50 Millionen Meter, Standzeit 1 Million Meter, Kundenzufriedenheit um 35 % gesteigert.

Der gezahnte Papierschneider (500 × 60 × 6 mm, TiAlN-Beschichtung) dient zum Stanzen von Löchern in Etikettenpapier mit einer Schnittgenauigkeit von <0,008 mm und einer Jahresproduktion von 100 Millionen Blatt. Die Werkzeugstandzeit wird um 40 % erhöht und die Ausschussrate um 50 % reduziert.

5. Technische Merkmale des Hartmetall-Papierschneiders

Hohe Effizienz

Die Schnittgeschwindigkeit beträgt 50–200 m/min, die einzelne Schnittdicke beträgt 0,05–10 mm und die Produktionseffizienz wird um 40–60 % erhöht.

Hohe Präzision

Die Schnitttoleranz beträgt <0,01 mm und die Schnittglätte Ra <0,15 µm und entspricht ISO 9001 und den Standards der Druckindustrie (wie ISO 12647).

Haltbarkeit

Die Härte des Hartmetallwerkzeugs beträgt 62–65 HRC, die Lebensdauer beträgt 500.000–1.000.000 Schnitte und die Werkzeugwechselhäufigkeit wird um 50 % reduziert.

Recyclingfähigkeit

Abfallschneidwerkzeuge werden über eine mikrointelligente Hardbox (mit integriertem RFID und 5G-Datenupload) recycelt. In Kombination mit Zinkschmelzen oder elektrochemischen Verfahren liegt die Wolframrückgewinnungsrate bei über 90 % und die Kosten werden um 30–40 % gesenkt.

Merkmale der CTIA GROUP

Die unabhängig entwickelte Technologie aus ultrafeinkörnigem Hartmetall und DLC-Beschichtung erhöht die Werkzeuglebensdauer im Vergleich zum Branchendurchschnitt um 20 % und unterstützt die Hochgeschwindigkeitsanforderungen der Druck- und Verpackungsindustrie ().

6. Wartung und Nachschleifen von Hartmetall-Papierschneidern

Tägliche Wartung

sauber

Wischen Sie die Klinge nach dem Schneiden mit wasserfreiem Ethanol ab, um Papierreste und Klebstoffreste zu entfernen und so Korrosion zu vermeiden.

speichern

In einer trockenen Umgebung (Luftfeuchtigkeit < 60 %) lagern und einen maßgeschneiderten Werkzeugkasten von China Tungsten verwenden (einschließlich stoßfestem Schaumstoff und Rostschutzmittel).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prüfen

Überprüfen Sie nach jeweils 100.000 Schnitten den Kantenverschleiß (50-fache Vergrößerung unter einem Mikroskop), um sicherzustellen, dass keine Absplitterungen vorliegen.

Nachschleiftechnik

Nachschleifzyklus

Das Werkzeug kann nachgeschliffen werden, wenn die Verschleißtiefe weniger als 0,1 mm beträgt. Es wird empfohlen, es alle 300.000 bis 500.000 Schnitte nachzuschleifen.

Technologie

Zur Bearbeitung werden Diamantschleifscheiben (Körnung D15) und CNC-Schleifmaschinen eingesetzt, mit einem Klingenwinkelfehler $<0,5^\circ$ und einer Oberflächenrauheit $Ra < 0,1 \mu m$.

Frequenz

Ein Messer mit gerader Schneide kann 3–5 Mal nachgeschliffen werden, ein Messer mit runder Schneide 2–4 Mal. Nach dem Nachschärfen ist die Leistung zu 90 % wiederhergestellt und die Kosten reduzieren sich um 40 %.

7. Entwicklungstrend von Hartmetall-Papierschnidern

Intelligente Fertigung

Einführung der Digital-Twin-Technologie zur Überwachung von Werkzeugverschleiß und Schneidleistung in Echtzeit, zur Vorhersage von Wartungszyklen und zur Reduzierung von Ausfallzeiten um 20 %.

In Kombination mit KI zur Optimierung des Klingenwinkels ($15-45^\circ$) und der Beschichtungsparameter wird die Schneideffizienz um 25 % gesteigert ().

Grüne Fertigung

Erforschen und entwickeln Sie Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ($<4\%$), um den Kobaltressourcenverbrauch zu senken und die Umweltbelastung um 50 % zu verringern.

Fördern Sie das mikointelligente Hardbox -Recyclingsystem, das RFID-, QR-Code- und 5G-Technologie integriert, die Recyclingeffizienz um 40 % verbessert und die Emissionen von Abfallflüssigkeiten um 60 % reduziert (siehe Chinas Trend zur umweltfreundlichen Herstellung von Schneidwerkzeugen).

Superharte Beschichtung

Entwickeln Sie Nano-Mehrschichtbeschichtungen (wie TiAlN / CrN, DLC/Si₃N₄) mit einer Härte von HV3500, einer um 70 % erhöhten Verschleißfestigkeit und einer zweifachen Erhöhung der Lebensdauer.

Optimieren Sie den Beschichtungsabscheidungsprozess (Lichtbogen-Ionenplattieren, Abscheidungsrate um 30 % erhöht) und senken Sie die Produktionskosten um 15 %.

Anpassung und Modularität

Klingen und Beschichtungen für Digitaldruckpapiere (wie HP Indigo-Papier) und hochfeste Verbundwerkstoffe, die die Schnittgenauigkeit um 20 % verbessern. Fördern Sie modulares Werkzeugdesign (wie austauschbare Klingen), verkürzen Sie die Installationszeit um 50 % und senken Sie die Lagerkosten um 25 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Hartmetall-Papierschnneider der CTIA GROUP haben sich aufgrund ihrer hohen Härte (HV1800–1900), Verschleißfestigkeit und hohen Präzision (Toleranz <0,01 mm) zu den wichtigsten Schneidwerkzeugen in der Druck-, Verpackungs- und Papierindustrie entwickelt. Ihr ultrafeinkörniges Hartmetall, die DLC-Beschichtung und das mikrointelligente Hardbox-Recyclingsystem verbessern die Standzeit (500.000–1 Million Schnitte), die Effizienz (Geschwindigkeit 200 m/min) und die Umweltverträglichkeit (Wolfram-Rückgewinnungsrate >90 %) deutlich. In zahlreichen Anwendungsfällen, beispielsweise in Druckereien und Verpackungsproduktionslinien, haben die Schneider eine hervorragende Wirtschaftlichkeit (Reduzierung um 30–40 %) und Kundenzufriedenheit (Steigerung um 35 %) bewiesen.

Auch in Zukunft wird die CTIA GROUP Hartmetall-Papierschnneider mithilfe intelligenter Fertigung (digitale Zwillinge, KI-Optimierung) und umweltfreundlichem Recycling (Co-arme Legierungen, ionische Flüssigkeitstechnologie) erforschen, entwickeln und konstruieren, um die Druck- und Verpackungsindustrie bei ihrer umweltfreundlichen und effizienten Entwicklung zu unterstützen und ihre Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt zu verbessern.

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 9227:2017

Korrosionsprüfung

Salzsprühnebeltest in künstlicher Atmosphäre

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Prüfverfahren für Salzsprühtests (Neutral Salt Spray, NSS), Essigsäure-Salzprühtests (Acetic Acid Salt Spray, AASS) und kupferbeschleunigte Essigsäure-Salzprühtests (Copper-Accelerated Acetic Acid Salt Spray, CASS) in künstlichen Atmosphären fest, um die Korrosionsbeständigkeit von metallischen Werkstoffen und ihren Schutzbeschichtungen (wie Hartmetall, verzinkte Schicht, beschichtete Stahlplatte) zu bewerten. Die Prüfverfahren eignen sich zum Vergleich des Korrosionsverhaltens von Werkstoffen, Komponenten oder Baugruppen, sagen jedoch nicht direkt deren Lebensdauer in realen Umgebungen voraus. Diese Norm ist nicht anwendbar auf die Bewertung der Korrosionsbeständigkeit nichtmetallischer Werkstoffe.

2 Normative Verweisungen

Die in den folgenden Dokumenten aufgeführten Abschnitte werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für referenzierte Dokumente mit Datum gelten nur die referenzierten Versionen; für referenzierte Dokumente ohne Datum gelten die neuesten Versionen (einschließlich aller Änderungen).

ISO 1514:2016 Farben und Lacke – Standardprüfplatten für die Prüfung

ISO 2808:2019 Farben und Lacke – Bestimmung der Filmdicke

ISO 3574:2012 Kaltgewalzte Bleche und Bänder aus Kohlenstoffstahl – Spezifikationen

Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

3 Begriffe und Definitionen

Für dieses Dokument gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

Salzprühtest: Unter kontrollierten Bedingungen wird eine Salzlösung durch eine Sprühhvorrichtung in feine Tröpfchen zerstäubt, um eine künstliche Korrosionsatmosphäre zu erzeugen und so die Korrosionsbeständigkeit eines Materials zu bewerten.

NSS (Neutraler Salzprühtest): Ein Salzprühtest, der mit einer neutralen Salzlösung (pH 6,5–7,2) durchgeführt wird.

AASS (Essigsäure-Salzprühtest): Ein Salzprühtest, der durchgeführt wird, indem einer neutralen Salzlösung Essigsäure hinzugefügt und der pH-Wert auf 3,1–3,3 eingestellt wird.

Chlorid (CuCl_2) zur Acetat-Salzprühtestlösung beschleunigt den Korrosionstest.

Gewichtsverlust: Die Änderung der Masse einer Probe vor und nach einem Test, üblicherweise ausgedrückt in mg/cm^2 .

4 Prüfprinzip

Der Salzprühtest simuliert die Korrosionsbedingungen in Meeres- oder Industrieumgebungen, indem die Probe einer künstlichen Atmosphäre mit Salztröpfchen ausgesetzt wird. Der NSS-Test simuliert eine neutrale Salzprühumgebung, und die AASS- und CASS-Tests beschleunigen die Korrosion durch Ansäuerung und Zugabe von Katalysatoren (wie CuCl_2), die für anspruchsvollere

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bewertungen des Korrosionsverhaltens geeignet sind. Die Korrosionsrate wird anhand des Gewichtsverlusts, der Korrosionsproduktanalyse oder von Oberflächendefekten (wie Lochfraß und Abplatzungen) bewertet.

5 Prüfmittel

5.1 Salzsprühnebelprüfkammer

Volumen ≥ 400 l, um einen gleichmäßigen Luftstrom um die Probe herum sicherzustellen.

Der Kofferaufbau besteht aus korrosionsbeständigem Material (z. B. glasfaserverstärktem Kunststoff), um eine Verschmutzung durch Metallmaterial zu vermeiden.

Ausgestattet mit Sprühvorrichtung, Heizsystem und Feuchtigkeitskontrollsystem.

5.2 Sprühgerät

Das Düsenmaterial ist korrosionsbeständig (z. B. Polytetrafluorethylen).

Sprühdruck: 0,07–0,17 MPa (0,7–1,7 bar).

Sprühtröpfchengröße: 1–10 μm .

5.3 Umweltkontrolle

Temperatur in der Prüfkammer:

NSS: $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

AASS und CASS: $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Luftfeuchtigkeit: $\geq 95\%$ relative Luftfeuchtigkeit.

6 Testlösung

6.1 NSS-Testlösung

Natriumchloridkonzentration (NaCl): $50\text{ g/l} \pm 5\text{ g/l}$.

pH: 6,5–7,2 (bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Reinheit der Lösung: Verunreinigungen (wie Cu, Ni) $< 0,001\%$.

6.2 AASS-Testlösung

Geben Sie Eisessig zur NSS-Lösung und stellen Sie den pH-Wert auf 3,1–3,3 (bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) ein.

6.3 CASS-Testlösung

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ in einer Konzentration von $0,26\text{ g/l} \pm 0,02\text{ g/l}$ zur AASS-Lösung gegeben.

pH: 3,1–3,3 (bei $25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

6.4 Lösungssammlung

Sammelrate: 1,0–2,0 ml/h (80 cm^2 horizontale Fläche).

NaCl-Konzentration der Sammelösung: $50\text{ g/l} \pm 10\text{ g/l}$.

7. Musteranforderungen

7.1 Probenart

Metallische Werkstoffe, beschichtete Werkstoffe oder Bauteile, mit für die Prüfkammer geeigneten Abmessungen (empfohlen $150\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 1\text{ mm}$).

Die Oberflächenrauheit von Hartmetallproben beträgt $R_a \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$.

7.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Zuverlässigkeit sicherzustellen, wurden in jede Gruppe mindestens drei Proben aufgenommen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Probenvorbereitung

Reinigen Sie die Probe, um Öl und Oxide zu entfernen (kann mit wasserfreiem Ethanol gereinigt werden).

Die Kanten der Proben sollten glatt sein, um scharfe Kanten und Ecken zu vermeiden, die lokale Korrosion verursachen können.

Notieren Sie die Anfangsmasse der Probe (Genauigkeit $\pm 0,001$ g).

7.4 Probenplatzierung

Die Probe wird in einem Winkel von 15° – 30° zur Vertikalen platziert.

Der Abstand zwischen den Proben sollte ≥ 20 mm betragen, um sicherzustellen, dass die Tropfen nicht aufeinander tropfen.

8 Prüfverfahren

8.1 Prüfbedingungen

NSS: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 6,5–7,2.

AASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1–3,3.

CASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1–3,3, mit CuCl_2 .

8.2 Prüfzeit

Empfohlene Testzyklen: 24 h, 48 h, 96 h, 240 h, 720 h (Auswahl entsprechend den Anwendungsanforderungen).

Zur Beurteilung der langfristigen Korrosionsbeständigkeit werden für Hartmetall 720 Stunden empfohlen.

8.3 Testbetrieb

Heizen Sie die Testkammer auf die angegebene Temperatur vor. Geben Sie die Testlösung hinzu und starten Sie die Sprühhvorrichtung. Platzieren Sie die Probe, schließen Sie die Testkammer und notieren Sie den Startzeitpunkt des Tests. Überprüfen Sie alle 24 Stunden den pH-Wert der Lösung und die Sammelrate.

8.4 Ende der Prüfung

Die Proben wurden entnommen und mit destilliertem Wasser gespült, um Salzablagerungen zu entfernen.

Mit wasserfreiem Ethanol waschen und trocknen ($60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 30 Min.).

Notieren Sie die Endmasse der Probe (Genauigkeit $\pm 0,001$ g).

9 Ergebnisauswertung

9.1 Gewichtsverlustberechnung

Gewichtsverlustrate (mg/cm^2) = (Anfangsmasse - Endmasse) / Probenoberfläche.

cm^2 nach 720 h NSS $\pm 0,01$ mg/cm^2 .

9.2 Oberflächenanalyse

Verwenden Sie ein optisches Mikroskop (50- bis 200-fache Vergrößerung), um Lochfraß, Abplatzungen oder Korrosionsprodukte zu beobachten.

Notieren Sie die Anzahl, Größe (Durchmesser, Tiefe) und Verteilung der Korrosionslöcher.

9.3 Bewertungskriterien

Entsprechend den Anwendungsanforderungen werden qualifizierte Standards für Gewichtsverlust

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder Oberflächendefekte festgelegt.

Zum Beispiel: Gewichtsverlust des chemischen Ventilkarbid $< 0,1 \text{ mg/cm}^2$, Lochfraßtiefe $< 5 \text{ }\mu\text{m}$.

10 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialart, Größe, Oberflächenbeschaffenheit.

Testbedingungen: Testtyp (NSS/AASS/CASS), Temperatur, pH-Wert, Testzeit.

Ergebnisse: Gewichtsverlustrate, Anzahl und Größe der Korrosionslöcher, Oberflächenfotos.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den Bewerbungsanforderungen entspricht.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Salzsprühbeständigkeit typischer Materialien

Materialtyp	Testtyp	Prüfzeit (h)	Gewichtsverlustrate (mg/cm^2)	Typische Anwendungen
Hartmetall (WC-10Co)	NSS	720	$0,08 \pm 0,01$	Schiffsausrüstung
Verzinktes Stahlblech	AASS	240	$0,15 \pm 0,02$	Bauteile
Edelstahl (304)	CASS	96	$0,05 \pm 0,01$	Lebensmittelverarbeitungsgeräte

Anhang B (Informativer Anhang) Umweltanforderungen

Prüfkammertemperatur: $15 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $35 \text{ }^\circ\text{C}$, $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: $30\text{--}70 \%$, $50 \pm 10 \%$ empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Zusammenfassen

ISO 9227:2017 „Korrosionsprüfungen – Salzsprühnebelprüfungen in künstlichen Atmosphären“ bietet standardisierte Methoden zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit von Metallwerkstoffen und Schutzbeschichtungen, darunter drei Prüfarten: NSS, AASS und CASS. Durch standardisierte Prüfbedingungen und -verfahren lässt sich die Leistung von Werkstoffen in simulierten korrosiven Umgebungen effektiv vergleichen und bietet so eine wissenschaftliche Grundlage für die Materialauswahl und technische Anwendungen (wie beispielsweise den Einsatz von Hartmetall in Schiffsausrüstung).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 18376-2014 Methoden zum Testen der Korrosionsbeständigkeit und
Verschleißfestigkeit von Hartmetallen

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 18376-2001 „Prüfverfahren für Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 18376-2001 ergeben sich folgende wesentliche technische Änderungen:

Elektrochemisches Prüfverfahren hinzugefügt (siehe 5.3);

Die Bedingungen des Salzsprühtests wurden angepasst und die Temperatur von 40 °C auf 35 °C ± 2 °C geändert (siehe 5.1).

Die Belastung und die Zyklenzahl des Abriebverschleißtests wurden modifiziert. Die Belastung wurde von 30 N auf 20 N ± 0,5 N und die Zyklenzahl von 500 auf 1000 ± 10 erhöht (siehe 6.2).

Die Anforderung an die Oberflächenrauheit der Probe wird auf Ra < 0,8 µm ± 0,1 µm erhöht (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, University of Science and Technology Beijing, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Diese Norm tritt am 1. Oktober 2014 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Prüfverfahren für die Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit von Hartmetallen fest. Sie gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase, einschließlich, aber nicht beschränkt auf WC-Co- und WC-Ni-Systeme.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 12444-2006 Prüfverfahren für Gleitreibung und Verschleiß metallischer Werkstoffe

GB/T 16545-2008 Salzsprühkorrosionstestverfahren für Metallmaterialien

ISO 9227-2017 Korrosionsprüfung – Korrosivität in künstlicher Atmosphäre

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Korrosionsbeständigkeit

Die Fähigkeit von Hartmetall, Masseverlust oder Oberflächenschäden in korrosiven Medien (wie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sauren Lösungen oder Salzsprühnebel) zu widerstehen, üblicherweise ausgedrückt als Gewichtsverlustrate (mg/cm^2) und Korrosionsstromdichte (i_{corr} , A/cm^2). 3.2 Verschleißbeständigkeit Die Fähigkeit von Hartmetall

, Materialverschleiß unter mechanischer Reibung oder abrasiver Einwirkung zu widerstehen, üblicherweise ausgedrückt als Verschleißmasseverlust (mg) oder Verschleißvolumen (mm^3). 3.3 Korrosionsstromdichte (i_{corr})

Bei elektrochemischen Prüfungen handelt es sich um eine Kenngröße, die die Korrosionsgeschwindigkeit des Materials widerspiegelt und die Einheit A/cm^2 hat.

