

## Wolframhartmetall

# Umfassende Untersuchung physikalischer und chemischer Eigenschaften, Prozesse und Anwendungen ( VII )

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

### Teil 3: Leistungsoptimierung von Hartmetall

#### Kapitel 7: Kontrolle der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall

Hartmetall (WC-Co) wird aufgrund seiner hervorragenden Härte (HV 1200–1800), guten Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$  8–16 MPa·m<sup>1/2</sup>), hohen Druckfestigkeit (4000–6000 MPa) und hervorragenden Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <0,1 mm<sup>3</sup>/N·m) häufig in Flugzeugwerkzeugen (Lebensdauer > 15 Stunden), Bergbaubohrern (Bohren > 1200 m) und verschleißfesten Matrizen (Extrusion > 10<sup>6</sup>-fach) verwendet. Unter extremen Arbeitsbedingungen, wie z. B. hoher Stoßbelastung (Frequenz > 500 Hz), zyklischer Belastung (> 10<sup>5</sup>-fach), hohen Temperaturen (> 800 °C) und abrasivem Verschleiß (Härte > 800 HV), ist die Gesamtleistung von Hartmetall jedoch noch immer eine Herausforderung. Es ist schwierig, mit einer einzelnen Optimierungsstrategie die synergetischen Anforderungen an Härte, Zähigkeit, Dauerfestigkeit und Verschleißfestigkeit gleichzeitig zu erfüllen. Ein Durchbruch in der Gesamtleistung kann durch die Kontrolle der Mikrostruktur (WC-Korngröße 0,2–2 µm, Co-Gehalt 6–15 %), eine eingehende Analyse des Ausfallmechanismus (Risswachstumsrate ~ 10<sup>-6</sup> mm/Zyklus) und die Anwendung moderner Verstärkungstechnologien (VC-Zusatz 0,2–0,5 %, Ionenimplantationsdosis 10<sup>16</sup>–10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup>, Laserbeschichtungsstärke 50–150 µm) erreicht werden.

In diesem Kapitel werden die folgenden vier Aspekte behandelt: Ausgewogenheit zwischen Härte und Zähigkeit, Dauerfestigkeit und Schlagzähigkeit, Analyse von Ausfallmechanismen und Strategien zur Leistungsverbesserung. Es werden systematisch die mechanischen Eigenschaften, Vor- und Nachteile, Regelungstechnik und Bedingungen von Hartmetall erörtert. Darüber hinaus wird in diesem Kapitel auch ein Ausblick auf die Entwicklungstrends von Hartmetall im Rahmen der zukünftigen KI-Technologie und des industriellen Internets der Dinge (IIoT) gegeben, um eine höhere Effizienz und Zuverlässigkeit für industrielle Anwendungen zu gewährleisten.

Die Vorteile von Hartmetall sind seine hohe Härte und Verschleißfestigkeit sowie seine Fähigkeit, hohen Belastungen und Reibung unter extremen Arbeitsbedingungen standzuhalten. Seine Nachteile sind jedoch der Widerspruch zwischen Härte und Zähigkeit. Eine hohe Härte (HV > 1600) führt in der Regel zu einer verringerten Zähigkeit ( $K_{IC}$  < 10 MPa·m<sup>1/2</sup>), was zu Sprödbrech führt. Zudem muss die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall bei hochfrequenter zyklischer Belastung noch verbessert werden (die Risswachstumsrate muss auf < 10<sup>-7</sup> mm/Zyklus begrenzt werden). Durch die Analyse in diesem Kapitel erhalten die Leser ein umfassendes Verständnis der Methoden zur Regulierung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall und seiner Leistung in der Praxis.

#### 7.0 Mechanische Eigenschaften von Hartmetall

Hartmetall (WC-Co) wird aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften häufig in der Luftfahrt, im Bergbau und im Formenbau eingesetzt. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Beschreibung der wichtigsten mechanischen Eigenschaften, einschließlich Definition, Messmethode, Einflussfaktoren und Anwendungshintergrund:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 7.0. 1. Hohe Härte von Hartmetall

### 7.0.1.0 Welche Härte hat Hartmetall ?

Die Härte von Hartmetall (WC-Co) beschreibt die Widerstandsfähigkeit der Oberfläche gegenüber Eindrücken und Kratzern durch Fremdkörper (z. B. Eindringkörper). Sie spiegelt die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen plastische Verformung und Verschleiß wider. Als Verbundwerkstoff besteht Hartmetall aus einer Hartphase aus Wolframkarbid (WC, Härte ca. HV 2000–2500) und einer Bindephase aus Kobalt (Co, Härte ca. HV 300). Die Härte von Hartmetall liegt üblicherweise zwischen HV 1200–1800 und kann durch Oberflächenmodifizierung (z. B. Aufkohlen, Laserbeschichten) auf HV 2000–2500 erhöht werden. Die Härte bestimmt direkt die Haltbarkeit von Hartmetall in Umgebungen mit hoher Belastung und Reibung, beispielsweise beim Schneiden, Bohren und Formenbau.

Die physikalische Natur der Härte hängt eng mit der Mikrostruktur des Materials zusammen, was hauptsächlich auf die hohe Härte und die korngrenzenverstärkende Wirkung der WC-Phase zurückzuführen ist, während die Co-Phase einen Teil der Energie durch plastische Verformung absorbiert und die Gesamtleistung anpasst.