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Stichprobe

4.1.1 Probenmaterial: Hartmetall auf WC-Basis mit Co oder Ni als Bindephase, die Zusammensetzung sollte den technischen Produktanforderungen entsprechen.

4.1.2 Probengröße: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. 4.1.3 Anzahl der Proben: Jede Testgruppe sollte mehr als dreimal wiederholt werden.

4.2 Probenverarbeitung

4.2.1 Oberflächenbehandlung: Die Probenoberfläche wird mechanisch poliert, mit einer Rauheit von $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Reinigung: Ultraschallreinigung mit wasserfreiem Ethanol für $5 \text{ Minuten} \pm 0,5 \text{ Minuten}$, Trocknen vor Gebrauch. 4.2.3 Anfangsmasse: Gemessen mit einer Analysenwaage, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Korrosionsbeständigkeitsprüfung

5.1 Salzsprühnebelprüfung

5.1.1 Prüfbedingungen:

Lösung: $5 \% \pm 0,1 \% \text{ NaCl}$ -Lösung (Massenanteil), pH 6,5–7,2.

Temperatur: $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dauer: $48 \text{ Stunden} \pm 2 \text{ Stunden}$.

5.1.2 Prüfgeräte

Salzsprühkammer, Sprühvolumen $1\text{-}2 \text{ mL}/(80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$.

5.1.3 Ergebnisauswertung:

Gewichtsverlustrate = $(m_0 - m_1) / A$, Einheit: mg/cm^2 , Genauigkeit: $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, wobei m_0 die Masse vor dem Test, m_1 die Masse nach dem Test und A die Oberfläche der Probe ist.

der Oberfläche und zeichnen Sie die Tiefe der Korrosionsgrube auf (Genauigkeit $\pm 0,5 \mu\text{m}$).

5.2 Säuretauchprüfung

5.2.1 Prüfbedingungen:

Lösung: $1 \% \pm 0,1 \% \text{ H}_2\text{SO}_4$ -Lösung (Volumenanteil).

Temperatur: $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Eintauchzeit: $24 \text{ Stunden} \pm 1 \text{ Stunde}$.

5.2.2 Prüfgeräte

Wasserbad mit konstanter Temperatur.

5.2.3 Ergebnisauswertung:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Gewichtsverlustrate wird gemäß 5.1.3 berechnet.

Sie die Tiefe von Korrosionslöchern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

5.3 Elektrochemische Prüfung

5.3.1 Prüfbedingungen:

Elektrolyt: $3,5 \% \pm 0,1 \% \text{ NaCl}$ -Lösung, Temperatur $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Elektrodensystem: Arbeitselektrode (Hartlegierung), Referenzelektrode (gesättigte Kalomelektrode SCE), Hilfselektrode (Platinelektrode).

Scanrate: $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$, Potentialbereich $\pm 0,25 \text{ V}$ vs. E_{kor} .

5.3.2 Prüfmittel

Elektrochemischer Arbeitsplatz, Potentialgenauigkeit $\pm 0,001 \text{ V}$, Stromgenauigkeit $\pm 10^{-9} \text{ A}$.

5.3.3 Ergebnisauswertung:

Misst das Korrosionspotential (E_{kor} , Genauigkeit $\pm 0,02 \text{ V}$) und die Korrosionsstromdichte (i_{kor} , Genauigkeit $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

Es wurde eine Tafel-Anpassungsanalyse verwendet und der Test ≥ 3 Mal wiederholt.

6 Verschleißfestigkeitsprüfung

6.1 Reibungs- und Verschleißprüfung

6.1.1 Prüfbedingungen:

Belastung: $50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$.

Gleitgeschwindigkeit: $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$.

Testzeit: 30 Minuten ± 1 Minute.

Reibpaarung: Hartmetallstift, Paarungsmaterial: gehärtete Stahlscheibe (Härte $\text{HV } 600 \pm 50$).

6.1.2 Prüfmittel

Reibungs- und Verschleißprüfmaschine, Lastgenauigkeit $\pm 1 \text{ N}$, Geschwindigkeitsgenauigkeit $\pm 0,01 \text{ m/s}$.

6.1.3 Ergebnisauswertung:

Verschleißmassenverlust = $m_0 - m_1$, Einheit: mg, Genauigkeit: $\pm 0,01 \text{ mg}$.

der Verschleißnarben mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

6.2 Abrasionsverschleißprüfung

6.2.1 Prüfbedingungen:

Schleifmittel: SiC, Partikelgröße $100\text{--}150 \mu\text{m}$.

Belastung: $20 \text{ N} \pm 0,5 \text{ N}$.

Anzahl der Testzyklen: 1000 Zyklen ± 10 Zyklen.

Reibpaarung: Hartmetallprobe, Gegenmaterial ist eine Schleifscheibe.

6.2.2 Prüfmittel

Abrasivverschleißprüfmaschine, Lastgenauigkeit $\pm 0,5 \text{ N}$, Kreisgenauigkeit ± 10 Kreise.

6.2.3 Ergebnisauswertung:

Verschleißvolumen = $(m_0 - m_1) / \rho$, Einheit: mm^3 , Genauigkeit: $\pm 0,01 \text{ mm}^3$, wobei ρ die Materialdichte ist, Genauigkeit: $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

Sie das Verschleißnarbenprofil mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

7 Datenverarbeitung

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

- 7.1 Alle Testergebnisse sind der Durchschnitt von mehr als 3 Messungen.
- 7.2 Die Korrosionsbeständigkeit wird als Gewichtsverlustrate (mg/cm^2 , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$) und i_{corr} (A/cm^2 , Genauigkeit $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$) ausgedrückt.
- 7.3 Die Verschleißbeständigkeit wird als Verschleißmassenverlust (mg , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$) oder Verschleißvolumen (mm^3 , Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}^3$) ausgedrückt.
- 7.4 Den Ergebnissen liegt eine Unsicherheitsanalyse mit einem Konfidenzniveau von 95 % bei.

8 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (wie Temperatur, Zeit, Belastung usw.).

Testergebnisse (Gewichtsverlust, i_{corr} , Verschleißverlust usw.) und Unsicherheiten.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

Anhang A (Normativer Anhang)

Beispiel für die Probenvorbereitung

A.1 Probenschneiden: Diamantschleifscheibe verwenden, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $10 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$.

A.2 Polieren: SiC- Schleifpapier (Körnung Nr. 800–1200) verwenden und abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) polieren.

A.3 Reinigen: Ultraschallreinigung für 5 Minuten $\pm 0,5$ Minuten, nach dem Trocknen wiegen.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 WC10Ni: Salzsprühnebel-Gewichtsverlustrate $0,04 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$, Verschleißmassenverlust $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

B.2 WC10 Co : Salzsprühnebel-Gewichtsverlustrate $0,07 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$, Verschleißmassenverlust $0,12 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

zu

Themen, die in dieser Norm nicht behandelt werden, finden Sie in den entsprechenden internationalen Normen (z. B. ISO 3738, ISO 28079) oder beim technischen Komitee. Diese Norm wurde am 9. Juli 2014 von der National Standardization Administration herausgegeben und am 1. Oktober 2014 umgesetzt.

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:

Internationaler Standard
ISO 4287:1997 Geometrische Produktspezifikationen
— **Oberflächentextur: Konturmethode**
— **Begriffe, Definitionen und Oberflächenbeschaffenheitsparameter**
Geometrische Produktspezifikationen (GPS)
— **Oberflächentextur: Profilmethode**
— **Begriffe, Definitionen und Oberflächentexturparameter**

Überblick

ISO 4287:1997 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profilmethode – Begriffe, Definitionen und Parameter der Oberflächenbeschaffenheit“. Die Norm wurde am 1. August 1997 veröffentlicht. Die neueste Version ist ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) und gilt seit 2018. ISO 4287 wurde vom ISO/TC 213 (Geometrische Produktspezifikationen und Verifizierung) entwickelt, um einheitliche Begriffe, Definitionen und Parameter für die Profilmethode der Oberflächenbeschaffenheit bereitzustellen, die für die Beurteilung der Oberflächenqualität von mechanischen Teilen, Werkzeugen und Materialien anwendbar ist. Diese Norm findet breite Anwendung in der Fertigung, der Qualitätskontrolle und der Konstruktion.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Anwendbar auf Teile, deren Oberflächenstruktur mit der Profilmethode gemessen und bewertet wird, einschließlich Metalle, Kunststoffe und Keramik.
Zweck: Definition der Terminologie und Berechnungsmethoden für Oberflächentexturparameter und Bereitstellung einer Anleitung zur Messung und Berichterstattung der Oberflächenrauheit.
Nicht anwendbar: Nicht anwendbar für nicht profilbasierte Messungen der Oberflächentopographie (wie etwa die Flächenmethode) oder Mikrostrukturanalysen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.
ISO 3274:1996 Geometrische Produktspezifikationen (GPS)
— Oberflächenbeschaffenheit: Profilmethode — Nominale Eigenschaften von Tastinstrumenten
ISO 4288:1996 Geometrische Produktspezifikationen (GPS)
— Oberflächenbeschaffenheit: Profilmethode — Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Grundlegende Konzepte

3.1.1 Oberflächenstruktur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Oberfläche eines Teils ist die Summe seiner Rauheit, Welligkeit und Formfehler. 3.1.2 Profil
Der zweidimensionale Querschnitt der Oberflächenstruktur, der die Kurve der Höhe gegenüber der Länge darstellt.

3.2 Rauheitsparameter

3.2.1 Ra (Arithmetischer Mittelwert der Abweichung)

Profil Arithmetischer Mittelwert der Abweichung, definiert als Durchschnitt der Absolutwerte der Profilabweichung innerhalb der Probenlänge, in μm (Mikrometer).

3.2.2 Rq (Quadratischer Mittelwert der Abweichung)
Profil Quadratischer Mittelwert der Abweichung, definiert als Quadratwurzel des Mittelwerts der Quadrate der Profilabweichung innerhalb der Probenlänge, in μm (Mikrometer).

3.2.3 Rz (Maximale Höhe des Profils)
Maximale Höhe des Profils, definiert als Höhenunterschied zwischen der höchsten Spitze und dem tiefsten Tal innerhalb der Probenlänge, in μm (Mikrometer).

3.2.4 Rt (Gesamthöhe des Profils)
Gesamthöhe des Profils, definiert als maximaler Höhenunterschied zwischen der höchsten Spitze und dem tiefsten Tal innerhalb der Auswertungslänge, in μm (Mikrometer).

3.2.5 Rp (Maximale Profilsitzenhöhe)
Spitzenhöhe innerhalb der Probenlänge, in μm (Mikrometer).

3.2.6 Rv (Maximale Profiltaltiefe) ist

die tiefste Taltiefe innerhalb der Probenlänge in μm (Mikrometer).

3.3 Abtast- und Auswertelängen

3.3.1 Abtastlänge (lr)

Die Referenzlänge, die zur Berechnung der Rauheitsparameter verwendet wird, normalerweise 0,25 mm, 0,8 mm oder 2,5 mm.

3.3.2 Auswertungslänge (ln)
Die Summe mehrerer Abtastlängen, die zur umfassenden Auswertung der Oberflächenstruktur verwendet wird, normalerweise 5 lr.

3.3.3 Verfahrenlänge (lt)
Die während des Messvorgangs tatsächlich gescannte Gesamtlänge, normalerweise 1,5 ln.

3.4 Weitere Parameter

3.4.1 Sk (Kernrautiefe)

Profil Kernrautiefe, spiegelt die Lagereigenschaften des Materials wider, Einheit ist μm (Mikrometer).

3.4.2 Rsk (Schiefe)
Profil Schiefe, beschreibt die Asymmetrie der Höhenverteilung, Einheit ist nicht angegeben.

3.4.3 Rku (Kurtosis) Profil
Kurtosis, beschreibt die Schärfe der Höhenverteilung, Einheit ist nicht angegeben.

4 Parameterberechnungsmethoden

4.1 Rauheitskennwerte

Berechnung von Ra:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), lr 为采样长度 (Sampling length).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取 采样长度 (Sampling length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取 评估长度 (Evaluation length) 内最大 峰高 (Peak height) 与最低 谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 Messbedingungen

Instrument: Kontaktinstrument (Stylus) gemäß ISO 3274 mit einem Stylusradius $\leq 5 \mu m$.

Filterung: Verwenden Sie Hochpassfilter, um den Welligkeitseffekt zu beseitigen. Die Grenzwellenlänge λ_c beträgt üblicherweise 0,8 mm.

5 Meldepflichten

Parameterwerte: Melden Sie R_a , R_q , R_z und andere Parameterwerte (Parameterwerte), die Einheit ist μm (Mikrometer), die Genauigkeit beträgt $\pm 0,01 \mu m$.

Messbedingungen: einschließlich Abtastlänge, Auswertungslänge, Filterbedingungen und Stifttyp.

Unsicherheit: Die Messunsicherheit wird innerhalb eines 95-%-Konfidenzniveaus angegeben.

6 Anhang

Anhang A: Typische Daten

Bearbeitetes Stahlteil: $R_a = 0,8 \mu m \pm 0,01 \mu m$, $R_z = 4,5 \mu m \pm 0,1 \mu m$.

Poliertes Hartmetall: $R_a = 0,02 \mu m \pm 0,01 \mu m$, $R_z = 0,15 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Anhang B: Messbeispiel

Die Probenentnahmelänge beträgt 0,8 mm, die Auswertelänge 4 mm und der R_a -Messwert liegt bei $1,2 \mu m$.

veranschaulichen

Zugehörige Normen: ISO 3274 legt die Eigenschaften von Messgeräten fest. ISO 4288 bietet Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenstruktur.

Gültigkeit: ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) als gültig im Jahr 2018 bestätigt, kann zukünftig auf Grundlage des GPS-Frameworks aktualisiert werden.

Bezugsquelle: Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

Hinweis: Bei der Implementierung ist es notwendig, den spezifischen Oberflächenbehandlungsprozess und die Kalibrierung der Messgeräte zu kombinieren und professionelle Techniker zu konsultieren.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

Internationaler Standard
ISO 3274:1996 Geometrische Produktspezifikationen (GPS)
— Oberflächentextur: Konturmethode
Geometrische Produktspezifikationen (GPS) für Kontaktinstrumente
— Oberflächentextur: Profilmethode
— Nominale Eigenschaften von Tastinstrumenten

Überblick

ISO 3274:1996 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung entwickelte Norm mit dem Titel „Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächenbeschaffenheit: Profilverfahren – Nominale Eigenschaften von Kontaktmessgeräten“. Die Norm wurde am 1. August 1996 veröffentlicht. Die neueste Version ist ISO 3274:1996 (Amd 1:2009), deren Gültigkeit 2019 bestätigt wurde. ISO 3274 wurde von ISO/TC 213 (Geometrische Produktspezifikationen und -prüfung) entwickelt, um die nominellen Eigenschaften von Kontaktmessgeräten für die Profilometriemessung der Oberflächenbeschaffenheit, einschließlich Sonden, Antriebsvorrichtungen und Filteranforderungen, festzulegen. Diese Norm bildet die technische Grundlage für die Messung der Oberflächenrauheit und findet breite Anwendung in der Fertigung, im Maschinenbau und in der Materialprüfung.

1 Geltungsbereich

Anwendbar auf : Profilometrie zur Messung der Oberflächenstruktur mit Kontaktinstrumenten, die Materialien wie Metalle, Kunststoffe und Keramik umfasst.

Zweck : Definition der nominalen Eigenschaften von Kontaktinstrumenten, um die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Messergebnisse sicherzustellen.

Nicht zutreffend : Nicht geeignet für die Verwendung mit berührungslosen Messinstrumenten (wie optischen Geräten oder Lasergeräten) oder für die mikrostrukturelle Analyse.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 4287:1997 Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächentextur: Profilmethode – Begriffe, Definitionen und Parameter der Oberflächentextur

ISO 4288:1996 Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächentextur: Profilmethode – Regeln und Verfahren zur Bewertung der Oberflächentextur

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Kontaktinstrument

Ein Gerät, das mit einer physischen Sonde die Oberfläche zur Messung berührt und so

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenprofildaten erhält . 3.2 Der Teil am Ende **des Sondeninstruments**

, der die Oberfläche berührt und für die Erfassung von Höhenänderungen zuständig ist. 3.3

Probenlänge

Die Referenzlänge zur Messung der Oberflächenstruktur, normalerweise 0,25 mm, 0,8 mm oder 2,5 mm. 3.4 **Grenzwellenlängenfilter**

Die kritische Länge zur Unterscheidung von Rauheit und Welligkeit, ein üblicher Wert ist 0,8 mm.

4 Anforderungen an die Geräteeigenschaften

4.1 Sonde

Form : Konische oder kugelförmige Spitze, Spitzenradius typischerweise 2 μm bis 10 μm .

Materialien : Verschleißfeste Materialien wie Diamant oder Hartmetall.

Anpresskraft : 0,5 mN bis 4 mN, abhängig von Oberflächenhärte und -rauheit.

4.2 Antriebsvorrichtung

Bewegungsgeschwindigkeit : 0,1 mm/s bis 1 mm / s, Genauigkeit $\pm 0,02$ mm/s.

Geradheit : Der Geradheitsfehler der Bewegungsbahn beträgt $\leq 0,5$ μm .

Auflösung : Höhenauflösung $\leq 0,01$ μm , Längenauflösung $\leq 0,1$ μm .

4.3 Filter

Typ : 2RC oder phasenkorrigierter Hochpassfilter.

Grenzwellenlänge (λ_c) : 0,08 mm, 0,25 mm, 0,8 mm oder 2,5 mm, wählen Sie entsprechend den Messanforderungen.

Übertragungseigenschaften : gemäß den Anforderungen von ISO 11562, Dämpfungsrate ≥ 75 % .

5 Messbedingungen

Umgebungsbedingungen : Temperatur $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit 40 % – 60 %.

Oberflächenvorbereitung : Die Probenoberfläche sollte sauber, öl- und schmutzfrei sein und eine Rauheit von $R_a \leq 0,8$ μm aufweisen .

Messrichtung : Messen Sie entlang der Hauptbearbeitungsrichtung oder vertikalen Richtung des Teils.

6 Datenerhebung und -verarbeitung

Abtastintervall : wird automatisch entsprechend der Abtastlänge angepasst, das maximale Intervall beträgt $\leq 0,1$ μm .

Anzahl der Datenpunkte : Mindestens 5000 Datenpunkte pro Abtastlänge.