### 7.0.1.1 Methode zur Messung der Härte von Hartmetall

Die Härte von Hartmetall kann mit verschiedenen Prüfmethoden gemessen werden . Für unterschiedliche Szenarien und Genauigkeitsanforderungen eignen sich unterschiedliche Methoden:

#### Vickershärte (HV)

**Bereich** : HV 1200–1800, bis zu HV 2000–2500 nach Oberflächenmodifizierung.

**Prinzip** : Verwenden Sie einen Vickers-Härteprüfer, einen Diamant-Viereckpyramiden-Eindringkörper (Diagonalwinkel 136°), wenden Sie eine Standardlast (normalerweise 30 kg) an und berechnen Sie den Härtewert durch Messen der diagonalen Länge des Eindrucks. Die Formel lautet:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Dabei ist F die Last (kg) und d die diagonale Länge der Vertiefung (mm).

**Vorteile** : großer Messbereich, hohe Genauigkeit, geeignet für die Härteprüfung von Hartmetall und die am häufigsten verwendete Methode.

**Anwendung** : Wird zur Bewertung der Gesamthärte und der Härte mikroskopischer Bereiche wie Körner oder Beschichtungen verwendet.

#### Rockwellhärte (HRA)

**Bereich** : HRA 80–94 (Skala A).

**Prinzip** : Verwenden Sie ein Rockwell-Härteprüfgerät mit einem Diamantkegel-Eindringkörper

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Kegelwinkel 120°) und wenden Sie eine Last von 60 kg an, um die Eindringtiefe zu messen.

**Vorteile** : Schnelles Testen, geeignet für Tests im großen Maßstab.

**Einschränkungen** : Etwas geringere Genauigkeit bei superharten Materialien (wie Hartmetall), die oft zur vorläufigen Bewertung verwendet werden.

### Brinellhärte (HB)

**Bereich** : HB 1000–1600.

**Prinzip** : Verwenden Sie einen Hartmetallkugel-Eindringkörper (10 mm Durchmesser), wenden Sie eine hohe Last (z. B. 3000 kg) an und berechnen Sie die Härte durch den Eindringbereich. Die Formel lautet:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

### 7.0.1.2 Härtebeeinflussende Faktoren

Die Härte von Hartmetall wird durch verschiedene Mikrostrukturen und Prozessparameter beeinflusst. Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Analyse der wichtigsten Faktoren:

#### (1) WC-Korngröße

**Effekt**: Kristallgrößenverkleinerung, Härteerhöhung, folgt der Hall-Petch-Beziehung ( $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ ), wobei  $\sigma_y$  die Streckgrenze,  $d$  die Kristallgröße,  $k$  der Koeffizient (ca. 0,3 MPa·m<sup>1/2</sup>) ist. Härte und Streckgrenze sind proportional ( $HV \approx 3\sigma_y$ ).

**Daten**: Wenn die Korngröße von 2 µm auf 0,5 µm abnimmt, steigt die Härte von HV 1200 auf HV 1600, eine Zunahme von etwa 25–30 %. Wenn die Korngröße weiter auf <0,2 µm reduziert wird, kann die Härte HV 1800 erreichen, aber die Zähigkeit kann aufgrund von Korngrenzengleiten abnehmen.

**Mechanismus**: Kleine Körner erhöhen die Korngrenzendichte (>10<sup>13</sup> m<sup>-2</sup>), behindern die Versetzungsbewegung und erhöhen somit die Härte.

#### (2) Co-Gehalt

**Wirkung**: Co ist eine weiche Phase (Härte etwa HV 300), und eine Erhöhung seines Gehalts verringert die Härte des Hartmetalls.

**Daten**: Bei einem Co-Gehalt von 6–8 % beträgt die Härte HV 1600–1800; bei einem Co-Gehalt von 12–15 % sinkt die Härte auf HV 1200–1400.

**Mechanismus**: Bei hohem Co-Gehalt verringert sich der WC-Volumenanteil (der WC-Anteil sinkt von 90 % auf 70 %) und die Verformungsbeständigkeit der Hartphase nimmt ab.

#### (3) Zusatzstoffe

**Wirkung**: Zusätze wie VC (Vanadiumcarbid) oder Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> können das Kornwachstum hemmen und die Härte erhöhen.

**Daten**: Durch Zugabe von 0,2–0,5 % VC kann die Härte um 5–10 % auf bis zu HV 2000 erhöht werden. Wenn die Zugabemenge >0,8 % ist, können spröde Phasen (wie VC<sub>x</sub>) gebildet werden, die die Leistung verringern.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Mechanismus** : VC hemmt das Kornwachstum und verringert die Korngrenzenmigrationsrate ( $<10^{-10}$  m/s) durch Festlösungs- und Ausscheidungsverfestigung (Bildung einer dünnen VCx- Schicht mit einer Dicke von  $<20$  nm).

#### (4) Oberflächenmodifizierung

**Wirkung** : Verbesserung der Oberflächenhärte durch Techniken wie Aufkohlen, Ionenimplantation oder Laserauftragschweißen .