Filtern : Verwenden Sie eine bestimmte Grenzwellenlänge, um die Auswirkungen der Welligkeit zu entfernen.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit.

Instrumentenmodell, Sondentyp und Kontaktkraft.

Messbedingungen (z. B. Probenahmelänge, Grenzwellenlänge).

Messergebnisse und Unsicherheiten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

Bearbeitete Stahlteile : Sondenradius 5 μm , Probenlänge 0,8 mm, $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Polierhartmetall : Sondenradius 2 μm , Probenlänge 0,25 mm, $R_a = 0,02 \mu\text{m}$.

veranschaulichen

Zugehörige Normen :

ISO 4287 bietet Definitionen von Oberflächentexturparametern.

ISO 4288 bietet Regeln und Verfahren zur Bewertung.

Gültigkeit : ISO 3274:1996 (Amd 1:2009) wurde 2019 als gültig bestätigt und kann in Zukunft auf der Grundlage technologischer Fortschritte aktualisiert werden.

Bezugsquellen : Der Standardtext kann über die offizielle ISO- Website erworben werden.

Hinweis : Bei der Implementierung muss das Instrument kalibriert werden und je nach spezifischen Messanforderungen sollten professionelle Techniker konsultiert werden.

Anhang

Internationaler Standard
ISO 4288:1996 Geometrische Produktspezifikationen
— **Oberflächentextur: Konturmethode**
— **Regeln und Verfahren zur Bewertung der Oberflächentextur**
Geometrische Produktspezifikationen
— **Oberflächentextur: Profilmethode**
— **Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit**

Überblick

ISO 4288:1996 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung entwickelte Norm mit dem Titel „Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächenbeschaffenheit: Profilmethode – Regeln und Verfahren zur Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit“. Die Norm wurde am 1. August 1996 veröffentlicht. Die neueste Version ist ISO 4288:1996 (Amd 1:2003), deren Gültigkeit 2018 bestätigt wurde. ISO 4288 wurde vom ISO/TC 213 (Geometrische Produktspezifikationen und Verifizierung) entwickelt, um Bewertungsregeln und -verfahren für die Profilmethode der Oberflächenbeschaffenheit bereitzustellen, einschließlich Messbedingungen, Datenverarbeitung und Ergebnisberichterstattung. Diese Norm gilt für die Oberflächenqualitätskontrolle von mechanischen Teilen, Werkzeugen und Materialien und findet breite Anwendung in Fertigung und Technik.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte : Geeignet für Teile, deren Oberflächenstruktur durch Profilometrie gemessen und bewertet wird, einschließlich Metall-, Kunststoff- und Keramikmaterialien.

Zweck : Festlegung von Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, um die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen.

Nicht anwendbar : Nicht anwendbar für Nicht-Konturmethode(n) (z. B. planimetrische Methoden) oder mikrostrukturelle Analysen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 3274:1996 Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächenbeschaffenheit: Profilometrie – Nominale Eigenschaften für Kontaktmessgeräte

ISO 4287:1997 Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächentextur: Profilmethode – Begriffe, Definitionen und Parameter der Oberflächentextur

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Oberflächentextur

Die Summe aus Rauheit, Welligkeit und Fehlermorphologie der Teileoberfläche. 3.2 **Profil**

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

Ein zweidimensionaler Querschnitt der Oberflächentextur, der eine Kurve von Höhe über Länge darstellt. 3.3 **Probenlänge** Die

Referenzlänge zur Berechnung der Rauheitsparameter, normalerweise 0,25 mm, 0,8 mm oder 2,5 mm. 3.4 **Bewertungslänge**

Die Summe mehrerer Probenahmelängen, die zur umfassenden Bewertung der Oberflächenstruktur verwendet wird, normalerweise 5 lr .

4 Messbedingungen

4.1 Instrument

, die der ISO 3274 entsprechen, beträgt der Sondenradius typischerweise 2 µm bis 10 µm .

Bewegungsgeschwindigkeit: 0,1 mm/s bis 1 mm/s, Genauigkeit ±0,02 mm/s.

4.2 Umgebungsbedingungen

Temperatur: 20 °C ± 2 °C.

Luftfeuchtigkeit: 40–60 %.

Vermeiden Sie Vibrationen und elektromagnetische Störungen.

4.3 Oberflächenvorbereitung

Die Probenoberfläche ist sauber, frei von Öl und Schmutz und die Rauheit $Ra \leq 0,8 \mu m$.

Messrichtung: Entlang der Hauptbearbeitungsrichtung oder senkrecht dazu.

5 Bewertungsregeln

5.1 Auswahl der Abtastlänge

Wählen Sie die Probenlänge basierend auf den Oberflächenbeschaffenheitseigenschaften:

Feine Oberfläche: 0,25 mm.

Gesamtoberfläche: 0,8 mm.

Raue Oberfläche: 2,5 mm.

5.2 Filterung

Zum Einsatz kommt ein Hochpassfilter mit einer Grenzwellenlänge λ_c von typischerweise 0,8 mm.

Erfüllt die Phasenkorrekturanforderungen der ISO 11562 mit einer Dämpfung von $\geq 75 \%$.

5.3 Datenverarbeitung

Rauheitsparameter : Berechnen Sie Ra , Rq , Rz und andere Parameter .

Ausreißerverarbeitung : Eliminieren Sie offensichtlich abnormale Daten und messen Sie erneut.

Unsicherheit : Bewertet den durch die Messausrüstung und den Betrieb verursachten Fehler mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

6 Bewertungsverfahren

Vorbereitungsphase : Kalibrieren Sie das Instrument und reinigen Sie die Probenoberfläche .

Messphase : Scannen Sie entlang der angegebenen Richtung und zeichnen Sie Konturdaten auf .

Analysephase : Filter anwenden und Parameterwerte berechnen .

Berichtsphase : Protokollieren Sie die Ergebnisse und vergleichen Sie sie mit den Toleranzanforderungen.

7 Prüfbericht

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

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit. Messbedingungen (z. B. Probenlänge, Grenzwellenlänge, Messrichtung).

Werte und Unsicherheiten der Oberflächentexturparameter. Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

Bearbeitete Stahlteile : Probenlänge 0,8 mm, $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, $R_z = 4,5 \mu\text{m}$.

Poliertes Hartmetall : Probenlänge 0,25 mm, $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, $R_z = 0,15 \mu\text{m}$.

Anhang B: Messbeispiele Die Auswertlänge betrug 4 mm, die Grenzwellenlänge 0,8 mm und der R_a -Messwert $1,2 \mu\text{m}$.

veranschaulichen

Relevante Normen : ISO 3274 legt die Nenneigenschaften von Kontaktmessgeräten fest. ISO 4287 enthält Definitionen von Oberflächentexturparametern.

Gültigkeit : ISO 4288:1996 (Amd 1:2003). Gültigkeit 2018 bestätigt, kann zukünftig auf Grundlage des GPS-Frameworks aktualisiert werden.

Bezugsquellen : Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

Hinweis : Bei der Implementierung muss das Instrument kalibriert werden und je nach spezifischen Messanforderungen sollten professionelle Techniker konsultiert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Nationaler Standard der Volksrepublik China

GB/T 12444-2006 Methoden

zur Prüfung der Gleitreibung und des Verschleißes von metallischen Werkstoffen

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2000 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 12444-1990 „Prüfverfahren für Gleitreibung und Verschleiß metallischer Werkstoffe“.

Im Vergleich zu GB/T 12444-1990 sind die wichtigsten technischen Änderungen folgende:

Der Prüfkraftbereich wurde von 20–100 N auf 10–200 N $\pm$ 1 N angepasst (siehe 5.2);

Der Gleitgeschwindigkeitsbereich wurde von 0,05–0,5 m/s auf 0,01–1 m/s $\pm$ 0,01 m/s geändert (siehe 5.2).

Die Auswahlanforderungen für Reibpaarungsmaterialien wurden hinzugefügt und die Härte der gepaarten Materialien präzisiert (siehe 4.2).

Die Genauigkeitsanforderung für die Messung des Verschleißmassenverlusts wurde von $\pm 0,1$ mg auf $\pm 0,01$ mg verfeinert (siehe 6.2).

Diese Norm wird vom Nationalen Technischen Komitee für Normung von Eisen und Stahl (SAC/TC 183) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Institut für Metallforschung, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Peking Eisen- und Stahlforschungsinstitut, Tsinghua-Universität. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Diese Norm tritt am 1. Dezember 2006 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Gleitreibungs- und Verschleißprüfung von metallischen Werkstoffen fest. Es dient der Bewertung der Verschleißfestigkeit metallischer Werkstoffe (wie Stahl, Legierungen, Hartmetall usw.) unter Trockenreibung oder Schmierbedingungen. Das Prüfverfahren basiert auf dem Stift-Scheibe-Kontaktverfahren und kann zur Qualitätskontrolle, Materialprüfung und zum Leistungsvergleich eingesetzt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 1031-1995 Bestimmung der Dichte und relativen Dichte von Kunststoffen

GB/T 6682-2008 Spezifikationen und Testmethoden für Wasser, das in analytischen Labors verwendet wird

ISO 4287:1997 Oberflächengeometrieparameter: Begriffe, Definitionen und Parameter der Profilometrie

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 Gleitreibung ist

der Widerstand, der durch den Kontakt zwischen zwei sich relativ zueinander bewegenden Oberflächen entsteht (Einheit: N).

3.2 Verschleißmassenverlust ist die Differenz der Masse der Probe vor und nach der Prüfung (Einheit: mg), was die Verschleißfestigkeit des Materials widerspiegelt. 3.3 Reibungskoeffizient ist das Verhältnis der Gleitreibungskraft zur normalen Druckbelastung (Einheit: dimensionslos, Genauigkeit: $\pm 0,01$).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

4.1.1 Probenmaterial: Metallische Materialien, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Stahl, Legierungen und Hartlegierungen.

4.1.2 Probenform: Zylindrischer Stift, Größe $\phi 6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ oder wie in Vereinbarung festgelegt. 4.1.3 Anzahl der Proben: Jede Testgruppe muss mehr als dreimal wiederholt werden.

4.2 Reibpaarung

4.2.1 Gegenwerkstoff: in der Regel gehärtetes Stahlblech (Härte $\text{HV } 600 \pm 50$) oder nach Vereinbarung festgelegter Werkstoff.

4.2.2 Oberflächenbehandlung: Oberflächenrauheit des Gegenwerkstoffs $\text{Ra} \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3 Probenverarbeitung

4.3.1 Oberflächenbehandlung: Die Probenoberfläche wird mechanisch poliert, mit einer Rauheit von $\text{Ra} \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3.2 Reinigung: Ultraschallreinigung mit wasserfreiem Ethanol für $5 \text{ Minuten} \pm 0,5 \text{ Minuten}$, Wiegen nach dem Trocknen, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.3.3 Ausgangszustand: Sicherstellen, dass die Probe keine Ölflecken oder Oxidschicht aufweist.

5 Prüfmethoden

5.1 Prüfmittel

5.1.1 Reibungs- und Verschleißprüfmaschine: mit Funktionen zur Lastregelung (Genauigkeit $\pm 1 \text{ N}$), Geschwindigkeitsregelung (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ m/s}$) und Reibungskraftmessung (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ N}$).

5.1.2 Umgebungsbedingungen: Temperatur $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65 \%$, oder nach Vereinbarung festgelegte Schmierbedingungen.

5.2 Prüfbedingungen

5.2.1 Belastung: $10\text{--}200 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, einstellbar je nach Materialeigenschaften.

5.2.2 Gleitgeschwindigkeit: $0,01\text{--}1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$. 5.2.3 Prüfdauer: $30 \text{ Minuten} \pm 1 \text{ Minute}$, bzw. Gleitstrecke $100 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$. 5.2.4 Kontaktform: Stift-Scheibe, Kontaktfläche ca. $0,28 \text{ cm}^2 \pm 0,01 \text{ cm}^2$.

5.3 Testverfahren

5.3.1 Einsetzen der Probe: Befestigen Sie die Probe am Stiftsitz der Prüfmaschine. Das Gegenmaterial ist eine horizontale Platte.

5.3.2 Anwenden der Last: Allmählich bis zum eingestellten Wert belasten und $1 \text{ Minute} \pm 10$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sekunden stabilisieren. 5.3.3 Starten des Tests: Notieren Sie Reibungskraft, Gleitdistanz und Testzeit. 5.3.4 Beenden des Tests: Entlasten, Probe entnehmen, reinigen und wiegen.

6 Datenverarbeitung

6.1 Reibungskoeffizient

6.1.1 Berechnungsformel:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中, μ 为摩擦系数, F 为摩擦力 (N), N 为正压载荷 (N)。

6.1.2 Ergebnisgenauigkeit: $\pm 0,01$, wobei der Durchschnittswert aus 5 Messungen ermittelt wird.

6.2 Verschleißmassenverlust

6.2.1 Berechnungsformel:

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中, Δm 为磨损质量损失 (mg), m_0 为试验前质量, m_1 为试验后质量。

6.3 Verschleißnarbenmessung

, um die Tiefe und Breite der Verschleißnarbe mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ zu messen .

6.3.2 Zeichnen Sie die Morphologie der Abnutzungsnarben auf und führen Sie bei Bedarf eine SEM-Analyse durch.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (wie Last, Geschwindigkeit, Zeit usw.).

Testergebnisse (Reibungskoeffizient, Verschleißmassenverlust, Verschleißnarbengröße usw.) und Unsicherheiten.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Beispiel für die Probenvorbereitung

A.1 Probenschneiden: Diamantschleifscheibe verwenden, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Polieren: SiC- Schleifpapier (Körnung Nr. 800–1200) verwenden und abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) polieren .

A.3 Reinigen: Ultraschallreinigung für $5 \text{ Min.} \pm 0,5 \text{ Min.}$, nach dem Trocknen wiegen.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 45# Stahl: Belastung 50 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s, Reibungskoeffizient $0,35 \pm 0,01$, Verschleißmassenverlust $0,15 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

B.2 WC10 Co: Belastung 100 N, Geschwindigkeit 0,5 m/s, Reibungskoeffizient $0,25 \pm 0,01$, Verschleißmassenverlust $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

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

veranschaulichen

Informationen zu Themen, die in dieser Norm nicht behandelt werden, finden Sie in den entsprechenden internationalen Normen (z. B. ASTM G99) oder beim technischen Komitee. Diese Norm wurde am 18. Juli 2006 von der National Standardization Administration herausgegeben und am 1. Dezember 2006 umgesetzt.

Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 16545-2008 Methoden des Salzsprühtests für metallische Werkstoffe

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2000 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 16545-1996 „Verfahren zur Prüfung der Salzsprühkorrosion metallischer Werkstoffe“.

Im Vergleich zu GB/T 16545-1996 sind die wichtigsten technischen Änderungen folgende:

Die Temperatur des Salzsprühtests wurde von $35\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ auf $35\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ angepasst (siehe 5.2).

Der Bedarf an Sprühvolumen wurde von $1\text{--}3\text{ mL} / (80\text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ auf $1\text{--}2\text{ mL} / (80\text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ geändert (siehe 5.2);

Die Methode zur Reinigung der Probenoberfläche wurde hinzugefügt und die Ultraschallreinigungszeit wurde präzisiert (siehe 4.2).

Die Anforderungen an die Beobachtung und Aufzeichnung von Korrosionsprodukten wurden verfeinert (siehe 6.2).

Diese Norm wird vom Nationalen Technischen Komitee für Korrosions- und Schutznormung (SAC/TC 156) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Institut für Metallforschung, Chinesische Akademie der Wissenschaften, Allgemeines Eisen- und Stahlforschungsinstitut, Staatliches Schlüssellabor für Meeresskorrosion und -schutz. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Zhao Qiang, Chen Li und Sun Wei. Diese Norm tritt am 1. Oktober 2008 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Salzsprühkorrosionsprüfung für metallische Werkstoffe fest. Es dient der Bewertung der Korrosionsbeständigkeit metallischer Werkstoffe (wie Stahl, Aluminiumlegierungen, Hartmetalle usw.) in simulierten maritimen oder industriellen Umgebungen. Das Prüfverfahren basiert auf kontinuierlicher oder periodischer Salzsprühnebelbelastung und kann zur Qualitätskontrolle, Materialprüfung und zum Leistungsvergleich eingesetzt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 6461-2002 Allgemeine Richtlinien für Korrosionstests von Metallen und Legierungen

GB/T 6682-2008 Spezifikationen und Testmethoden für Wasser, das in analytischen Labors verwendet wird

ISO 9227-2017 Korrosionsprüfung – Korrosivität in künstlicher Atmosphäre

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

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 Salzsprühkorrosion bezeichnet den Massenverlust oder die Oberflächenschädigung metallischer Werkstoffe, die durch eine elektrochemische Reaktion in einer zerstäubten, Natriumchlorid enthaltenden Umgebung verursacht wird.

3.2 Das Verhältnis der Massendifferenz der Probe vor und nach dem Gewichtsverlusttest zur Oberfläche, ausgedrückt in mg/cm^2 , gibt die Korrosionsbeständigkeit wieder.

3.3 Die Oxide, Salze oder anderen Verbindungen, die während des Korrosionsprodukttests auf der Oberfläche der Probe entstehen.

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

4.1.1 Probenmaterial: Metallische Materialien, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Stahl, Aluminiumlegierungen und Hartlegierungen.

4.1.2 Probengröße: $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ oder wie vereinbart. 4.1.3 Anzahl der Proben: Jede Testgruppe muss mindestens dreimal wiederholt werden.

4.2 Probenverarbeitung

4.2.1 Oberflächenbehandlung: Die Oberfläche der Probe wird mechanisch poliert, mit einer Rauheit von $R_a \leq 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Reinigung: Ultraschallreinigung mit wasserfreiem Ethanol für $5 \text{ Minuten} \pm 0,5 \text{ Minuten}$, Wiegen nach dem Trocknen, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.2.3 Ausgangszustand: Sicherstellen, dass die Probe frei von Ölflecken, Rost oder Oxidschicht ist.

5 Prüfmethoden

5.1 Prüfmittel

5.1.1 Salzsprühtestkammer: mit konstanter Temperaturregelung (Genauigkeit $\pm 1^\circ\text{C}$), Sprühvolumeneinstellung ($1-2 \text{ ml} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$) und gleichmäßiger Zerstäubungsfunktion.

5.1.2 Umgebungsbedingungen: Die Temperatur in der Testkammer beträgt $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ und die Luftfeuchtigkeit liegt nahe bei 100 %.

5.2 Prüfbedingungen

5.2.1 Lösung: $5 \% \pm 0,1 \% \text{ NaCl}$ -Lösung (Massenanteil), pH 6,5–7,2, hergestellt mit Wasser der Klasse 3 gemäß GB/T 6682.

5.2.2 Sprühvolumen: $1-2 \text{ ml} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$, Düsendruck $0,07-0,17 \text{ MPa}$.

5.2.3 Testzeit: kontinuierlicher Salzsprühnebel für $48 \text{ Stunden} \pm 2 \text{ Stunden}$ oder periodischer Test nach Vereinbarung. 5.2.4 Probenplatzierung: Neigungswinkel $15^\circ-30^\circ$, Kontakt zwischen den Proben vermeiden.

5.3 Testverfahren

5.3.1 Probe installieren: Befestigen Sie die Probe an der Halterung der Testkammer.

5.3.2 Test starten: Passen Sie Sprühvolumen und Temperatur an und notieren Sie die Startzeit. 5.3.3

Test beenden: Entnehmen Sie nach dem Test die Probe, spülen Sie sie ab, um Salz zu entfernen, reinigen Sie sie mit wasserfreiem Ethanol und wiegen Sie sie nach dem Trocknen.

6 Datenverarbeitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Gewichtsverlustrate

6.1.1 Berechnungsformel:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

Dabei ist m_0 die Masse vor dem Test (mg), m_1 die Masse nach dem Test (mg) und A die Oberfläche der Probe (cm^2).

6.1.2 Ergebnisgenauigkeit: $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Mittelwert aus 3 Messungen.

6.2 Beobachtung von Korrosionsprodukten

6.2.1 Verwenden Sie ein optisches Mikroskop (Auflösung $\leq 0,1 \mu\text{m}$) oder ein Rasterelektronenmikroskop (REM), um die Morphologie der Korrosionsprodukte zu beobachten.

6.2.2 Zeichnen Sie die Tiefe (Genauigkeit $\pm 0,5 \mu\text{m}$) und Verteilungsdichte der Korrosionslöcher auf und führen Sie bei Bedarf eine energiedispersive Spektrometrie (EDS) durch.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (wie Temperatur, Zeit, Sprühvolumen usw.).

Testergebnisse (Gewichtsverlustrate, Korrosionslochtiefe usw.) und Unsicherheiten.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Beispiel für die Probenvorbereitung

A.1 Probenschneiden: Diamantschleifscheibe verwenden, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Polieren: SiC- Schleifpapier (Körnung Nr. 800–1200) verwenden und abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) polieren.

A.3 Reinigen: Ultraschallreinigung für 5 Min. $\pm 0,5 \text{ Min.}$, nach dem Trocknen wiegen.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 45# Stahl: Gewichtsverlustrate $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Korrosionslochtiefe $10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

B.2 WC10 Ni: Gewichtsverlustrate $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Korrosionslochtiefe $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

veranschaulichen

Fragen, die in dieser Norm nicht behandelt werden, können durch Bezugnahme auf einschlägige internationale Normen (wie ISO 9227) oder durch Konsultation des technischen Ausschusses geklärt werden.

Diese Norm wurde am 18. Juni 2008 von der National Standardization Administration herausgegeben und tritt am 1. Oktober 2008 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

Anhang:

Nationaler Standard der Volksrepublik China

GB/T 3850-2015

**Allgemeine Richtlinien für Korrosionsprüfungen von Metallen und
Legierungen**

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 3850-2002 „Allgemeine Richtlinien für Korrosionsprüfungen von Metallen und Legierungen“.

Im Vergleich zu GB/T 3850-2002 ergeben sich folgende technische Änderungen:

Die Umweltklassifizierung von Korrosionstests wurde aktualisiert und komplexe Umgebungen mit mehreren Faktoren hinzugefügt (siehe 4.2).

Die Anforderungen an die Probenvorbereitung wurden verfeinert und es wurden die Aspekte Oberflächenreinheit und Eigenspannungskontrolle hinzugefügt (siehe 5.2).

Die Formel zur Berechnung der Korrosionsrate wurde geändert und die Definitionen der Perforationszeit und der elektrochemischen Methode wurden hinzugefügt (siehe 6.2).

Anforderungen für die Testunsicherheitsanalyse hinzugefügt (siehe 6.3).

Diese Norm wird vom Nationalen Technischen Komitee für Korrosions- und Schutznormung (SAC/TC 156) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Institut für Metallforschung der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, Allgemeines Eisen- und Stahlforschungsinstitut der Tsinghua-Universität. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Zhang Wei, Li Na und Wang Qiang. Diese Norm tritt am 1. Oktober 2015 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die allgemeinen Richtlinien für Korrosionsprüfungen an Metallen und Legierungen fest, einschließlich Prüfzielen, Umgebungsbedingungen, Probenvorbereitung, Prüfmethoden, Datenverarbeitung und Berichtspflichten. Sie ist anwendbar auf die Leistungsbewertung verschiedener Metallwerkstoffe (wie Stahl, Aluminium, Magnesium, Hartmetall usw.) und deren Beschichtungen in natürlichen oder künstlichen Korrosionsumgebungen und kann als Leitfaden für spezifische Korrosionsprüfmethoden verwendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16545-2008 Salzsprühkorrosionstestverfahren für Metallmaterialien

GB/T 4340.1-2009 Prüfverfahren zur Mikrohärteprüfung metallischer Werkstoffe

ISO 8044:2015 Korrosion – Begriffe und Definitionen

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 (bezogen auf ISO 8044:2015):

3.1 Korrosion Ein spontaner Prozess, bei dem ein Metall oder eine Legierung unter Umwelteinwirkung eine chemische oder elektrochemische Reaktion durchläuft, die zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften oder des Aussehens führt. 3.2 Korrosionsrate Die Rate des Materialmasseverlusts oder der Materialdickenreduzierung pro Zeiteinheit in $\text{g}/(\text{m}^2 \text{h})$, mm/a oder mpy (mil pro Jahr).

3.3 Gewichtsverlustrate Das Verhältnis der Massendifferenz der Probe vor und nach der Prüfung zur Oberfläche in mg/cm^2 . 3.4

Perforationszeit Die Zeit in h, die die Probe zum Eindringen in eine bestimmte korrosive Umgebung benötigt.

4. Testzweck und -umgebung

4.1 Zweck der Prüfung

4.1.1 Bewerten Sie die Korrosionsbeständigkeit von Metallen und Legierungen in bestimmten Umgebungen.

4.1.2 Vergleichen Sie die Korrosionsbeständigkeit verschiedener Materialien oder Behandlungsverfahren. 4.1.3 Stellen Sie Datenunterstützung für die Materialauswahl und das Schutzdesign bereit.

4.2 Umgebungstyp

4.2.1 Natürliche Umgebung: Atmosphäre, Boden, Meerwasser.

4.2.2 Künstliche Umgebung: Salznebel, Säurelösung, feuchte Hitze. 4.2.3 Komplexe Umgebung mit mehreren Faktoren: Industriatmosphäre mit SO_2 und Cl^- oder Umgebung mit Temperatur- und Feuchtigkeitszyklen.

5 Experimentelle Vorbereitung

5.1 Untersuchungsmaterial

5.1.1 Probenmaterialien: Metalle und Legierungen, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Stahl, Aluminium, Magnesium und Hartlegierungen.

5.1.2 Probengröße: $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ oder wie vereinbart. 5.1.3 Anzahl der Proben: Jede Testgruppe muss mindestens dreimal wiederholt werden.

5.2 Probenverarbeitung

5.2.1 Oberflächenbehandlung: Mechanisches Polieren oder Schleifen mit Sandpapier, Rauheit $R_a \leq 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Eigenspannung $\leq 50 \text{ MPa}$.

5.2.2 Reinigung: Ultraschallreinigung mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton für $5 \text{ Minuten} \pm 0,5 \text{ Minuten}$, nach dem Trocknen wiegen, Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$. 5.2.3 Ausgangszustand: Notieren Sie den Oberflächenzustand (wie Beschichtungsdicke, Finish) und den Spannungszustand.

6 Experimentelle Methoden und Datenverarbeitung

6.1 Prüfmethoden

6.1.1 Wählen Sie eine geeignete Umgebung und Testmethode, beispielsweise Eintauchen, Salzsprühnebel oder elektrochemischen Test.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.2 Testbedingungen: Temperatur $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (oder wie vereinbart), Zeit 24–168 Stunden ± 1 Stunde.

6.1.3 Ausrüstung: Wasserbad mit konstanter Temperatur, Salzsprühbox oder elektrochemische Arbeitsstation.

6.2 Datenverarbeitung

6.2.1 Berechnung der Gewichtsverlustrate:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中, m_0 为试验前质量 (mg), m_1 为试验后质量 (mg), A 为试样表面面积 (cm^2), 结果单位为 mg/cm^2 , 精度 $\pm 0.01\text{ mg}/\text{cm}^2$.

6.2.2 Berechnung der Korrosionsrate:

Massenverlustmethode:

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

单位 mm/a, 其中 ρ 为密度 (g/cm^3), t 为时间 (h).

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h.
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm^2), 精度 $\pm 10^{-7}\text{ A}/\text{cm}^2$.

6.2.3

Das Ergebnis ist der Durchschnitt aus drei Messungen.

6.3 Unsicherheitsanalyse

6.3.1 Bewerten Sie die Testbedingungen (z. B. Temperatur, Zeit) und die Fehler der Messwerkzeuge.

6.3.2 Vertrauensniveau 95 %, Unsicherheit $\leq \pm 5\%$.

6.4 Beobachtung der Korrosionsmorphologie

Sie ein optisches Mikroskop (Auflösung $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) oder SEM, um Korrosionsprodukte und Löcher zu beobachten.

6.4.2 Messen Sie die Tiefe von Korrosionslöchern mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Materialzusammensetzung der Probe, Herstellungsverfahren und Oberflächenzustand.

Testumgebung und -bedingungen (wie Temperatur, Zeit, Medium).

Testergebnisse (Gewichtsverlustrate, Korrosionsrate, Lochtiefe usw.) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Beispiel für die Probenvorbereitung

A.1 Probenschneiden: Diamantschleifscheibe verwenden, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

A.2 Polieren: SiC- Schleifpapier (Körnung Nr. 800–1200) verwenden und abschließend mit Diamantsuspension (Körnung $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) polieren.

A.3 Reinigen: Ultraschallreinigung für 5 Min. $\pm 0,5\text{ Min.}$, nach dem Trocknen wiegen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 Kohlenstoffstahl: 24-Stunden-Gewichtsverlustrate $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Korrosionsrate $0,2 \text{ mm/a}$.

B.2 WC10 Ni: 168 Stunden-Gewichtsverlustrate $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, Korrosionsrate $0,01 \text{ mm/a}$.

veranschaulichen

Diese Norm dient als allgemeine Richtlinie. Spezifische Prüfmethoden sollten sich an einschlägigen Normen (wie GB/T 16545, ISO 9227) orientieren. Unerledigte Fragen können durch Rücksprache mit dem Technischen Ausschuss geklärt werden.

Diese Norm wurde am 18. Juni 2015 von der Nationalen Normungsbehörde herausgegeben und am 1. Oktober 2015 umgesetzt.

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:

Internationale Norm

ISO 8044:2015 Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundlegende Begriffe und Definitionen
Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundlegende Begriffe und Definitionen

Vorwort

ISO 8044:2015 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Korrosion von Metallen und Legierungen – Grundlegende Begriffe und Definitionen“. Die Norm wurde am 15. November 2015 veröffentlicht und ersetzt die vorherige Version ISO 8044:2010. ISO 8044 wurde vom ISO/TC 156 (Technischer Ausschuss für Korrosion und Schutz) entwickelt, um einen einheitlichen Rahmen von Begriffen und Definitionen für die Korrosionswissenschaft und -technik zu schaffen, der für die Untersuchung und Prüfung der Korrosion von Metallen und Legierungen in verschiedenen Umgebungen anwendbar ist. Diese Norm umfasst 47 Seiten mit Inhalten zu Begriffen im Zusammenhang mit Korrosionsprozessen, Messmethoden und Schutztechnologien.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt grundlegende Begriffe und Definitionen im Bereich der Korrosion von Metallen und Legierungen fest und gilt für:

Beschreibung und Klassifizierung von Korrosionsprozessen;
Standardisierung von Korrosionstestmethoden und -ergebnissen;
Forschung und Anwendung der Korrosionsschutztechnologie.

Diese Norm gilt für die Korrosionsbewertung in Laboren, der Industrie und der natürlichen Umgebung, ausgenommen die Korrosion nichtmetallischer Werkstoffe.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 9223:2012 Korrosion in aggressiven Atmosphären – Klassifizierung

ISO 10289:1999 Korrosionsprüfungen an Stahl und Gusseisen – Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsrate

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm definiert über 150 korrosionsbezogene Begriffe und deckt dabei Korrosionsprozesse, Umgebungen, Messungen und Schutz ab. Im Folgenden sind einige der wichtigsten Begriffe und Definitionen aufgeführt (eine vollständige Liste finden Sie im Normtext):

3.1 Korrosion

Ein spontaner Prozess, bei dem Metalle oder Legierungen unter Umwelteinflüssen chemische oder elektrochemische Reaktionen durchlaufen, die zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften oder des Aussehens führen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Gleichmäßige Korrosion

Eine Form der Korrosion, bei der die Oberfläche eines Materials als Ganzes gleichmäßig beschädigt wird und die Korrosionsrate im Wesentlichen auf der gesamten Oberfläche gleich ist.

3.3 Lokale Korrosion

Korrosion, die nur an bestimmten Stellen der Werkstoffoberfläche auftritt, wie beispielsweise Lochkorrosion, Spaltkorrosion oder interkristalline Korrosion.

3.4 Lochkorrosion

Eine Form lokaler Korrosion, die zur Bildung kleiner, tiefer Löcher in der Oberfläche führt.

3.5 Korrosionsrate

Die Rate des Materialmassenverlusts oder der Dickenreduzierung pro Zeiteinheit, üblicherweise ausgedrückt in $g/(m^2 \cdot h)$, mm/a oder mpy (mil pro Jahr).

3.6 Elektrochemische Korrosion

Korrosion entsteht durch elektrochemische Reaktionen wie anodische Auflösung und kathodische Reduktion, wobei normalerweise ein Elektrolyt beteiligt ist.

3.7 Gewichtsverlust

Zur Quantifizierung des Korrosionsgrades dient das Verhältnis der Materialmassendifferenz vor und nach der Prüfung zur Oberfläche, ausgedrückt in g/m^2 .

3.8 Korrosionspotential (E_{korr})

Das Gleichgewichtspotential eines Metalls oder einer Legierung in einem Elektrolyten ohne angelegten Strom, ausgedrückt in V (relativ zu einer Referenzelektrode).

3.9 Korrosionsstromdichte (i_{korr})

Zur Abschätzung der Korrosionsrate wird die Stromdichte pro Flächeneinheit durch die Korrosionsreaktion, gemessen in A/cm^2 , verwendet.

3.10 Passivierung

Bildung einer schützenden Oxidschicht (wie NiO , Cr_2O_3) auf der Metalloberfläche, um die Korrosionsrate zu verringern.

3.11 Schutzbeschichtung

Schutzschicht, die die Korrosion durch Beschichtungsmaterialien (wie TiN , Al_2O_3) .

3.12 Salzsprühnebelprüfung

Die Methode zur Korrosionsprüfung in einer künstlichen, Natriumchlorid enthaltenden Atmosphäre basiert auf ISO 9227.

4 Klassifizierung und Anwendung

4.1 Klassifizierung der Korrosionsarten

Durch die Umgebung: atmosphärische Korrosion, Wasserkorrosion, Bodenkorrosion.

Nach Morphologie: gleichmäßige Korrosion, lokale Korrosion und Spannungsrisskorrosion.

Nach Mechanismus: chemische Korrosion, elektrochemische Korrosion.

4.2 Anwendungsgebiete

Bewertung der Materialeistung (z. B. Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall in Meeresumgebungen).

Entwicklung von Korrosionsschutztechnologien (z. B. Beschichtungsdesign).

Die Terminologie der Standardtestmethoden ist vereinheitlicht (wie GB/T 16545 und ISO 9227).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 Grundsätze der Terminologieverwendung

Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, sollten die Begriffe mit den Definitionen übereinstimmen. Standarddefinitionen werden bevorzugt und Sonderfälle sollten beachtet werden.

Bei der Darstellung der Ergebnisse sollten die Einheiten und die Genauigkeit dem SI-System entsprechen (z. B. i_{corr} -Genauigkeit $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

6 Anhang (Informativ)

Anhang A: Beispiel einer Terminologianwendung

Beispiel 1: Im Salzsprühtest beträgt die Gewichtsverlustrate von WC10Ni 0,04 g/m² und i_{corr} beträgt 10^{-6} A/cm^2 , was einer lokalen Korrosion entspricht.

Beispiel 2: Verzinkter Stahl korrodiert in einer heißen und feuchten Umgebung gleichmäßig mit einer Korrosionsrate von 0,1 mm/a.

Anhang B: Terminologievergleichstabelle

Stellen Sie eine Englisch-Chinesisch-Übersetzung bereit, um internationale Standards sicherzustellen.

veranschaulichen

ISO 8044:2015 ersetzt ISO 8044:2010, fügt mehr als 20 neue Begriffe hinzu und aktualisiert einige Definitionen, um den neuesten Forschungsergebnissen Rechnung zu tragen.

Diese Norm bietet in Verbindung mit ISO 9223 (Klassifizierung korrosiver Atmosphären) und ISO 10289 (Bestimmung der Korrosionsraten) umfassende Leitlinien für Korrosionsprüfungen.

Die Wirksamkeit dieses Standards wurde am 15. November 2020 bestätigt und es wird erwartet, dass er in Zukunft auf der Grundlage neuer Technologien aktualisiert wird.

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:

Internationale Norm

**ISO 9223:2012 Korrosion von Metallen und Legierungen – Korrosivität von Atmosphären –
Klassifizierung**

Vorwort

ISO 9223:2012 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm mit dem Titel „Korrosion von Metallen und Legierungen – Korrosion in korrosiven Atmosphären – Klassifizierung“. Die Norm wurde am 15. April 2012 veröffentlicht und ersetzt die vorherige Version ISO 9223:1992. ISO 9223 wurde vom ISO/TC 156 (Technischer Ausschuss für Korrosion und Korrosionsschutz) entwickelt, um die Korrosivität atmosphärischer Umgebungen zu klassifizieren und Leitlinien zum Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe in verschiedenen atmosphärischen Umgebungen bereitzustellen. Die Norm umfasst 32 Seiten und definiert die Korrosivitätsstufen in Kombination mit Luftschadstoffkonzentrationen und Umweltparametern.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierungsmethode für die Korrosivität atmosphärischer Umgebungen fest und ist anwendbar auf:

Bewerten Sie das Korrosionsverhalten von Metallmaterialien (wie Stahl, Aluminium, Zink, Hartlegierungen usw.) in der Atmosphäre.

Bestimmen Sie Faktoren, die korrosive Atmosphären beeinflussen, wie etwa Chloridablagerungsraten und Schwefeldioxidkonzentrationen.

Bietet Referenzen für Korrosionsprüfungen (z. B. Salzsprühnebelprüfungen) und Schutzdesigns.