**Daten** : Durch Aufkohlen entsteht eine WC-reiche Schicht (Dicke  $10-30 \mu\text{m}$  ) mit einer Härte von bis zu HV 2000-2200; durch Laserauftragschweißen entsteht eine hochharte Schicht (Dicke  $50-100 \mu\text{m}$  ) mit einer Härte von bis zu HV 2500.

**Mechanismus** : Durch die Oberflächenmodifizierung werden Phasen mit hoher Härte (wie WC oder CrN ) und Restdruckspannungen ( $> 400$  MPa) eingeführt, um die Verformungsbeständigkeit zu erhöhen.

#### (5) Sinterprozess

**Wirkung** : Sintertemperatur und Atmosphäre beeinflussen Kornwachstum und Mikrostruktur.

**Daten** : Wenn die Sintertemperatur  $1400-1500^\circ\text{C}$  und der Vakuumgrad  $<10^{-2}$  Pa beträgt, kann die Korngröße auf  $<0,8 \mu\text{m}$  kontrolliert werden und die Härte erreicht HV 1600. Wenn die Temperatur  $>1550^\circ\text{C}$  und die Korngröße  $>2 \mu\text{m}$  beträgt , verringert sich die Härte um  $10-15\%$ .

**Mechanismus** : Hohe Temperaturen verursachen Kornwachstum und verringern den Effekt der Korngrenzenverstärkung.

### 7.0.1.3 Mikroskopischer Mechanismus der Härte

Der mikroskopische Mechanismus der Hartmetallhärte basiert hauptsächlich auf folgenden Aspekten:

#### (1) Hohe Härte der WC-Phase

WC (Wolframkarbid) ist ein superhartes Material mit einer Härte von bis zu HV 2000–2500, die sich aus seiner kovalenten Bindungsstruktur (WC-Bindungsenergie  $\sim 800$  kJ/mol) und seinem hohen Modul ( $E \approx 700$  GPa ) ergibt . Die WC-Phase macht  $70-90\%$  des Volumenanteils in Hartmetall aus und ist die Hauptquelle der Härte.

#### (2) Korngrenzenverfestigung (Hall-Petch-Effekt)

晶粒尺寸减小增加晶界密度, 晶界通过钉扎位错 (Orowan 强化,  $\tau \sim Gb/\lambda$ ,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ) 阻碍位错运动, 提高硬度和强度。晶界迁移速率 ( $<10^{-10}$  m/s) 受添加剂和烧结温度控制, 迁移能障约为  $80-120$  kJ/mol。

#### (3) Regelnde Wirkung der Co-Phase

Die Co-Phase (geringe Härte,  $HV \approx 300$ ) absorbiert einen Teil der Energie durch plastische Deformation (Dehnungsgeschwindigkeit  $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) und verringert die Spannungskonzentration, ein hoher Co-Gehalt verringert jedoch den Anteil der WC-Phase und verringert die Gesamthärte.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### (4) Grenzflächeneffekt

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung ( $>50$  MPa) zwischen WC und Co hat einen wesentlichen Einfluss auf die Härte. Die Benetzbarkeit von Co auf WC (Kontaktwinkel  $<15^\circ$ ) sorgt für eine niedrige Grenzflächenenergie ( $<1,5$  J/m<sup>2</sup>), bei ungleichmäßiger Co-Verteilung (Abweichung  $>1\%$ ) können sich jedoch Co-Pools (Größe  $>5$  μm) bilden, die die Härte mindern.

#### (5) Thermodynamische Stabilität

Die thermodynamische Stabilität von feinkörnigem WC wird anhand der Gibbs-Freienenergie ( $\Delta G < 0$ ) bewertet. Bei einer Korngröße  $<0,5$  μm dominiert die Grenzflächenenergie ( $>1,5$  J/m<sup>2</sup>) die Eigenschaftsänderungen und kann Mikrorisse (Länge 0,05-0,1 μm) verursachen, die die Härte beeinträchtigen.

#### 7.0.1.4 Anwendungsbedeutung der Härte

Die hohe Härte von Hartmetall ist sein Hauptvorteil bei industriellen Anwendungen, insbesondere in den folgenden Szenarien:

##### Luftfahrtwerkzeuge

**Anforderungen** : Schnittgeschwindigkeit  $> 800$  m/min, hohe Belastung und Reibung.

**Leistung** : Die Schnittlebensdauer eines WC-10Co-Werkzeugs mit einer Härte von HV 1600 kann 15 Stunden erreichen, was 25 % höher ist als die eines Materials mit einer Härte von HV 1200.

**Mechanismus** : Hohe Härte reduziert den Werkzeugverschleiß ( $<0,1$  mm<sup>3</sup>/N·m) und verlängert die Werkzeuglebensdauer.

##### Bergbaubohrer

**Anforderungen** : Bohren in hartem Gestein (Gesteins Härte  $> 800$  HV), hohe Reibungs- und Schlagfestigkeit erforderlich.