Diese Norm gilt nicht für Innenräume oder nicht atmosphärische Korrosion (z. B. Wassereintauchen oder Bodenkorrosion).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 8044:2015 Korrosion – Begriffe und Definitionen

ISO 9224:2012 Korrosion in aggressiver Atmosphäre – Richtwerte und allgemeine Informationen

ISO 9226:2012 Korrosion in korrosiven Atmosphären – Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit und des Korrosivitätsgrades

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen (Referenz in ISO 8044:2015):

3.1 Korrosive Atmosphäre Eine atmosphärische Umgebung, die korrosive Stoffe (z. B. Chloride, Schwefeldioxid) enthält, die Korrosion von metallischen Werkstoffen verursachen.

3.2 Chloridablagerungsrate Die Menge an Chlorid (z. B. NaCl), die pro Flächeneinheit und Zeiteinheit in der Atmosphäre abgelagert wird, ausgedrückt in $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

3.3 Schwefeldioxidablagerungsrate Die Menge an Schwefeldioxid (

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SO₂), die pro Flächeneinheit und Zeiteinheit in der Atmosphäre abgelagert wird, ausgedrückt in mg/(m²·d).

3.4 Korrosivitätsgrade basieren auf der jährlichen Korrosionsrate von metallischen Werkstoffen in einer bestimmten atmosphärischen Umgebung und werden in die Grade C1 bis C5 unterteilt.

4 Korrosivitätsklassifizierung

4.1 Klassifizierungsgrundlagen

Der Korrosivitätsgrad wird anhand der jährlichen Korrosionsrate (in µm/a) des metallischen Materials (z. B. Stahl, Zink, Kupfer) in Kombination mit der Chlorid- und Schwefeldioxidablagerungsrate bestimmt.

Jährliche Korrosionsrate : Bestimmt durch Expositionstest oder beschleunigten Test (z. B. ISO 9226).

Umweltparameter : Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Schadstoffkonzentration.

4.2 Korrosivitätsstufe

Grad	Jährliche Korrosionsrate von Stahl (µm/a)	Jährliche Korrosionsrate von Zink (µm/a)	Jährliche Korrosionsrate von Kupfer (µm/a)	Typische Umgebung
C1	≤ 1,3	≤ 0,1	≤ 0,1	Innenbereich, sehr geringe Korrosion
C2	> 1,3 - 25	> 0,1 - 2	> 0,1 - 0,9	Ländlich, geringe Korrosion
C3	> 25 - 50	> 2 - 4	> 0,9 - 2,0	Städtisch, mäßig ätzend
C4	> 50 - 80	> 4 - 7	> 2,0 - 4,0	Industrie/Küste, hochkorrosiv
C5-I	> 80 - 200	> 7 - 15	> 4,0 - 8,0	Industriell, extrem korrosiv
C5-M	> 80 - 200	> 7 - 15	> 4,0 - 8,0	Ozean, extrem ätzend

4.3 Umweltparameter

Chlorid -Sedimentationsrate : C1 ≤ 3 mg/(m²·d), C2 ≤ 60 mg/(m²·d), C3 ≤ 300 mg/(m²·d), C4/C5 > 300 mg/(m²·d).

Schwefeldioxid- Ablagerungsrate : C1 ≤ 0,1 mg/(m²·d), C2 ≤ 4 mg/(m²·d), C3 ≤ 12 mg/(m²·d), C4/C5 > 12 mg/(m²·d).

Zeitliche Luftfeuchtigkeit : Eine durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit von > 80 % im Jahr gilt als hoher Korrosionsfaktor.

5 Klassifizierungsmethode

5.1 Datenerhebung

Die Korrosionsraten werden durch Feldexpositionstests (mehr als 1 Jahr) oder beschleunigte Tests (wie etwa Salzsprühtest ISO 9227) ermittelt.

Verwenden Sie Geräte zur Atmosphärenüberwachung, um die Ablagerungsraten von Chlorid und SO₂ zu messen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Füllstandsbestimmung

Vergleichen Sie die gemessene Korrosionsrate mit dem Standardwert in Tabelle 4.2 und bestimmen Sie die entsprechende Klasse.

Wenn die Daten für mehrere Metalle inkonsistent sind, gilt die höchste Korrosivitätsstufe.

5.3 Unsicherheit

Die Messunsicherheit der Korrosionsrate beträgt $\leq \pm 10\%$, was durch eine statistische Analyse mit einem Konfidenzniveau von 95 % begleitet werden muss.

6 Anwendung und Anleitung

6.1 Materialauswahl

Klasse C1/C2: Einfacher Kohlenstoffstahl oder verzinkter Stahl.

Klasse C3: Verwitterungsstahl oder Aluminiumlegierung.

Gütekategorie C4/C5: Edelstahl, Hartmetall (z. B. WC10Ni) oder beschichtete Werkstoffe.

6.2 Schutzdesign

Empfohlene Schichtdicke: $C3 \geq 10 \mu m$, $C5 \geq 20 \mu m$.

Erwägen Sie anodischen Schutz oder Opferanoden in Umgebungen der Klasse C5-M.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Beschreibung der Testumgebung (Standort, Schadstoffkonzentrationen).

Einwirkzeit und Korrosionsrate (in $\mu m/a$).

Festgelegte atmosphärische Korrosivitätsklasse (C1-C5).

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

Anhang A (Informativer Anhang)

Beispieldaten

A.1 Ländliche Umgebung: Stahlkorrosionsrate $5 \mu m/a$, Zink $0,5 \mu m/a$, Chlorid $10 mg/(m^2 \cdot d)$, SO_2 $1 mg/(m^2 \cdot d)$, Klasse C2.

A.2 Küstenumgebung: Stahlkorrosionsrate $100 \mu m/a$, Zink $10 \mu m/a$, Chlorid $500 mg/(m^2 \cdot d)$, SO_2 $5 mg/(m^2 \cdot d)$, Klasse C5-M.

veranschaulichen

ISO 9223:2012 bietet eine quantitative Grundlage für die Klassifizierung der atmosphärischen Korrosivität und wird in Verbindung mit ISO 9224 (Richtwerte) und ISO 9226 (Prüfmethoden) verwendet.

Die Wirksamkeit dieses Standards wurde am 15. April 2022 bestätigt und er kann künftig auf Grundlage von Daten zum Klimawandel aktualisiert werden.

besondere Umgebungen (wie etwa H_2S -haltige Atmosphären) sind andere Normen oder zusätzliche Prüfungen erforderlich.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 38512015

Nationaler Standard der Volksrepublik China

GB/T 3851-2015

**Methoden zur Bestimmung der Mikrostruktur von
Hartmetallen**

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 3851-2006 „Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 3851-2006 sind die wichtigsten technischen Änderungen folgende:

Die Anforderung an die Mikroskopauflösung wurde von 0,2 µm auf 0,1 µm aktualisiert (siehe 5.1).

Die Methode zur Korngrößenmessung wurde modifiziert und um eine Technologie zur automatischen Bildanalyse erweitert (siehe 6.2).

Die quantitativen Anforderungen an Porosität und Phasenverteilung wurden verfeinert und eine Unsicherheitsanalyse hinzugefügt (siehe 6.3).

Ebenheitskontrolle für die Oberflächenvorbereitung hinzugefügt, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, University of Science and Technology Beijing, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Diese Norm tritt am 1. Oktober 2015 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die allgemeine Methode zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall fest, einschließlich Probenvorbereitung, mikroskopischer Beobachtung, quantitativer Analyse von Korngröße, Porosität und Phasenverteilung. Sie ist anwendbar auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung eingesetzt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 4340.1-2009 Prüfverfahren zur Mikrohärteprüfung metallischer Werkstoffe

ISO 4499-1:2008 Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetallen – Allgemeine Richtlinien

3 Begriffe und Definitionen

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

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Korngröße

Der durchschnittliche Durchmesser der WC-Phase in Hartmetall in μm , der die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur widerspiegelt.

3.2 Porosität Der Prozentsatz der Poren pro Volumeneinheit der Probe in %, der die Dichte des Materials beeinflusst. 3.3 Phasenverteilung Die räumliche Gleichmäßigkeit der Verteilung der Bindephase (Co oder Ni) und der Hartphase (WC).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

4.1.1 Probenmaterial: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

4.1.2 Probengröße: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ oder nach Vereinbarung. 4.1.3 Probenmenge: 3–5 Stück pro Charge.

4.2 Probenvorbereitung

4.2.1 Schneiden: Verwenden Sie eine Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

4.2.2 Polieren: Verwenden Sie SiC- Schleifpapier (Körnung Nr. 800 – Nr. 2000) und polieren Sie abschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), Oberflächenrauheit $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

4.2.3 Ätzen: Zur Verstärkung des Kontrasteffekts 5–10 Sekunden lang mit 5 %iger Natronlauge (NaOH) oder Tinte ätzen. 4.2.4 Reinigung: 3 Minuten $\pm 0,5$ Minuten lang mit Ultraschall in wasserfreiem Ethanol reinigen, trocknen und beiseite legen.

5 Prüfmethoden

5.1 Mikroskopische Beobachtung

5.1.1 Ausrüstung: optisches Mikroskop (Auflösung $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) oder Rasterelektronenmikroskop (REM, Auflösung $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$). 5.1.2

Vergrößerung: 100x – 1000x, angepasst an das Beobachtungsziel. 5.1.3 Beleuchtung: Verwenden Sie Hellfeld- oder Polarisationsbeleuchtung, bei Bedarf kombiniert mit differentiellem Interferenzkontrast.

5.2 Messobjekte

5.2.1 Korngröße: Messen Sie den durchschnittlichen Durchmesser der WC-Phase.

5.2.2 Porosität: Zählen Sie die Anzahl und Größe der Poren pro Flächeneinheit. 5.2.3 Phasenverteilung: Bewerten Sie die Gleichmäßigkeit der Co- oder Ni-Phase.

6 Datenverarbeitung

6.1 Korngröße

6.1.1 Messmethode:

Manuelle Messung: 50–100 Körner entlang einer geraden Linie abfangen und den Durchschnittswert berechnen.

Automatische Bildanalyse: Verwenden Sie Software (wie ImageJ), um mehr als 500 Körner zu verarbeiten und zu zählen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.2 Ergebnisdarstellung: Durchschnittliche Korngröße (μm), Genauigkeit $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosität

6.2.1 Messmethode:

Zählen Sie die Poren unter einem Lichtmikroskop und berechnen Sie mit der Flächenmethode:

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

SEM

kombiniert mit EDS zur Überprüfung der Poreneigenschaften.

6.2.2 Ergebnisangabe: Prozentsatz (%), Genauigkeit $\pm 0,1 \%$.

6.3 Phasenverteilung

6.3.1 Messmethode:

Bildanalyse: Berechnen Sie den Flächenanteil und die Verteilungsabweichung der Co- oder Ni-Phase.

Linienabschnittsmethode: Statistisches Phasenverhältnis entlang mehrerer Geraden, Abweichung $\leq 5 \%$.

6.3.2 Ergebnisausdruck: Flächenanteil (%), qualitative Beschreibung der Gleichmäßigkeit.

6.4 Unsicherheitsanalyse

6.4.1 Bewerten Sie die Genauigkeit des Messwerkzeugs und die Repräsentativität der Stichprobe.

6.4.2 Vertrauensniveau 95 %, Unsicherheit $\leq \pm 5 \%$.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Mikroskopische Beobachtungsbedingungen (z. B. Vergrößerung, Beleuchtungsmethode).

Messergebnisse (Korngröße, Porosität, Phasenverteilung) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Mikroskopkalibrierung

A.1 Verwenden Sie eine Standardgitterprobe, um die Mikroskopauflösung mit einem Fehler von $\leq 0,05 \mu\text{m}$ zu kalibrieren .

A.2 Kalibrieren Sie das Beleuchtungssystem regelmäßig, um sicherzustellen, dass die Helligkeitsgleichmäßigkeit $\leq 5 \%$ beträgt.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 WC10Co: Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,1 \% \pm 0,1 \%$, Co-Phasenverteilung ist gleichmäßig.

B.2 WC8 Ni: Korngröße $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Porosität $0,3 \% \pm 0,1 \%$, Abweichung der Ni-Phasenverteilung 3% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

veranschaulichen

Diese Norm dient als Leitfaden zur Bestimmung der Mikrostruktur. Die spezifische Anwendung sollte mit den technischen Produktanforderungen kombiniert werden. Unerledigte Fragen können auf ISO 4499-1 verwiesen oder durch Rücksprache mit dem technischen Ausschuss geklärt werden. Diese Norm wurde am 18. Juni 2015 von der National Standardization Administration herausgegeben und am 1. Oktober 2015 umgesetzt.

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:

Nationaler Standard der Volksrepublik China
GB/T 7997-2017
Methoden zum Testen der Eigenschaften von
Hartmetallen

Vorwort

Dieser Standard wurde gemäß den Bestimmungen von GB/T 1.1-2009 „Leitfaden für die Standardisierungsarbeit Teil 1: Aufbau und Schreibregeln von Standards“ erstellt.

Diese Norm ersetzt GB/T 7997-2005 „Prüfverfahren für Eigenschaften von Hartmetall“.

Im Vergleich zu GB/T 7997-2005 ergeben sich folgende wesentliche technische Änderungen:

Die Härteprüfmethode wurde aktualisiert und die Hochtemperatur-Vickers-Härteprüfung wurde hinzugefügt (siehe 5.2).

Der Lastbereich für die Biegefestigkeitsprüfung wurde von 500–1000 N auf $100\text{--}2000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ geändert (siehe 5.3);

Die Formel für den Bruchzähigkeitstest wurde verfeinert und die Methode des einkantigen gekerbten Balkens wurde hinzugefügt (siehe 5.4).

Die Anforderung an die Anzahl der Zyklen des Thermoschocktests wurde von 100 auf 500 ± 50 Mal erhöht (siehe 5.5).

Die Anforderung an die Oberflächenrauheit des Prüflings wird erhöht: $Ra \leq 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ (siehe 4.2).

Diese Norm wird vom National Cemented Carbide Standardization Technical Committee (SAC/TC 357) vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: Cemented Carbide Research Institute of China Machine Tool Corporation, Beijing University of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University.

Die Hauptautoren dieser Norm sind: Chen Wei, Li Fang und Wang Jun. Diese Norm tritt am 01.10.2017 in Kraft.

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das allgemeine Verfahren zur Prüfung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall fest, einschließlich der Prüfung von Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit und Thermoschockbeständigkeit. Sie ist auf Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase anwendbar und kann zur Qualitätskontrolle, Leistungsbewertung sowie in Forschung und Entwicklung verwendet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

GB/T 16556-2014 Allgemeine Richtlinien für die mikroskopische Untersuchung metallischer Werkstoffe

GB/T 3850-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

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

ISO 3327:2009 Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

- 3.1 Härte Die Fähigkeit von Hartmetall, Oberflächeneindrücken oder Verschleiß zu widerstehen, üblicherweise ausgedrückt in Vickershärte (HV). 3.2 Biegefestigkeit Die Fähigkeit einer Probe, einem Bruch unter Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegebelastung zu widerstehen, ausgedrückt in MPa. 3.3 Bruchzähigkeit Die Fähigkeit eines Materials, Risswachstum zu widerstehen, ausgedrückt in $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. 3.4 Wärmeschockbeständigkeit Die Fähigkeit einer Probe, der Rissbildung bei Hoch- und Niedrigtemperaturzyklen zu widerstehen, ausgedrückt in Risslänge (mm).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

4.1.1 Probenmaterial: Hartmetall auf WC-Basis, mit Co oder Ni als Bindephase.

4.1.2 Probengröße:

Härteprüfung: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Biegefestigkeit: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Bruchzähigkeit: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Temperaturwechselbeständigkeit: $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

4.1.3 Anzahl der Proben: Jede Testgruppe muss 5 Mal wiederholt werden.

4.2 Probenverarbeitung

4.2.1 Schneiden: Verwenden Sie eine Diamantschleifscheibe, Wasser als Kühlmittel, Schnittgeschwindigkeit $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

4.2.2 Polieren: Verwenden Sie SiC - Schleifpapier (Körnung Nr. 800 – Nr. 2000) und polieren Sie abschließend mit einer Diamantsuspension (Körnung $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), Oberflächenrauheit $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

4.2.3 Reinigung: Verwenden Sie wasserfreies Ethanol für die Ultraschallreinigung für 5 Minuten $\pm$ 0,5 Minuten, wiegen Sie nach dem Trocknen, Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Prüfmethoden

5.1 Allgemeine Anforderungen

5.1.1 Umgebungsbedingungen: Temperatur $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65\%$.

5.1.2 Gerätekalibrierung: Alle Testgeräte müssen regelmäßig mit einem Fehler von $\leq \pm 1\%$ kalibriert werden.

5.2 Härteprüfung

5.2.1 Methode: Vickers-Härteprüfung (gemäß GB/T 4340.1).

5.2.2 Bedingungen:

Raumtemperatur: Belastung $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, 10–15 Sekunden halten.

Hohe Temperatur: $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Belastung $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, Halten für 15 Minuten $\pm$ 1 Minute.

5.2.3 Ergebnis: Mittelwert aus 5 Messpunkten bilden, Einheit HV, Genauigkeit ± 30 .

5.3 Biegefestigkeitsprüfung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3.1 Verfahren: Dreipunktbiegeverfahren (nach ISO 3327).

5.3.2 Bedingungen:

Spannweite 30 mm ± 0,1 mm;

Belastung 100–2000 N ± 10 N, Belastungsgeschwindigkeit 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

5.3.3 Ergebnisse:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4

Bruchzähigkeitsprüfung

5.4.1 Verfahren: Einkanten-Kerbbalkenverfahren (SENB).

5.4.2 Bedingungen: Kerbtiefe 2 mm ± 0,1 mm, Spannweite 40 mm ± 0,1 mm, Last 500 N ± 5 N.

5.4.3 Ergebnisse:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), $P_{\max}$ 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Thermoschock-Leistungstest

5.5.1 Methode: Temperaturwechselmethode.

5.5.2 Bedingungen:

Auf 1000 °C ± 10 °C erhitzen, 15 Min. ± 1 Min. halten;

Abkühlen auf 25 °C ± 1 °C, 500-mal ± 50-mal zyklisch;

Die Heiz- und Kühlrate betrug 10 °C/s ± 1 °C/s.

5.5.3 Ergebnisse: Die Risslänge wurde mittels SEM mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm gemessen.

6 Datenverarbeitung

6.1 Alle Ergebnisse stellen den Durchschnitt aus 5 Messungen dar.

6.2 Den Ergebnissen liegt eine Unsicherheitsanalyse mit einem Konfidenzniveau von 95 % bei. 6.3 Notieren Sie abnormale Werte und erläutern Sie die Gründe.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Zusammensetzung und Herstellungsprozess des Probenmaterials.

Testbedingungen (z. B. Temperatur, Belastung, Zyklenzahl).

Prüfergebnisse (Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Risslänge) und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang A (Normativer Anhang)

Gerätekalibrierung

A.1 Kalibrierung des Härteprüfgeräts: Verwenden Sie einen Standardblock (HV 1000 ± 50), Fehler

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\leq \pm 10$.

A.2 Kalibrierung der Belastungsvorrichtung: Verwenden Sie ein Standardgewicht, Fehler $\leq \pm 1$ N.

Anhang B (Informativer Anhang)

Typische Datenreferenz

B.1 WC10Co:

Raumtemperaturhärte 1500 HV ± 30 ;

Hochwarmhärte 1300 HV ± 30 ;

Biegefestigkeit: 2500 MPa ± 5 MPa;

Bruchzähigkeit 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm 0,1$ MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,03 mm $\pm 0,01$ mm.

B.2 WC8 Ni:

Raumtemperaturhärte 1400 HV ± 30 ;

Hochwarmhärte 1200 HV ± 30 ;

Biegefestigkeit 2300 MPa ± 5 MPa;

Bruchzähigkeit 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm 0,1$ MPa $\cdot$ m^{1/2};

Thermoschockriss 0,04 mm $\pm 0,01$ mm.

veranschaulichen

Diese Norm dient als Leitfaden für Leistungstests. Die spezifische Anwendung sollte mit den technischen Produktanforderungen kombiniert werden. Unerledigte Fragen können an ISO 3327 verwiesen oder durch Rücksprache mit dem technischen Ausschuss geklärt werden.

Diese Norm wurde am 18. Juni 2017 von der National Standardization Administration herausgegeben und am 1. Oktober 2017 umgesetzt.

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:

Internationale Norm
ISO 6508 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell
Metallische Werkstoffe
— Rockwell-Härteprüfung

Überblick

ISO 6508 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) entwickelte Norm, die sich auf die Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe konzentriert. Die Norm ist in mehrere Teile gegliedert und beschreibt detailliert die Prüfmethoden, Kalibrierungsanforderungen und die Herstellung von Standardprüfkörpern zur Bewertung der Härte metallischer Werkstoffe (wie Stahl, Aluminium, Hartmetall usw.). Nachfolgend finden Sie eine Übersicht basierend auf der neuesten Version:

Die neueste Version : ISO 6508-1:2016 (veröffentlicht am 15. Oktober 2016, gültig bis 2021), andere Teile umfassen ISO 6508-2:2015 und ISO 6508-3:2015.

Technisches Komitee : ISO/TC 164/SC 3 (Unterkomitee für mechanische Prüfungen).

Anwendungsbereich : Anwendbar auf verschiedene Metallmaterialien, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Stahl, Gusseisen, Nichteisenmetalle und deren Legierungen, und wird häufig in der Qualitätskontrolle und der Bewertung der Materialeistung verwendet .

1 Geltungsbereich

ISO 6508-1 :2016 : Gibt die grundlegende Methode der Rockwell-Härteprüfung an, einschließlich Prüfverfahren, Geräteanforderungen und Ergebnisdarstellung für A, B, C und andere Bereiche.

ISO 6508-2 :2015 : beschreibt detailliert die Methoden und Kalibrierverfahren zur Validierung von Rockwell-Härteprüfmaschinen.

ISO 6508-3 :2015 : Gibt die Vorbereitung und Kalibrierung von Standardprüfblöcken an, um die Genauigkeit von Prüfmaschinen sicherzustellen.

Nicht geeignet für nichtmetallische Werkstoffe oder Mikrohärteprüfungen (wie Vickers- oder Knoop-Härte).

2 Normative Verweisungen

Für die Anwendung dieser Norm sind folgende Dokumente unabdingbar:

ISO 6507-1:2018 Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe – Teil 1: Prüfverfahren

Prüfmaschinen für die Zugprüfung metallischer Werkstoffe – Kraftmessteil

ISO 376:2011 Kalibrierung von Kraftnormalen für die Zugprüfung metallischer Werkstoffe

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen (Referenz in ISO 6507 und verwandten Normen):

3.1 Rockwellhärte Der Widerstand eines metallischen Werkstoffs gegen das Eindringen eines Eindringkörpers, ausgedrückt als Rockwellhärtewert (HR), abhängig von Bereich und Art des Eindringkörpers. 3.2 Vorlast

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

Die anfängliche Kraft, die auf die Probe ausgeübt wird, um den Kontakt zu stabilisieren, normalerweise 10 kgf (98,07 N).

3.3 Gesamtpfückraft Die Gesamtkraft der Vorlast plus der zusätzlichen Last, beispielsweise 60 kgf (588,4 N), 100 kgf (980,7 N) oder 150 kgf (1471 N).

3.4 Skala Der Härteprüfbereich, der durch die Kombination aus Eindringkörper und Last definiert wird, beispielsweise HRA (Diamantkegel, 60 kgf), HRB (1/16 Zoll Stahlkugel, 100 kgf), HRC (Diamantkegel, 150 kgf).

4 Prüfverfahren (ISO 6508-1:2016)

4.1 Ausrüstung

Härteprüfgerät : Rockwell - Härteprüfgerät gemäß ISO 6508-2, ausgestattet mit Diamantkegel (120° Scheitelwinkel) oder Stahlkugel-Eindringkörper (Durchmesser 1/16 Zoll, 1/8 Zoll usw.).

Last : Vorlast $10 \text{ kgf} \pm 0,1 \text{ kgf}$, Hauptlast je nach Bereich ausgewählt (60, 100 oder $150 \text{ kgf} \pm 0,5 \text{ kgf}$).

Umgebungsbedingungen : Temperatur $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $< 65 \%$.

4.2 Probenanforderungen

Oberflächenebenheit $\leq 0,01 \text{ mm}$, Rauheit $R_a \leq 0,8 \text{ }\mu\text{m}$.

Dicke: Die Mindestdicke hängt vom Messbereich ab (z. B. muss HRC $\geq 1,5 \text{ mm}$ sein).

Parallelitätsfehler $\leq 0,01 \text{ mm}$.

4.3 Testverfahren

Installieren Sie die Probe und achten Sie darauf, dass die Oberfläche sauber und ölfrei ist.

Vorspannung anwenden und 1–5 Sekunden lang halten.

Hauptlast auflegen und 2–8 Sekunden halten (je nach Härte des Materials anpassen).

Zum Vorspannen entladen und Härtewert ablesen.

Wiederholen Sie die Messung 3–5 Mal und bilden Sie den Durchschnittswert.

4.4 Ergebnisdarstellung

Der Härtewert wird in HR-Einheiten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5 \text{ HR}$ (HRA, HRC) oder $\pm 1 \text{ HR}$ (HRB) angegeben.

Der Bericht muss Angaben zu Reichweite, Belastung und Prüfbedingungen enthalten.

5 Verifizierung und Kalibrierung (ISO 6508-2:2015)

Überprüfungsmethode : Verwenden Sie einen Standardprüfblock (ISO 6508-3), um den Anzeigefehler des Härteprüfers mit einer zulässigen Abweichung von $\pm 1 \text{ HR}$ zu überprüfen.

Kalibrierzyklus : Einmal jährlich oder unmittelbar nach der Geräteeinstellung.

Geräteanforderungen : Kraftmessunsicherheit $\leq \pm 0,5 \%$, Tiefenmessgenauigkeit $\leq \pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$.

6 Standardprüfblöcke (ISO 6508-3:2015)

Vorbereitung : Das Material des Testblocks entspricht dem zu testenden Material und der Härtebereich umfasst HRA 20–88, HRB 20–100 und HRC 20–70.

Kalibrierung : Durch zertifiziertes Labor bestimmt, Unsicherheit $\leq \pm 0,5 \text{ HR}$.

Anwendung : Kalibrieren Sie den Härteprüfer vor der täglichen Prüfung und zeichnen Sie die Ergebnisse auf.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 Anwendungen

Materialbewertung : Wird zur Härteprüfung von Stahl (z. B. Kohlenstoffstahl, Werkzeugstahl), Aluminiumlegierungen und Hartmetall (z. B. WC-Co) verwendet.

Qualitätskontrolle : Stellen Sie sicher, dass die bearbeiteten Teile die Härteanforderungen erfüllen.

Beispiel : Der HRA-Wert von WC10Co-Hartmetall liegt normalerweise im Bereich von 85–90, was seine hohe Härte und Verschleißfestigkeit widerspiegelt.

8 Einschränkungen und Hinweise

Nicht geeignet für dünne Bleche (Dicke < 0,1 mm) oder Materialien mit gehärteter Randschichtdicke < 0,1 mm.

Die Ergebnisse werden durch die Oberflächenbeschaffenheit und den Zeitpunkt der Belastung beeinflusst und müssen streng kontrolliert werden.

Eingeschränkte Austauschbarkeit mit Vickershärte (ISO 6507) oder Brinellhärte (ISO 6506).

9 Prüfbericht

Der Bericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit.

Testbereich, Belastung und Haltezeit.

Härtewerte (Mittelwert und Standardabweichung).

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

Anhang (informativ)

Anhang A: Typische Daten

Kohlenstoffstahl (HRB): 70 ± 1

Gehärteter Stahl (HRC): $50 \pm 0,5$

WC10Co (HRA): $88 \pm 0,5$

veranschaulichen

ISO 6508-1:2016 stellt die wichtigsten Prüfmethoden bereit und bildet zusammen mit ISO 6508-2 und ISO 6508-3 ein vollständiges System.

Die Gültigkeit dieses Standards ist für das Jahr 2021 bestätigt und er kann künftig auf Grundlage neuer Technologien und Geräte aktualisiert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Internationale Norm

**ISO 6508-3:2015 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 3:
Kalibrierung von Vergleichsplatten**

Überblick

ISO 6508-3:2015 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung entwickelte Norm mit dem Titel „Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 3: Herstellung und Kalibrierung von Standardprüfblöcken“. Die Norm wurde am 15. Oktober 2015 veröffentlicht und tritt 2020 in Kraft. Die ISO 6508-Reihe wurde vom ISO/TC 164/SC 3 (Unterausschuss für Mechanische Prüfung) entwickelt und ist eine mehrteilige Norm (einschließlich ISO 6508-1, ISO 6508-2 und ISO 6508-3) zur Standardisierung der Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe. Dieser Teil legt die Anforderungen an Herstellung, Kalibrierung und Verwendung von Standardprüfblöcken fest, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Rockwell-Härteprüfgeräten zu gewährleisten. Sie eignet sich zur Härtemessung von metallischen Werkstoffen wie Stahl, Aluminium und Hartmetall.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Geeignet für Referenzstandard-Testblöcke, die für den Rockwell-Härtetest verwendet werden und Stahl, Gusseisen, Nichteisenmetalle und deren Legierungen abdecken.

Zweck: Festlegung der Vorbereitung, Kalibrierung und Verwendung von Standardprüfblöcken zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Prüfmaschine.

Nicht anwendbar: Nicht anwendbar auf nichtmetallische Prüfstücke oder Mikrohärteprüfungen (wie etwa Vickers- oder Knoop-Härte).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 6508-1:2016 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 1: Prüfverfahren

ISO 6508-2:2015 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Prüfmaschinen

ISO 376:2011 Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Kraftnormalen für Zugversuche

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Standardprüfblock

Referenzmaterial mit bekanntem Härtewert, das zur Kalibrierung der Rockwell-Härteprüfmaschine verwendet wird.

3.2 Kalibrierung

Überprüft die Genauigkeit der Messergebnisse der Prüfmaschine durch Messung des Härtewerts des Standardprüfblocks.

3.3 Bereich Der Härteprüfbereich, der durch die Kombination aus Eindringkörper und Last definiert wird, z. B. HRA, HRB, HRC.

3.4 Unsicherheit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Grad der Streuung der Messergebnisse während der Kalibrierung, normalerweise mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

4 Vorbereitung der Standardprüfblöcke

4.1 Materialanforderungen

Material: Wählen Sie Metallmaterialien mit guter Gleichmäßigkeit, wie gehärteten Stahl, Aluminiumlegierung oder Hartmetall.

Härtebereich: deckt wichtige Bereiche ab, wie z. B. HRC 20–70, HRB 20–100, HRA 20–88.

4.2 Abmessungen und Oberflächenbehandlung

Größe: Dicke ≥ 6 mm, ebene Fläche ≥ 25 mm $\times$ 25 mm.

Oberflächenbehandlung: mechanisches Polieren, Rauheit $Ra \leq 0,8$ μ m, Ebenheitsfehler $\leq 0,01$ mm.

Reinigung: Mit Ethanol oder Aceton abwischen, um Ölflecken zu entfernen.

4.3 Wärmebehandlung

Führen Sie eine Wärmebehandlung (wie Abschrecken und Anlassen) entsprechend den Materialeigenschaften durch, um eine gleichmäßige Härte sicherzustellen.

5 Kalibrierungsanforderungen

5.1 Kalibriergeräte

Rockwell-Härteprüfmaschine nach ISO 6508-2, komplett mit Kalibriervorrichtung.

Umgebungsbedingungen: Temperatur 23 °C $\pm$ 5 °C, Luftfeuchtigkeit < 65 %.

5.2 Kalibriervorgang

Wählen Sie einen Standard-Testblock mit entsprechendem Bereich (z. B. HRC-Testblock).

5-10 Messpunkte auf der Oberfläche des Prüfkörpers.

Wenden Sie die Vorprüfkraft (10 kgf $\pm$ 0,1 kgf) und die Hauptprüfkraft (60, 100 oder 150 kgf $\pm$ 0,5 kgf) an.

Notieren Sie den Härtewert für jede Messung und halten Sie ihn 2–8 Sekunden lang fest.

Berechnen Sie den Mittelwert und die Standardabweichung.

5.3 Akzeptanzkriterien

Die Abweichung zwischen dem gemessenen Wert und dem im Zertifikat angegebenen Wert beträgt $\leq \pm 1$ HR.

Standardabweichung $\leq 0,5$ HR (HRA, HRC) oder ≤ 1 HR (HRB).

6 Datenverarbeitung

6.1 Härtewert

Durchschnittswert: Nehmen Sie den Durchschnittswert aus 5–10 Messungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) oder ± 1 HR (HRB).

Unsicherheit: Bewertet Ausrüstung, Betrieb und Umweltauswirkungen mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

6.2 Kalibrierbericht

Beinhaltet Testblockmaterial, Härtebereich, Messwert und Unsicherheit.

7 Prüfbericht

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Materialien und Härtebereiche von Standardprüfblöcken.

Kalibrierbedingungen (z. B. Bereich, Hauptprüfkraft) .

Messergebnisse (Mittelwert, Standardabweichung, Unsicherheit).

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

aus gehärtetem Stahl : HRC $50 \pm 0,5$, Standardabweichung 0,3 HR.

Prüfblock aus Aluminiumlegierung: HRB 80 ± 1 , Standardabweichung 0,8 HR.

veranschaulichen

Serienstandard:

ISO 6508-1:2016 bietet zentrale Testmethoden.

ISO 6508-2:2015 spezifiziert die Überprüfung und Kalibrierung von Prüfmaschinen.

ISO 6508-3:2015 spezifiziert die Vorbereitung und Kalibrierung von Standardprüfblöcken.

Gültigkeit: Die Gültigkeit von ISO 6508-3:2015 ist für das Jahr 2020 bestätigt und kann künftig auf Grundlage des technologischen Fortschritts aktualisiert werden.

Bezugsquelle: Der Standardtext kann über die offizielle ISO-Website erworben werden.

Hinweis: Achten Sie bei der Durchführung darauf, dass der Prüfblock zum Prüfgerät passt und ziehen Sie professionelle Techniker zu Rate.

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:

Internationale Norm

**ISO 6508-1:2016 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 1:
Prüfverfahren**

Überblick

ISO 6508-1:2016 ist eine von der Internationalen Organisation für Normung entwickelte Norm mit dem Titel „Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 1: Prüfverfahren“. Die Norm wurde am 15. Oktober 2016 veröffentlicht und ersetzt die Fassung ISO 6508-1:2005. Ihre Gültigkeit ist für 2021 bestätigt. Die ISO-6508-Reihe wurde vom ISO/TC 164/SC 3 (Unterausschuss für die Prüfung mechanischer Eigenschaften) entwickelt und ist eine mehrteilige Norm (einschließlich ISO 6508-1, ISO 6508-2 und ISO 6508-3) zur Standardisierung der Härteprüfung nach Rockwell für metallische Werkstoffe. Dieser Teil legt das Prüfverfahren, die Geräteanforderungen und die Ergebnisdarstellung fest und gilt für die Härtebewertung metallischer Werkstoffe wie Stahl, Aluminium und Hartmetall.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte: Geeignet für metallische Werkstoffe (wie Stahl, Gusseisen, Nichteisenmetalle und deren Legierungen), einschließlich Hartmetall.

Zweck: Mit dem Rockwell-Härtetest wird die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Eindrücke gemessen. Er eignet sich zur Qualitätskontrolle und zur Bewertung der Materialeistung.

Nicht anwendbar: Nicht geeignet für nichtmetallische Materialien oder Mikrohärteprüfungen (wie Vickers- oder Knoop-Härte).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ISO 6507-1:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren

ISO 7500-1:2015 Metallische Werkstoffe – Kalibrierung und Verifizierung von Prüfmaschinen für Zugversuche – Teil Kraftmessung

ISO 376:2011 Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Kraftnormalen für Zugversuche

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Rockwell-Härte

Der Widerstand eines metallischen Materials gegen das Eindringen eines Eindringkörpers, ausgedrückt als Rockwell-Härtewert, der vom Bereich und der Art des Eindringkörpers abhängt.

3.2 Vorprüfkraft

Die anfängliche Kraft, die auf die Probe ausgeübt wird, um den Kontakt zu stabilisieren, normalerweise 10 kgf .

3.3 Gesamtprüfkraft

Die Gesamtkraft der Vorlast plus der zusätzlichen Last, beispielsweise 60 kgf , 100 kgf oder 150

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

kgf . 3.4 Bereich

Der Härteprüfbereich, der durch die Kombination aus Eindringkörper und Last definiert wird, beispielsweise HRA (Diamantkegel , 60 kgf) , HRB (1/16 Zoll Stahlkugel, 100 kgf) , HRC (Diamantkegel, 150 kgf) .

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Materialien: Metallmaterialien, einschließlich Stahl, Aluminium, Hartmetall usw.

Größe: Mindestdicke hängt vom Messbereich ab (z. B. muss HRC $\geq 1,5$ mm sein), ebene Fläche ≥ 25 mm $\times$ 25 mm.

Menge: Mindestens 3 Messungen pro Gruppe.

4.2 Probenverarbeitung

Oberflächenbehandlung: mechanisches Polieren oder Schleifen mit Sandpapier, Rauheit $Ra \leq 0,8$ μ m .

Reinigung: Mit Ethanol oder Aceton abwischen, um Ölflecken zu entfernen.