**Leistung** : WC-8Co-Bohrer mit Härte HV 1700, Bohrdistanz  $>1200$  m, eine Steigerung von 40 %.

**Mechanismus** : Hohe Härte reduziert abrasiven Verschleiß (Rillenbreite  $<10$  μm) und verbessert die Haltbarkeit.

##### Verschleißfeste Form

**Anforderungen** : Hochfrequenzextrusion ( $>10^6$ -fach), Verschleiß- und Verformungsbeständigkeit.

**Leistung** : WC-12Co-Matrize mit Härte HV 1600, Extrusionszeiten  $>10^6$  mal.

**Mechanismus** : Eine hohe Härte gewährleistet die Widerstandsfähigkeit der Formoberfläche gegen Eindrücke und verlängert ihre Lebensdauer.

##### Hohe Temperaturen

**Anforderung** : Schneiden bei hohen Temperaturen ( $> 800$  °C), beispielsweise bei der Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt.

**Leistung** : Hartmetall mit Härte HV 2000 (nach dem Aufkohlen) hat eine Lebensdauer von 20 Stunden, eine Steigerung von 30 %.

**Mechanismus** : Hohe Härte und Oxidschicht (WO<sub>3</sub>, Dicke  $\sim 2$  μm) reduzieren gemeinsam den

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Hochtemperaturverschleiß.

#### 7.0.1.5 Kompromiss zwischen Härte und Zähigkeit

- Unterschied zwischen der Härte und der Zähigkeit ( $K_{IC}$ ) von Hartmetall:

Eine hohe Härte ( $HV > 1600$ ) geht meist mit einer geringen Zähigkeit ( $K_{IC} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) einher, die aufgrund feiner Körner ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) oder eines geringen Co-Gehalts ( $< 6\%$ ) leicht zu Sprödbrüchen führen kann.

Für eine hohe Zähigkeit ( $K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) ist eine Erhöhung des Co-Gehalts ( $> 12\%$ ) oder der Korngröße ( $1 - 2 \mu\text{m}$ ) erforderlich, allerdings nimmt dadurch die Härte ab ( $HV < 1400$ ), was sich wiederum auf die Verschleißfestigkeit auswirkt.

#### Zu den Optimierungsstrategien gehören:

Die gewählte Korngröße beträgt  $0,5 - 1 \mu\text{m}$ , der Co-Gehalt beträgt  $8 - 12\%$ , die Härte beträgt  $HV 1500 - 1600$ ,  $K_{IC} 12 - 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Durch Zugabe von VC/ TaC ( $0,2 - 0,5\%$ ) kann die Härte um  $3 - 5\%$  erhöht werden, während die Zähigkeit erhalten bleibt.

Hat eine Gradientenstruktur (Oberflächen-Co  $6\%$ , Innen-Co  $12\%$ ), Oberflächenhärte  $HV 1600$ , Innen-Co  $K_{IC} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

#### 7.0.1.6 Zusammenfassung

Die Härte von Hartmetall ist der wichtigste Indikator für seine Widerstandsfähigkeit gegen Verformung und Verschleiß. Sie liegt typischerweise zwischen  $1200$  und  $1800 \text{ HV}$  und erreicht maximal  $2500 \text{ HV}$ . Die Härte wird hauptsächlich durch die hohe Härte und Korngrenzenverfestigung der WC-Phase bestimmt und von Faktoren wie Korngröße, Co-Gehalt, Additiven und Oberflächenmodifizierung beeinflusst. Durch die Optimierung der Mikrostruktur und der Prozessparameter kann Hartmetall in Bereichen wie der Luftfahrt, dem Bergbau und dem Formenbau eine hervorragende Haltbarkeit und Zuverlässigkeit aufweisen. Zukünftig kann der Einsatz von KI und IIoT -Technologie (Industrial Internet of Things) die Härtekonsistenz und die Effizienz der Leistungsoptimierung weiter verbessern.

### 7.0. 2. Bruchzähigkeit von Hartmetall

Die Bruchzähigkeit von Hartmetall (WC-Co) beschreibt die Widerstandsfähigkeit gegen Rissausbreitung und Bruch. Sie ist ein wichtiger Indikator für die Zuverlässigkeit von Werkstoffen unter hoher Beanspruchung oder Stoßbelastung. Im Folgenden werden Definition, Messmethode, Einflussfaktoren, mikroskopische Mechanismen und Anwendungsbedeutung detailliert erläutert.

#### 7.0.2.1. Definition der Bruchzähigkeit von Hartmetall

Die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) beschreibt die Widerstandsfähigkeit von Hartmetall gegen Rissausbreitung bei vorhandenen Rissen oder Defekten. Die Einheit ist  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ . Die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Bruchzähigkeit von Hartmetall liegt üblicherweise zwischen 8 und 16 MPa·m<sup>1/2</sup> und spiegelt die Widerstandsfähigkeit gegen Sprödbbruch unter hoher Belastung oder Stoßbelastung wider. Die Bruchzähigkeit hängt hauptsächlich von der plastischen Verformbarkeit der Bindephase Co und der korngrenzenverstärkenden Wirkung der WC-Phase ab und spiegelt das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit des Hartmetalls wider.

#### 7.0.2.2. Messverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall

Die Bruchzähigkeit wird üblicherweise mit standardisierten Prüfverfahren gemessen. Gängige Methoden sind:

##### Einkantiger Kerbträger (SENB)

Prinzip: An der Probe wird eine V-förmige oder gerade Kerbe vorgefertigt, eine Dreipunkt-Biegebelastung angewendet und die maximale Spannung vor Rissausbreitung gemessen. Die Formel lautet:

**原理:** 在试样上预制 V 型或直边缺口, 采用三点弯曲加载, 测量裂纹扩展前的最大应力。公式为:

$$K_{Ic} = \frac{P \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中  $P$  为载荷,  $S$  为支座间距,  $B$  和  $W$  分别为试样厚度和宽度,  $a$  为裂纹长度,  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  为几何修正因子。

Bedingungen: Die Probengröße beträgt üblicherweise 55 × 10 × 10 mm und die Kerbtiefe beträgt etwa 2 mm.

Vorteile: Geeignet für die genaue Messung von Hartmetall, wird häufig in Industriestandards verwendet.

##### Einrückungsmethode

von  $K_{Ic}$  aus der Risslänge des Vickershärteeindrucks, basierend auf einer empirischen Formel für Risswachstum.

Vorteile: Keine aufwendige Probenvorbereitung nötig, für Schnelltests geeignet.

Einschränkungen: Geringe Genauigkeit, geeignet für vorläufige Auswertung.

Für spezielle Forschungsszenarien eignen sich weitere Verfahren, wie beispielsweise das Doppelbalkenverfahren (DCB) oder das Kompaktspannungsverfahren (CT).

Aufgrund ihrer hohen Genauigkeit und Standardisierung hat sich die SENB-Methode zur gängigen Methode für die Prüfung der Bruchzähigkeit von Hartmetall entwickelt.

#### 7.0.2.3. Faktoren, die die Bruchzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

Der Grad der Bruchzähigkeit wird durch eine Reihe mikrostruktureller und prozesstechnischer Parameter beeinflusst, und zwar wie folgt:

##### Co-Inhalt

Wirkung: Co absorbiert als zähe Phase Rissenergie durch plastische Verformung. Je höher der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gehalt, desto besser die Zähigkeit.

Daten: Bei einem Co-Gehalt von 6 % beträgt  $K_{Ic}$  etwa  $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; bei einem Co-Gehalt von 12–15 % kann  $K_{Ic}$   $14-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erreichen.

Mechanismus: Ein steigender Co-Gehalt ( $>10\%$ ) verbessert die plastische Dissipation (Dehnungsrate  $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), verringert jedoch die Härte ( $\text{HV} < 1400$ ).

### Körnung

Wirkung: Die Korngröße hat einen doppelten Effekt auf die Zähigkeit und eine moderate Größe optimiert die Leistung.

Bei groben Körnern (z. B.  $1-2 \mu\text{m}$ ) beträgt  $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; bei zu feinen Körnern (z. B.  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) beträgt  $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  aufgrund des Gleitens an den Korngrenzen (Geschwindigkeit  $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$ ).

Mechanismus: Grobe Körner verringern die Korngrenzendichte ( $< 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ) und verringern so den Widerstand gegen Rissausbreitung; zu feine Körner erhöhen die Korngrenzendefekte, wodurch leicht Mikrorisse entstehen können.

### Zusatzstoff

Wirkung: Additive können Korngrenzen verstärken oder die Mikrostruktur optimieren und die Zähigkeit verbessern.

TaC hinzufügen ( $0,2-0,5\%$ ) kann  $K_{Ic}$  um etwa  $5-10\%$  erhöhen; die Zugabe von VC ( $> 0,8\%$ ) kann eine spröde Phase bilden und die Zähigkeit verringern.

Mechanismus: TaC erhöht die Bindungsstärke an Korngrenzen ( $> 150 \text{ MPa}$ ) und reduziert intergranulare Brüche.

### Sinterprozess

Auswirkung: Sintertemperatur und -zeit beeinflussen die Co-Verteilung und die Korngrenzenstabilität.

Daten: Wenn die Sintertemperatur  $1400-1500^\circ\text{C}$  und die Sinterzeit  $1-3$  Stunden beträgt, ist  $K_{Ic}$  bei  $12-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  stabil; bei  $> 1550^\circ\text{C}$  ist die Co-Seigerungsrate  $> 1\%$  und  $K_{Ic}$  nimmt um  $5-10\%$  ab.

Mechanismus: Hohe Temperaturen führen zur Bildung von Co-Pools (Größe  $> 5 \mu\text{m}$ ), die die Zähigkeit verringern.

#### 7.0.2.4. Mikroskopischer Mechanismus der Bruchzähigkeit von Hartmetall

Der mikroskopische Mechanismus der Bruchzähigkeit umfasst im Wesentlichen folgende Aspekte:

**Plastische Deformation der Co-Phase** Die Co-Phase absorbiert Rissenergie durch plastische Deformation (Dehnung  $\sim 0,05\%-0,1\%$ ) und verzögert die Rissausbreitung. Bei einem Co-Gehalt von  $10\%$  ist die plastische Dissipation erheblich und der  $K_{Ic}$ -Wert kann  $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erreichen.

#### Rissablenkung an WC-Korngrenzen

WC-Korngrenzen ( $0,5-1 \mu\text{m}$ ) vergrößern die Rissausbreitungslänge und reduzieren die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rissausbreitungsgeschwindigkeit ( $<10^{-2}$  m/s) durch Rissablenkung (Winkel  $20^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ). Bei groben Körnern ( $>1 \mu\text{m}$ ) ist der Ablenkungseffekt stärker ausgeprägt.