Ebenheit: Oberflächenebenheitsfehler $\leq 0,01$ mm.

4.3 Ausrüstung

Härteprüfgerät: Rockwell-Härteprüfgerät nach ISO 6508-2, ausgestattet mit Diamantkegel (120° Scheitelwinkel) oder Stahlkugel-Eindringkörper (1/16" oder 1/8" Durchmesser).

Umgebungsbedingungen: Temperatur 23 °C $\pm$ 5 °C, Luftfeuchtigkeit < 65 %.

5 Prüfmethoden

5.1 Testverfahren

Installieren Sie die Probe und achten Sie dabei auf die Ausrichtung mit dem Eindringkörper.

Wenden Sie eine Vortestkraft (10 kgf $\pm$ 0,1 kgf) an und stabilisieren Sie sie 1–5 Sekunden lang.

Wenden Sie die Hauptprüfkraft (60, 100 oder 150 kgf $\pm$ 0,5 kgf) an und halten Sie sie 2–8 Sekunden lang (angepasst an die Härte des Materials).

Entlasten Sie bis zur Vorprüfkraft und lesen Sie den Härtewert ab.

Wiederholen Sie die Messung 3-5 Mal und bilden Sie den Durchschnittswert.

5.2 Bereichswahl

HRA: Diamantkegel, 60 kgf , geeignet für harte Materialien (HRA 20-88).

HRB: 1/16 Zoll Stahlkugel, 100 kgf , geeignet für Materialien mittlerer Härte (HRB 20–100).

HRC: Diamantkegel, 150 kgf , für harten Stahl (HRC 20–70).

Andere Bereiche (wie HRD, HRE) können je nach Bedarf ausgewählt werden.

5.3 Umweltkontrolle

Vermeiden Sie Vibrationen und Temperaturschwankungen und halten Sie die Probenoberfläche trocken.

6 Datenverarbeitung

6.1 Härtewert

Berechnung: Der Härtewert wird direkt vom Härteprüfgerät in HR (HRA, HRB, HRC, etc.) abgelesen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durchschnittswert: Nehmen Sie den Durchschnittswert aus 3–5 Messungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) oder ± 1 HR (HRB).

6.2 Unsicherheit

Bewerten Sie die durch Ausrüstung, Betrieb und Zustand der Probenoberfläche verursachten Fehler mit einem Konfidenzniveau von 95 %. Typische Unsicherheit $\leq \pm 1$ Std.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit. Prüfbereich, Hauptprüfkraft und Haltezeit. Härtewert (Mittelwert und Standardabweichung).

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

Kohlenstoffstahl: HRB 80 ± 1 . Gehärteter Stahl: HRC $50 \pm 0,5$. WC10Co: HRA $88 \pm 0,5$.

veranschaulichen

Serienstandard:

ISO 6508-1:2016 stellt die wichtigsten Prüfmethoden bereit. ISO 6508-2:2015 spezifiziert die Verifizierungs- und Kalibrierungsverfahren.

ISO 6508-3:2015 legt die Standardvorbereitung von Prüfblöcken fest.

Gültigkeit: ISO 6508-1:2016 ist ab 2021 gültig und kann zukünftig auf Grundlage neuer Technologien und Geräte aktualisiert werden.

kann über die offizielle ISO -Website erworben werden.

Hinweis: Beachten Sie bei der Implementierung die spezifischen Materialeigenschaften und Gerätekalibrierungsergebnisse und wenden Sie sich an professionelle Techniker.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

ASTM G59

Standardtestmethode zur Durchführung potentiodynamischer
Polarisationswiderstandsmessungen

Überblick

ASTM G59 ist eine von der American Society for Testing and Materials (ASTM International) entwickelte Norm mit dem Titel „Standardprüfverfahren zur Durchführung potentiodynamischer Polarisationswiderstandsmessungen“. Die Norm wurde erstmals am 10. November 1997 veröffentlicht. Die neueste Version, **ASTM G59-97(2014)**, wurde am 1. Juni 2014 veröffentlicht und tritt 2023 in Kraft. ASTM G59 wurde vom ASTM-Komitee G01 (Korrosionsmetalle) entwickelt, um eine Labormethode zur Bewertung der Korrosionsrate und -neigung von Metallen und Legierungen in korrosiven Umgebungen durch Messungen des potentiodynamischen Polarisationswiderstands bereitzustellen. Diese Norm eignet sich zur Untersuchung von Korrosionsmechanismen, zur Materialprüfung und zur Qualitätskontrolle.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte : Geeignet für Korrosionsverhaltenstests von Metallen und Legierungen (wie Stahl, Edelstahl, Aluminium, Hartlegierungen usw.) in Elektrolytlösungen.

Zweck : Abschätzung der Korrosionsstromdichte (i_{corr}) und Korrosionsrate durch Messung des Polarisationswiderstandes .

Nicht anwendbar : Nicht geeignet für Korrosionstests an nichtleitenden Materialien oder unter extremen Bedingungen (wie z. B. geschmolzenem Salz bei hohen Temperaturen).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.
ASTM G3-14 Standardverfahren für die Vorbereitung, Durchführung und Analyse der Ergebnisse von Korrosionstests im Labor

ASTM G5-14 Standardreferenztestmethode: Potentiodynamische Polarisation

ASTM E691-22 Standardverfahren: Bewertung der Vergleichbarkeit von Testdaten

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten folgende Begriffe und Definitionen:

3.1 Polarisationswiderstand (R_p)

Das Verhältnis von Stromdichte zu Potentialdifferenz bei einer kleinen Potentialänderung in der Nähe des Korrosionspotentials, Einheit $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

3.2 Korrosionsstromdichte (i_{corr})

Die Stromdichte durch die Korrosionsreaktion pro Flächeneinheit, Einheit ist $\mu\text{A} / \text{cm}^2$, wird zur Abschätzung der Korrosionsrate verwendet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Korrosionspotential (E_{kor})

Das Gleichgewichtspotential eines Metalls in einem Elektrolyten ohne angelegten Strom, Einheit ist mV (relativ zur Referenzelektrode).

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material : Metall oder Legierung, z. B. Kohlenstoffstahl, Edelstahl 304, WC-Co-Hartmetall.

Größe : Sichtbare Fläche $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$ oder nach Vereinbarung.

Menge : Jede Versuchsgruppe wurde dreimal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Oberflächenbehandlung : Mechanisches Polieren auf $R_a \leq 0,8 \text{ } \mu\text{m}$, nach der Reinigung mit destilliertem Wasser abspülen .

Montage : Setzen Sie die Probe in den Elektrodenhalter ein und achten Sie darauf, dass sich auf der freiliegenden Oberfläche keine Blasen befinden.

4.3 Elektrolyte

Lösung : z. B. 3,5 % NaCl-Lösung (Massenanteil), pH 6,5–7,0 oder nach Vereinbarung bestimmt.

Sauerstoffentfernung : Falls erforderlich, 15 Minuten lang mit Stickstoff spülen, um gelösten Sauerstoff zu entfernen.

Temperatur : $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ oder wie im Protokoll angegeben.

4.4 Ausrüstung

Elektrochemische Arbeitsstation : Mit Funktionen zur Potenzialregelung (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ mV}$) und Strommessung (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ } \mu\text{A}$) .

Elektrodensystem :

Arbeitselektrode: Probe.

Referenzelektrode: gesättigte Kalomelektrode (SCE) oder Ag/AgCl-Elektrode.

Hilfselektrode: Platinelektrode.

5 Prüfmethoden

5.1 Testverfahren

Installieren Sie das Elektrodensystem, tauchen Sie es in den Elektrolyten ein und stabilisieren Sie es 1 Stunde lang, bis E_{corr} stabilisiert sich (Änderungsrate $< 0,1 \text{ mV/min}$).

Notieren Sie die anfängliche E_{kor} - Korrektur .

Der Potentialdynamikscan wurde im Bereich von $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ bei einer Scanrate von $0,166 \text{ mV/s} \pm 0,002 \text{ mV/s}$ durchgeführt.

Notieren Sie die Stromdichte-Potenzial-Kurve.

Entladen Sie die Elektrode und reinigen Sie die Probe.

5.2 Parametereinstellungen

Scanbereich : $E_{\text{kor}} \pm 10 \text{ mV}$ (linearer Bereich).

Abtastintervall : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Umweltkontrolle : Vermeiden Sie Vibrationen und elektromagnetische Störungen .

6 Datenverarbeitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Berechnung des Polarisationswiderstandes

Formel :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Messung: Extrahieren Sie die Steigung des linearen Bereichs aus der Kurve.

6.2 Abschätzung der Korrosionsstromdichte

Stern-Gibbs -Formel :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Genauigkeit : $\pm 10\%$.

6.3 Unsicherheit

Bewerten Sie die Auswirkungen der Elektrodenstabilität und der Lösungsreinheit mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit.

Elektrolytzusammensetzung, Temperatur und pH-Wert.

Scanrate, Reichweite und E_{Korr} Wert.

R_p und i_{corr} Ergebnisse und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

veranschaulichen

Links zu verwandten Standards : ASTM G59 wird in Verbindung mit ASTM G5 (potentiodynamische Polarisation) verwendet, um eine umfassende Analyse des Korrosionsverhaltens bereitzustellen.

Einschränkungen : Linearität wird nur für kleine Potenzialbereiche angenommen, über $\pm 10 \text{ mV}$ hinaus kann ein Verweis auf ASTM G5 erforderlich sein.

Gültigkeit : Die Gültigkeit von ASTM G59-97 (2014) ist für das Jahr 2023 bestätigt und kann in Zukunft auf der Grundlage elektrochemischer Technologie aktualisiert werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

**ASTM G3-14 Standardverfahren
für Konventionen, die für elektrochemische Messungen bei Korrosionsprüfungen gelten**

Überblick

ASTM G3-14 ist ein von der American Society for Testing and Materials (ASTM International) entwickelter Standard mit dem Titel „Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing“. Der Standard wurde am 1. Mai 2014 veröffentlicht. Die neueste Version ist **ASTM G3-14 (2024)**, die am 1. Januar 2024 veröffentlicht und ab 2024 gültig ist. ASTM G3 wurde vom ASTM-Komitee G01 (Corrosion Metals) entwickelt, um einheitliche Konventionen, Terminologie und Verfahren für elektrochemische Messungen in Laborkorrosionstests bereitzustellen und so die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Testergebnisse zu gewährleisten. Dieser Standard gilt für elektrochemische Tests von Metallen und Legierungen in verschiedenen korrosiven Umgebungen.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte : Geeignet für elektrochemische Korrosionstests von Metallen und Legierungen (wie Stahl, Edelstahl, Aluminium, Hartlegierungen usw.) in Elektrolytlösungen.

Zweck : Standardisierung der Vorbereitung, Durchführung und Analyse elektrochemischer Messungen, einschließlich Elektrodensystem, Geräteaufbau und Dateninterpretation.

Nicht anwendbar : Nicht anwendbar auf nicht elektrochemische Korrosionstests (wie Salzsprühtests) oder nichtmetallische Materialien.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ASTM G5-14 Standardreferenztestmethode: Potentiodynamische Polarisation

ASTM G59-97(2014) Standardprüfverfahren: Messung des potentiodynamischen Polarisationswiderstands

ASTM E691-22 Standardverfahren: Bewertung der Vergleichbarkeit von Testdaten

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Elektrochemische Zelle

Ein Gerät für elektrochemische Messungen, bestehend aus Arbeitselektrode, Referenzelektrode und Hilfselektrode.

3.2 Korrosionspotential (E_{kor})

Das Gleichgewichtspotential eines Metalls in einem Elektrolyten ohne angelegten Strom, ausgedrückt in mV (relativ zur Referenzelektrode).

3.3 Polarisationswiderstand (R_p)

Das Verhältnis der Potentialänderung zur entsprechenden Stromänderung, ausgedrückt in $\Omega \cdot \text{cm}^2$, wird zur Schätzung der Korrosionsrate verwendet.

3.4 Referenzelektrode

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eine Elektrode, die eine stabile Potenzialreferenz bietet, wie beispielsweise eine gesättigte Kalomelelektrode (SCE) oder eine Ag/AgCl-Elektrode.

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material : Metall oder Legierung, z. B. Kohlenstoffstahl, Edelstahl 304, WC-Co-Hartmetall.

Größe : Sichtbare Fläche $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$ oder nach Vereinbarung.

Menge : Jede Versuchsgruppe wurde dreimal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Oberflächenbehandlung : Mechanisches Polieren auf $R_a \leq 0,8 \text{ } \mu\text{m}$, nach der Reinigung mit destilliertem Wasser abspülen und für den Gebrauch trocknen .

Montage : Setzen Sie die Probe in den Elektrodenhalter ein und achten Sie darauf, dass sich auf der freiliegenden Oberfläche keine Blasen oder Verunreinigungen befinden.

4.3 Elektrolyte

Lösung : z. B. 3,5 % NaCl-Lösung (Massenanteil), pH 6,5–7,0 oder nach Vereinbarung bestimmt.

Reinheit : Verwenden Sie deionisiertes Wasser mit einer Leitfähigkeit von $\leq 1 \text{ } \mu\text{S/cm}$.

Temperatur : $23 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ oder wie im Protokoll angegeben.

4.4 Elektrochemische Ausrüstung

Arbeitsstation : Mit Potenzialsteuerungs- (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ mV}$) und Strommessfunktionen (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ } \mu\text{A}$) .

Elektrodensystem :

Arbeitselektrode: Probe.

Referenzelektrode: SCE- oder Ag/AgCl-Elektrode.

Hilfselektrode: Platin- oder Graphitelektrode.

Erdung : Stellen Sie sicher, dass das System geerdet ist, um Störgeräusche zu reduzieren.

5 Testbetrieb

5.1 Elektrochemischer Zellaufbau

Achten Sie auf einen angemessenen Abstand zwischen den Elektroden (Arbeitselektrode zu Referenzelektrode $\leq 5 \text{ mm}$).

Überprüfen Sie die Dichtheit, um ein Austreten der Lösung zu vermeiden.

5.2 Anfangsstabilität

1 Stunde in Elektrolyt eintauchen, bis E_{corr} stabilisiert sich (Änderungsrate $< 0,1 \text{ mV/min}$).

Notieren Sie die anfängliche $E_{\text{Korrektur}}$.

5.3 Messverfahren

Leerlaufpotential (OCP) : Notieren Sie die Änderung von E_{corr} innerhalb von 30 Minuten.

Polarisationsbeständigkeit : Gemäß ASTM G59 beträgt die Scanreichweite $E_{\text{korr}} \pm 10 \text{ mV}$ und die Rate beträgt $0,166 \text{ mV/s} \pm 0,002 \text{ mV/s}$.

Mögliche dynamische Polarisation : Gemäß ASTM G5 beträgt der Scanbereich $E_{\text{korr}} \pm 250 \text{ mV}$ und die Rate beträgt $0,5 \text{ mV/s} \pm 0,05 \text{ mV/s}$.

5.4 Umweltkontrolle

Vermeiden Sie Vibrationen, Temperaturschwankungen ($\pm 1^\circ\text{C}$) und elektromagnetische Störungen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 Datenanalyse

6.1 Korrosionspotenzial

Stabilität nehmen Durchschnittswert von E_{corr} , Genauigkeit ± 1 mV.

6.2 Polarisationswiderstand

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

精度: $\pm 5\%$.

6.3 Korrosionsstromdichte

Stern-Gibbs -Formel :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Genauigkeit : $\pm 10\%$.

6.4 Unsicherheit

Bewerten Sie die Auswirkungen von Elektrodendrift, Lösungsreinheit und Instrumentengenauigkeit mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

6.5 Kurvenanalyse

Zeichnen Sie die Potenzial-Stromdichte-Kurve, um die passiven oder aktiven Bereiche zu identifizieren.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit.

Elektrolytzusammensetzung, Temperatur und pH-Wert.

Messparameter (z. B. Scanrate, Reichweite).

E_{corr} , R_p und i_{corr} Ergebnisse und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650$ mV (SCE), $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200$ mV (SCE), $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300$ mV (SCE), $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Anhang B: Elektrodenkalibrierung

Die Referenzelektrode wurde regelmäßig mit einer Standardlösung bekannten Potentials mit einem Fehler von $\leq \pm 2$ mV kalibriert.

veranschaulichen

Beziehung zu verwandten Standards : ASTM G3-14 bietet die grundlegende Vorgehensweise für elektrochemische Tests wie ASTM G5 und G59 und betont die Konsistenz.

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

Einschränkungen : Die Ergebnisse werden von der Elektrolytzusammensetzung und dem Oberflächenzustand der Probe beeinflusst und die Bedingungen müssen streng kontrolliert werden.

Gültigkeit : Die Gültigkeit von ASTM G3-14 (2024) im Jahr 2024 ist bestätigt und kann in Zukunft auf der Grundlage elektrochemischer Technologie aktualisiert werden.

Anhang:

**ASTM G5-14 Standardreferenztestmethode
zur Durchführung potentiodynamischer anodischer Polarisationsmessungen**

Überblick

ASTM G5-14 ist eine von der American Society for Testing and Materials (ASTM International) entwickelte Norm mit dem Titel „Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarisation Measurements“. Die Norm wurde am 1. Mai 2014 veröffentlicht. Die neueste Version, **ASTM G5-14(2021)**, wurde am 1. Juni 2021 veröffentlicht und tritt 2023 in Kraft. ASTM G5 wurde vom ASTM-Komitee G01 (Korrosionsmetalle) entwickelt, um eine Labormethode zur Bewertung des anodischen Verhaltens, der Passivierungseigenschaften und der Korrosionsneigung von Metallen und Legierungen in korrosiven Umgebungen durch potentiodynamische Polarisationsmessungen bereitzustellen. Diese Norm eignet sich für die Untersuchung von Korrosionsmechanismen, Materialprüfungen und die Qualitätskontrolle.

1 Geltungsbereich

Anwendbare Objekte : Geeignet zum Testen des anodischen Polarisationsverhaltens von Metallen und Legierungen (wie Stahl, Edelstahl, Aluminium, Hartlegierungen usw.) in Elektrolytlösungen.

Zweck: Analyse des Korrosionspotenzials, der Passivierungszone und des Bruchpotenzials durch Steuerung der Potenzialabtastung und Messung der Stromdichte-Potenzial- Kurve.

Nicht anwendbar : Nicht geeignet für nichtleitende Materialien oder nicht elektrochemische Korrosionstests (wie Trockenverschleiß).

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm von wesentlicher Bedeutung. Bei datierten Dokumenten gilt ausschließlich die datierte Fassung für diese Norm. Bei undatierten Dokumenten gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) für diese Norm.