### Grenzflächenbindung

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung ( $>50 \text{ MPa}$ ) zwischen WC und Co wird durch Co-Benetzung (Kontaktwinkel  $<15^{\circ}$ ) erreicht, die Grenzflächenenergie beträgt  $<1,5 \text{ J/m}^2$ . Bei vielen Grenzflächendefekten ( $>0,5\%$ ) nimmt die Zähigkeit ab.

### zur Unterdrückung von Mikrorissen

(wie etwa TaC) verhindern die Entstehung von Mikrorissen (Länge  $< 0,05 \text{ mm}$ ) durch die Festlösungsverfestigung (Korngrenzenabstand  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) und erhöhen so den  $K_{Ic}$ -Wert um 5–10 %.

### 7.0.2.5. Anwendungsbedeutung der Bruchzähigkeit von Hartmetall

Die Bruchzähigkeit ist bei der praktischen Anwendung von Hartmetall von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei hohen Stoß- und zyklischen Belastungsszenarien:

#### Luftfahrtwerkzeuge

Anforderungen: Schnittgeschwindigkeit  $> 800 \text{ m/min}$ , muss hohen Stößen und zyklischer Belastung standhalten.

Leistung: WC-8Co-Werkzeug mit  $K_{Ic} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Lebensdauer  $>15$  Stunden.

Mechanismus: Hohe Zähigkeit reduziert das Risswachstum (Rate  $<10^{-6} \text{ mm/Zyklus}$ ) und verlängert die Lebensdauer.

#### Bergbaubohrer

Anforderungen: Bohren in hartem Gestein (Frequenz  $> 500 \text{ Hz}$ ), hohe Schlagfestigkeit erforderlich.

Leistung: WC-10Co-Bohrer mit  $K_{Ic} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Bohrdistanz  $>1200 \text{ m}$ .

Mechanismus: Hohe Zähigkeit absorbiert Aufprallenergie ( $>18 \text{ J}$ ) und verringert das Bruchrisiko.

#### Verschleißfeste Form

Anforderungen: Hochfrequenzextrusion ( $>10^6$ -fach), Dauerbruchfestigkeit ist erforderlich.

Eigenschaften: WC-12Co-Matrize mit  $K_{Ic} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Extrusionszeiten  $>10^6$ .

Mechanismus: Hohe Zähigkeit verzögert das Wachstum von Mikrorissen (Länge  $< 0,1 \text{ mm}$ ).

#### Tiefseebedingungen

Anforderungen: Druck  $> 80 \text{ MPa}$ , Spannungskorrosionsbeständigkeit erforderlich.

Eigenschaften: Gradientenstrukturkarbid mit  $K_{Ic} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Lebensdauer  $>4$  Jahre.

Mechanismus: Hohe Zähigkeit und Oberflächenschutz reduzieren die Ausbreitung von Korrosionsrissen.

### 7.0.2.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Bruchzähigkeit von Hartmetall

Zur Verbesserung der Bruchzähigkeit können folgende Strategien eingesetzt werden:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimierung der Mikrostruktur: Wählen Sie eine Korngröße von  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ , einen Co-Gehalt von  $10\text{--}12\%$ ,  $K_{1c}$  kann  $12\text{--}14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  erreichen.

Additivkontrolle: Durch Zugabe von  $0,2\text{--}0,5\%$  TaC kann  $K_{1c}$  um  $5\text{--}10\%$  erhöht werden.

Oberflächenverstärkung: Tragen Sie eine TiN-Beschichtung (Dicke  $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ ) auf, um die Entstehung von Oberflächenrissen zu verringern und  $K_{1c}$  um  $5\text{--}10\%$  zu erhöhen.

KI und IIoT: Verwenden Sie KI, um die Co-Verteilung und Korngrenzenstabilität vorherzusagen (Fehler  $<0,2\%$ ), und kombinieren Sie IIoT, um die Rissausbreitung in Echtzeit zu überwachen (Genauigkeit  $\pm 0,02\text{ mm}$ ) und die Zähigkeitskonsistenz zu verbessern (Abweichung  $<0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

Die Bruchzähigkeit steht im Mittelpunkt der Leistungsoptimierung von Hartmetall, insbesondere unter extremen Arbeitsbedingungen. Durch die Optimierung der Mikrostruktur und der Prozessparameter kann Hartmetall die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie Luftfahrt, Bergbau und Tiefsee erfüllen. Zukünftig wird die Integration von KI und industriellen IoT-Technologien die Zähigkeitsverbesserung und die Anwendungserweiterung weiter vorantreiben.

### 7.0.3. Druckfestigkeit von Hartmetall

Die Druckfestigkeit von Hartmetall (WC-Co) ist ein wichtiger Indikator für die mechanische Festigkeit und gibt Aufschluss über die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Druckbelastungen und Sprödbbruch. Im Folgenden werden Definition, Messmethode, Einflussfaktoren, mikroskopische Mechanismen, Anwendungsbedeutung, Optimierung und zukünftige Entwicklung detailliert erläutert. Weitere Details und Daten vertiefen die Analyse.

#### 7.0.3.1. Definition der Druckfestigkeit von Hartmetall

Die Druckfestigkeit ist die maximale Spannung, bevor das Material unter unidirektionaler Druckbelastung von Hartmetall versagt. Sie wird in MPa gemessen und liegt typischerweise zwischen  $4000$  und  $6000\text{ MPa}$ . Die Druckfestigkeit ist ein wichtiger Parameter für Hartmetall unter Hochlastbedingungen. Sie wird hauptsächlich durch den ultrahohen Modul (ca.  $700\text{ GPa}$ ) und die korngrenzenverstärkende Wirkung der Hartphase Wolframkarbid (WC) unterstützt und gleichzeitig durch die plastischen Eigenschaften der Bindephase Kobalt (Co) geregelt. Die Höhe der Druckfestigkeit bestimmt direkt die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit von Hartmetall in Umgebungen mit extremem Druck (wie in der Tiefsee oder beim Hochgeschwindigkeitsschneiden). Beispielsweise liegt die Druckfestigkeit der WC-10Co-Legierung üblicherweise zwischen  $4500$  und  $5000\text{ MPa}$ , und der genaue Wert variiert je nach Mikrostruktur und Prozessparametern.

#### 7.0.3.2. Verfahren zur Messung der Druckfestigkeit von Hartmetall

Die Druckfestigkeit wird durch einen standardisierten Druckversuch ermittelt. Im Folgenden sind die spezifischen Methoden und relevanten Details aufgeführt:

Kompressionstest

Prinzip: Mit einer Universalprüfmaschine oder einer speziellen Druckprüfmaschine wird eine zylindrische oder kubische Probe einer einseitigen Druckbelastung ausgesetzt, bis sie plastisch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



verformt wird oder spröde bricht. Die maximale Spannung wird aufgezeichnet. Die Formel lautet:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

其中  $\sigma_c$  为抗压强度 (MPa),  $F$  为破坏时的最大载荷 (N),  $A$  为试样初始截面面积 (mm<sup>2</sup>).

Testbedingungen:

Probengeometrie: zylindrisch (10 mm Durchmesser, 20 mm Höhe) oder kubisch (10 × 10 × 10 mm), mit einem Durchmesser-Höhen-Verhältnis von typischerweise 1:2, um Tonneneffekte zu vermeiden.  
Belastungsrate: 0,5–1 mm/min. Langsam belasten, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung zu gewährleisten.

Umgebungsbedingungen: Raumtemperatur (20–25 °C), Luftfeuchtigkeit < 50 %, Störungen durch Umwelteinflüsse vermeiden.

Vorteile: Spiegelt die Tragfähigkeitsgrenze des Materials unter Druck direkt wider und die Testergebnisse korrelieren stark mit den tatsächlichen Anwendungsszenarien.

Einschränkungen: Die Probe muss frei von anfänglichen Defekten sein (z. B. Porosität <1 %), da sonst das Ergebnis niedrig ausfällt; die Probengeometrie und Reibungseffekte können zu Fehlern führen, die die Anwendung von Schmiermitteln oder Korrekturfaktoren erforderlich machen.

Ergänzende Technologie: Eine Kombination aus Dehnungsmessstreifen zur Messung von Quer- und Längsdehnungen und zur Berechnung der Poissonzahl ( $\nu \approx 0,2–0,25$ ) verifiziert die Druckfestigkeit zusätzlich.

Das Druckprüfverfahren ist eine Standardmethode zur Messung der Druckfestigkeit von Hartmetall und wird in der Industrie und der wissenschaftlichen Forschung häufig eingesetzt.

### 7.0.3.3. Faktoren, die die Druckfestigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Druckfestigkeit wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter Mikrostruktur, Zusammensetzung und Herstellungsverfahren. Die spezifische Analyse lautet wie folgt:

#### WC-Korngröße

Wirkung: Die Kornverfeinerung steigert die Druckfestigkeit durch Erhöhung der Korngrenzendichte.

: Bei einer Verfeinerung der Korngröße von 2 µm auf 0,2–0,5 µm steigt die Druckfestigkeit von 4000 MPa auf >4500 MPa, sogar bis zu 5000 MPa, bei einer Korngröße >2 µm sinkt die Druckfestigkeit auf 3500–4000 MPa.

Mechanismus: Feine Körner (<0,5 µm) gemäß der Hall-Petch-Beziehung

机理: 细小晶粒 (<0.5 µm) 依据 Hall-Petch 关系 ( $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ ,  $k \approx 0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )

Verbesserte Streckgrenze, Korngrenzendichte  $>10^{13} \text{ m}^{-2}$  behindert wirksam die Versetzungsbewegung.

Bei zu feiner Körnung (<0,2 µm) kann es aufgrund vermehrter Korngrenzendefekte (>0,5%) zur Entstehung von Mikrorissen kommen und die Druckfestigkeit kann um 5-10% sinken.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### Co-Inhalt

Auswirkung: Ein zu hoher Co-Gehalt schwächt die Druckfestigkeit.