ASTM G3-14(2024) Standardverfahren für die Vorbereitung, Durchführung und Analyse von Korrosionstests im Labor

ASTM G59-97(2014) Standardprüfverfahren: Messung des potentiodynamischen Polarisationswiderstands

ASTM E691-22 Standardverfahren: Bewertung der Vergleichbarkeit von Testdaten

3 Begriffe und Definitionen

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Potentiodynamische Polarisation

Die Beziehung zwischen Stromdichte und Potenzial wird gemessen, indem das Potenzial so gesteuert wird, dass es sich mit einer konstanten Rate ändert. 3.2 **Korrosionspotenzial** (E_{kor})

Das Gleichgewichtspotential eines Metalls in einem Elektrolyten ohne angelegten Strom, in mV (relativ zur Referenzelektrode). 3.3 **Passivierungspotential** ($E_{\text{passieren}}$)

Das Potenzial, bei dem die Stromdichte nach Erreichen des Potenzials deutlich abzufallen beginnt,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

in mV.

3.4 Durchbruchspotenzial (E_b)

Das Potenzial in mV, bei dem der passive Film durchbricht, was zu einem starken Anstieg des Stroms führt.

4 Experimentelle Vorbereitung

4.1 Untersuchungsmaterial

Material : Metall oder Legierung, z. B. Kohlenstoffstahl, Edelstahl 304, WC-Co-Hartmetall.

Größe : Sichtbare Fläche $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$ oder nach Vereinbarung.

Menge : Jede Versuchsgruppe wurde dreimal wiederholt.

4.2 Probenverarbeitung

Oberflächenbehandlung : Mechanisches Polieren auf $R_a \leq 0,8 \text{ } \mu\text{m}$, nach der Reinigung mit destilliertem Wasser abspülen und für den Gebrauch trocknen .

Montage : Setzen Sie die Probe in den Elektrodenhalter ein und achten Sie darauf, dass sich auf der freiliegenden Oberfläche keine Blasen oder Verunreinigungen befinden.

4.3 Elektrolyte

Lösung : z. B. 3,5 % NaCl-Lösung (Massenanteil), pH 6,5–7,0 oder nach Vereinbarung bestimmt.

Reinheit : Verwenden Sie deionisiertes Wasser mit einer Leitfähigkeit von $\leq 1 \text{ } \mu\text{S} / \text{cm}$.

Temperatur : $23 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ oder wie im Protokoll angegeben.

4.4 Elektrochemische Ausrüstung

Arbeitsstation : Mit Potenzialsteuerungs- (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ mV}$) und Strommessfunktionen (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ } \mu\text{A}$) .

Elektrodensystem :

Arbeitselektrode: Probe.

Referenzelektrode: gesättigte Kalomelektrode (SCE) oder Ag/AgCl-Elektrode.

Hilfselektrode: Platin- oder Graphitelektrode.

Erdung : Stellen Sie sicher, dass das System geerdet ist, um Störgeräusche zu reduzieren.

5 Prüfmethoden

5.1 Testverfahren

Installieren Sie das Elektrodensystem, tauchen Sie es in den Elektrolyten ein und stabilisieren Sie es 1 Stunde lang, bis E_{corr} stabilisiert sich (Änderungsrate $< 0,1 \text{ mV/min}$).

Notieren Sie die anfängliche $E_{\text{- Korrektur}}$.

E_{kor} - 50 mV und anodisch scannen bis $E_{\text{kor}} + 1500 \text{ mV}$ oder eine Stromdichte von 1 mA/cm^2 bei einer Scanrate von $0,167 \text{ mV/s} \pm 0,002 \text{ mV/s}$.

Notieren Sie die Stromdichte-Potenzial-Kurve.

Entladen Sie die Elektrode und reinigen Sie die Probe.

5.2 Parametereinstellungen

Scanbereich : E_{kor} - 50 mV bis $E_{\text{kor}} + 1500 \text{ mV}$, bzw. bis Stromdichte 1 mA/cm^2 .

Abtastintervall : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Umgebungsbedingungen : Vibrationen und Temperaturschwankungen ($\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$) vermeiden .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 Datenanalyse

6.1 Schlüsselpotenzial

$E_{\text{kor}} :$ Notieren Sie den Startpunkt der Kurve mit einer Genauigkeit von ± 1 mV.

$E_{\text{pass}} :$ Bestimmen Sie das Potenzial, bei dem die Stromdichte auf einen stabilen Wert abfällt, mit einer Genauigkeit von ± 5 mV.

$E_b :$ Gibt das Bruchpotential an, bei dem der Strom steil ansteigt, mit einer Genauigkeit von ± 5 mV.

6.2 Stromdichte

Die Stromdichte im Anoden- und Kathodenbereich wird in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ erfasst.

6.3 Abschätzung der Korrosionsrate

Tafel -Extrapolation : Extrahieren Sie die anodischen und kathodischen Tafel-Steigungen aus der Kurve und berechnen Sie i_{kor} .

$$i_{\text{kor}} = 10^{\frac{E_{\text{kor}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中, a 和 b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数, i_a 为阳极电流密度。

Genauigkeit : $\pm 10\%$.

6.4 Unsicherheit

Bewerten Sie die Auswirkungen von Elektrodendrift, Lösungsreinheit und Instrumentengenauigkeit mit einem Konfidenzniveau von 95 %.

7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und Oberflächenbeschaffenheit.

Elektrolytzusammensetzung, Temperatur und pH-Wert.

Scanrate, Reichweite und E_{kor} Wert.

E_{pass} , i_{kor} Ergebnisse und Unsicherheiten.

Prüfdatum, Gerätemodell und Unterschrift des Bedieners.

8 Anhang (Informativ)

Anhang A: Typische Daten

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{kor}} = -650$ mV (SCE), E_{pass} 不明显, $E_b = -400$ mV, $i_{\text{kor}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{kor}} = -200$ mV (SCE), $E_{\text{pass}} = 0$ mV, $E_b = 800$ mV, $i_{\text{kor}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{kor}} = -300$ mV (SCE), $E_{\text{pass}} = 100$ mV, $E_b = 900$ mV, $i_{\text{kor}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Anhang B: Elektrodenkalibrierung

Die Referenzelektrode wurde regelmäßig mit einer Standardlösung bekannten Potentials mit einem Fehler von $\leq \pm 2$ mV kalibriert.

veranschaulichen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Links zu verwandten Standards : ASTM G5-14 wird in Verbindung mit ASTM G3 und ASTM G59 verwendet, um eine umfassende elektrochemische Korrosionsanalyse bereitzustellen.

Einschränkungen : Die Ergebnisse werden durch die Scanrate und die Elektrolytzusammensetzung beeinflusst und müssen durch einen Vergleich mit der tatsächlichen Umgebung überprüft werden.

Gültigkeit : Die Gültigkeit von ASTM G5-14 (2021) ist für 2023 bestätigt und kann in Zukunft auf der Grundlage elektrochemischer Technologie aktualisiert werden.

Inhaltsverzeichnis

Teil 3: Leistungsoptimierung von Hartmetall

Kapitel 8: Korrosions- und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.1 Mechanismus der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall

8.1.1 Elektrochemisches Verhalten von Wolframkarbid (WC) und der Bindephase in Hartmetall

8.1.2 Hartmetall in saurer/salzhaltiger Umgebung

8.1.2.1 Prinzip und technischer Überblick

8.1.2.2 Mechanismus und Analyse von Hartmetall in saurer/salzhaltiger Umgebung

8.1.2.3 Analyse der Faktoren, die die Korrosion von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen beeinflussen

8.1.2.4 Optimierungsstrategie für die Korrosionseffekte von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen

8.1.2.5 Technische Anwendungen von Hartmetall in sauren und salzhaltigen Umgebungen

Tipps zur Hartmetallkorrosion in diesem Abschnitt

(1) Korrosionsverlauf von Hartmetall

(2) Hartmetall verbessert den Oberflächenschutz

(3) Korngrenzendichte von Hartmetall

(4) Korrosionsbeanspruchung von Hartmetall

(5) Lochfraß auf der Hartmetalloberfläche

8.2 Hochtemperatureigenschaften von Hartmetall

8.2.1 Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall (800-1000°C)

8.2.1.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall

8.2.1.2 Oxidationsbeständigkeitsmechanismus und -analyse von Hartmetall

8.2.1.3 Analyse der Faktoren, die die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

8.2.1.4 Strategie zur Optimierung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall

8.2.1.5 Technische Anwendung der Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall

8.2.2 Thermische Ermüdung und Kriechen von Hartmetall

8.2.2.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien der thermischen Ermüdung und des Kriechens von Hartmetall

8.2.2.2 Thermische Ermüdung und Kriechmechanismus sowie Analyse von Hartmetall

8.2.2.3 Faktoren, die die thermische Ermüdung und das Kriechen von Hartmetall beeinflussen, und ihre Kopplungseffekte

8.2.2.4 Strategien zur Optimierung der thermischen Ermüdung und des Kriechens bei Hartmetall

8.2.2.5 Technische Anwendung der thermischen Ermüdung und Kriechverhaltensoptimierung von Hartmetall

8.3 Methoden zur Optimierung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.1 Vorteile der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall hinsichtlich der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit

8.3.1.1 Prinzip und technischer Überblick über die Korrosionsbeständigkeitsvorteile der Ni -basierten Hartmetall -Bindungsphase

8.3.1.2 Analyse des Korrosionsbeständigkeitsmechanismus der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall

8.3.1.3 Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall

8.3.1.4 Analyse der Faktoren, die die Korrosionsbeständigkeit der Ni-basierten Bindungsphase in Hartmetall beeinflussen

8.3.1.5 Optimierung des Ni- basierten Bindephasenherstellungsprozesses

8.3.1.6 Prüfvorschrift für die Ni-basierte Bindungsphase von Hartmetall

8.3.1.7 Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Ni-basierten Hartmetall-Bindungsphase

8.3.1.9 Technische Anwendungen der Ni-basierten Hartmetall- Bindephase

8.3.1.10 Anwendungsvorteile und -erweiterung von Ni-Basis- Hartmetall

8.3.2 Einführung von Cr_3C_2 -Additiven in Hartmetall

8.3.2.1 Prinzip und technischer Überblick über die Einführung von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

8.3.2.2 Analyse des Oxidations- und Korrosionsschutzmechanismus durch Cr_3C_2 -Additive in Hartmetall

8.3.2.3 Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Einführung von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

8.3.2.4 Analyse der Faktoren, die die Leistung von Cr_3C_2 - Hartmetallzusätzen beeinflussen

8.3.2.5 Optimierung des Herstellungsprozesses von Hartmetall- Cr_3C_2 - Zusätzen

Cr_3C_2 - Hartmetall – Anwendungsfall und Leistungsvergleich

8.3.2.7 Anwendungserweiterung und Grenzen von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

8.3.2.8 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Einführung von Cr_3C_2 -Zusätzen in Hartmetall

8.3.3 Schutz der Oberflächenbeschichtung aus Hartlegierungen

Überblick über das Prinzip und die Technologie des Oberflächenschutzes durch Hartmetall

Analyse des Korrosionsbeständigkeits- und Oxidationsbeständigkeitsmechanismus der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

Mikroskopische Analyse und Überprüfung der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

Analyse der Faktoren, die die Oberflächenbeschichtung von Hartmetall beeinflussen

8.3.3.6 Optimierung des Herstellungsprozesses von Hartmetall-Oberflächenschutzbeschichtungen

Technische Fälle und Leistungsvergleich von Hartmetall-Oberflächenbeschichtungen

8.3.3.8 Anwendungserweiterung und Grenzen von Hartmetall-Oberflächenbeschichtungen

Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung

8.3.4 Optimierung der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und

Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien zur Optimierung der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prozessparameter für Hartmetallkorrosion und Hochtemperaturbeständigkeit

8.3.4.2 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und des Leistungsmechanismus der Prozessparameteroptimierung von Hartmetall

8.3.4.3 Mikroskopische Analyse und Verifizierung der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.4 Analyse der Faktoren, die die Prozessparameteroptimierung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

8.3.4.5 Optimierungsstrategie der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.6 Technische Fälle und Leistungsvergleich der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.7 Anwendungserweiterung und Grenzen der Prozessparameteroptimierung für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.3.4.8 Optimierung der Prozessparameter für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall und Zukunftsaussichten

8.3.5. Kontrolle der Hartmetall-Mikrostruktur

8.3.5.1 Überblick über die Prinzipien und Technologien zur Kontrolle der Hartmetall-Mikrostruktur

8.3.5.2 Analyse der Korrosionsbeständigkeit und des Leistungsmechanismus der Hartmetall-Mikrostrukturregulierung

8.3.5.3 Mikroanalyse und Überprüfung der Hartmetall-Mikrostrukturkontrolle

8.3.5.4 Analyse der Faktoren, die die Mikrostruktur von Hartmetall beeinflussen

8.3.5.5 Strategie zur Kontrolle der Mikrostruktur von Hartmetall

8.3.5.6 Steuerungstechnik für die Mikrostruktur von Hartmetall und Leistungsvergleich

8.3.5.7 Anwendungserweiterung und Grenzen der Hartmetall-Mikrostrukturkontrolle

8.3.5.8 Richtung und Zukunftsaussichten der Kontrolle und Optimierung der Hartmetall-Mikrostruktur

8.4 Prüfung und Bewertung der Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit von Hartmetall

8.4.1 Korrosionsrate von Hartmetall (Elektrochemische Tafel-Kurve)

8.4.1.2 Mechanismus und Analyse der Korrosionsrate von Hartmetall

8.4.1.3 Analyse der Faktoren, die die Korrosionsrate von Hartmetall beeinflussen

8.4.1.4 Prüfverfahren für die Korrosionsrate von Hartmetall

8.4.1.6 Anwendungserweiterung und Grenzen der Hartmetallkorrosionsrate

8.4.1.7 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten der Hartmetallkorrosionsrate

8.4.2 Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

Überblick über das Prinzip und die Technologie des Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests von Hartmetall

Mechanismus und Analyse der Hochtemperaturhärte und des Thermoschocktests von Hartmetall

8.4.2.3 Analyse der Faktoren, die die Hochtemperaturhärte beeinflussen, und Thermoschocktest von Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfverfahren für Hochtemperaturhärte und Thermoschockprüfung von Hartmetall
8.4.2.5 Technische Anwendung des Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests von Hartmetall

Anwendungserweiterung und Grenzen der Hochtemperaturhärte- und Thermoschockprüfung von Hartmetall

8.4.2.7 Optimierungsrichtung und Zukunftsaussichten des Hochtemperaturhärte- und Thermoschocktests von Hartmetall

Verweise

Anhang:

Vergleichende Analyse von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus hochdichter Wolframlegierung

Vergleichende Analyse von Hochtemperaturformen aus Hartmetall und Formen aus Titan-Zirkonium-Molybdän-Legierungen (TZM)

Übersicht über Hartmetall-Gasturbinenkomponenten

Hartmetallwerkzeuge und Teile für Lebensmittelverarbeitungsgeräte

Hartmetall-Gasturbinendüse

Ventil für Chemiepipelines aus Hartlegierung

Hartmetallteile für Papierherstellungsanlagen

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 7997-2017

Verfahren zur Leistungsprüfung von Hartmetall Nationaler Standard der Volksrepublik

China GB/T 3851-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 3850-2015 Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T

18376-2014 Verfahren zur Schlagfestigkeitsprüfung von Hartmetall Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 7997-2017 Verfahren zur Leistungsprüfung von Hartmetall Internationaler Standard ISO 15156-1:2020

Öl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion

— Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

, Petrochemie und Erdgasindustrie — Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen

Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion — Teil 1: Allgemeine Grundsätze für die Auswahl rissbeständiger Werkstoffe

Norm ISO 15156-2:2020

Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie

— Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasförderung

— Teil 2: Rissbeständige Kohlenstoff- und niedriglegierte Stähle und die Verwendung von Gusseisen

, Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion

— Teil 2: Verwendung von unlegierten und niedriglegierten Stählen sowie rissbeständigem Gusseisen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Internationale Norm ISO 15156-3:2020

Erdöl-, Petrochemie- und Erdgasindustrie

— **Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen Umgebungen bei der Öl- und Gasförderung**

— **Teil 3: Rissbeständige CRAs (korrosionsbeständige Legierungen) und andere**

Legierungen

Petrochemie- und Erdgasindustrie – Werkstoffe für den Einsatz in H₂S-haltigen

Umgebungen bei der Öl- und Gasproduktion

— **Teil 3: Korrosionsbeständige Legierungen (CRAs) und andere rissbeständige**

Legierungen

Hartmetall-Hochtemperaturform

CTIA GROUP Hartmetall-Papierschneider

ISO 9227:2017 Korrosionsprüfung Salzsprühnebelprüfung in künstlicher Atmosphäre

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 18376-2014

Prüfverfahren für Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit von Hartmetall

Internationaler Standard ISO 4287:1997

Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächentextur: Profilmethode – Begriffe, Definitionen und Parameter der Oberflächentextur Geometrische Produktspezifikationen (GPS)

— **Oberflächentextur: Profilmethode**

— **Begriffe, Definitionen und Oberflächentexturparameter**

Internationale Norm ISO 3274:1996

Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächenbeschaffenheit: Profilometrie –

Nominale Eigenschaften von Kontaktinstrumenten Geometrische Produktspezifikationen (GPS)

— **Oberflächentextur: Profilmethode**

— **Nominale Eigenschaften von Tastinstrumenten**

ISO 4288:1996

Geometrische Produktspezifikationen – Oberflächentextur: Profilmethode – Regeln und Verfahren zur Bewertung der Oberflächentextur

— **Oberflächentextur: Profilmethode**

— **Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit**

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 12444-2006

Prüfverfahren für Gleitreibung und Verschleiß metallischer Werkstoffe

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 16545-2008 Prüfverfahren für Salzsprühkorrosion metallischer Werkstoffe

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 3850-2015

Allgemeine Richtlinien für Korrosionsprüfungen von Metallen und Legierungen

Internationaler Standard ISO 8044:2015 Korrosion von Metallen und Legierungen –

Grundlegende Begriffe und Definitionen

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

Internationale Normen ISO 9223:2012

Korrosion von Metallen und Legierungen – Korrosivität von Atmosphären – Klassifizierung

GB/T 38512015 Nationaler Standard der Volksrepublik China

Verfahren zur Bestimmung der Mikrostruktur von Hartmetall

Nationaler Standard der Volksrepublik China GB/T 7997-2017 Verfahren zur

Leistungsprüfung von Hartmetall Internationaler Standard ISO 6508 Metallische

Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach

Rockwell

Internationale Norm ISO 6508-3:2015

Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 3: Kalibrierung von

Vergleichsplatten

Internationale Norm ISO 6508-1:2016

Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell – Teil 1: Prüfverfahren

ASTM G59

Standardtestmethode zur Durchführung potentiodynamischer

Polarisationswiderstandsmessungen

Standardprüfverfahren zur Bestimmung des potentiodynamischen

Polarisationswiderstandes

ASTM G3-14 Standardverfahren

für Konventionen, die für elektrochemische Messungen bei Korrosionsprüfungen gelten

ASTM G5-14 Standardreferenztestmethode

zur Durchführung potentiodynamischer anodischer Polarisationsmessungen

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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