Daten: Bei einem Co-Gehalt von 8–12 % bleibt die Druckfestigkeit stabil bei 4.500–5.000 MPa, bei einem Co-Gehalt von >15 % sinkt die Druckfestigkeit auf <3.500 MPa, bei einem Co-Gehalt von <6 % kann die Druckfestigkeit 5.000–6.000 MPa erreichen, aber die Zähigkeit nimmt ab ( $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

Mechanismus: Co ist eine weiche Phase (Härte  $HV \approx 300$ ). Ein hoher Gehalt (>15 %) reduziert den WC-Volumenanteil (<70 %), macht das Material weicher und verringert die Drucktragfähigkeit. Ein niedriger Co-Gehalt erhöht den WC-Phasenanteil, neigt aber zu Sprödbbruch.

Optimierungsbereich: Ein Co-Gehalt von 10 % gilt als bester Wert für das Gleichgewicht zwischen Druckfestigkeit und Zähigkeit.

### Mikrostruktur

Wirkung: Durch die homogene Mikrostruktur werden die Druckeigenschaften deutlich verbessert.

Daten: Wenn die Korngrenzendichte  $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$  und die Porosität <1 % ist, beträgt die Druckfestigkeit >5000 MPa; wenn die Korngrenzendefektrate >2 % oder die Porosität >2 % ist, verringert sich die Druckfestigkeit um 10–15 %.

机理: 均匀分布的 WC 相和 Co 相减少应力集中, 晶界通过 Orowan 强化 ( $\tau \sim Gb/\lambda$ ,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ) 钉扎位错, 增强抗压能力; 孔隙或缺陷 (如尺寸  $> 5 \mu\text{m}$ ) 成为应力集中源, 降低强度。

Prozesseinfluss: Durch kaltsostatisches Pressen (CIP, Druck 200–300 MPa) kann die Dichte auf >99% erhöht und damit die Druckfestigkeit deutlich verbessert werden.

### 7.0.3.4. Mikromechanismus der Druckfestigkeit von Hartmetall

Der mikroskopische Mechanismus der Druckfestigkeit umfasst folgende Aspekte:

#### Hoher Modul der WC-Phase

Der Elastizitätsmodul der WC-Phase ( $E \approx 700 \text{ GPa}$ ) bietet eine hohe Druckfestigkeit und widersteht Druckverformungen. Der WC-Volumenanteil von 70–90 % ist die Hauptquelle der Druckfestigkeit, und seine kovalente Bindungsstruktur (WC-Bindungsenergie  $\sim 800 \text{ kJ/mol}$ ) gewährleistet eine ausgezeichnete Druckfestigkeit.

#### Korngrenzenverfestigung

Eine hohe Korngrenzendichte ( $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ) behindert die Versetzungsbewegung durch den Orowan-Verfestigungsmechanismus. Bei einer Korngröße  $< 0,5 \mu\text{m}$  ist der Verstärkungseffekt signifikant, und die Druckfestigkeit kann um 20–30 % steigen. Die Korngrenzenwanderungsrate ( $< 10^{-10} \text{ m/s}$ ) wird durch die Sintertemperatur (1400–1500 °C) gesteuert.

#### Plastische Regulierung der Co-

Phase Die Co-Phase (Härte  $HV \approx 300$ ) absorbiert die Druckenergie durch plastische Deformation (Dehnungsgeschwindigkeit  $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) und verhindert so sprödes Versagen. Bei 10 % Co-Gehalt optimiert die plastische Dissipation das Verhältnis zwischen Druckfestigkeit und Zähigkeit.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Grenzflächenstabilität**

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung ( $>50$  MPa) zwischen WC und Co wird durch Co-Benetzung (Kontaktwinkel  $<15^\circ$ ) und Grenzflächenenergie  $<1,5$  J/m<sup>2</sup> erreicht. Bei vielen Grenzflächendefekten ( $>0,5\%$ ), wie z.B. Co-Pools (Größe  $>5$   $\mu\text{m}$ ), verringert sich die Druckfestigkeit um 10-15%.

### **Thermischer Spannungseffekt**

Die Sinterkühlrate ( $3\text{--}5$   $^\circ\text{C}/\text{min}$ ) steuert die thermische Spannung ( $<100$  MPa). Zu schnelles Abkühlen ( $>10$   $^\circ\text{C}/\text{min}$ ) kann zu Mikrorissen führen und die Druckfestigkeit um 5–10 % reduzieren.

### **7.0.3.5. Anwendungsbedeutung der Druckfestigkeit von Hartmetall**

Aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit wird Hartmetall häufig in Umgebungen mit hoher Belastung und extremen Bedingungen eingesetzt. Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Analyse spezifischer Szenarien:

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

Anforderungen: Hält beim Schneiden lokalem Druck  $>4000$  MPa stand und erfordert eine hohe Druckfestigkeit, um die Kantenintegrität aufrechtzuerhalten.

Leistung: WC-10Co-Werkzeuge mit einer Druckfestigkeit von 5000 MPa haben eine Lebensdauer von  $>15$  Stunden bei Schnittgeschwindigkeiten  $>800$  m/min, was 25 % höher ist als bei Materialien mit einer Druckfestigkeit von 4000 MPa.

Mechanismus: Hohe Druckfestigkeit reduziert die Verformung durch Kantenkompression (Dehnung  $<0,1$  %) und gewährleistet Schnittgenauigkeit und Haltbarkeit.

#### **Tiefseebohrung**

Anforderungen: Arbeiten in Tiefseeumgebungen mit Drücken  $>80$  MPa, muss hohen Druckbelastungen und Meerwasserkorrosion standhalten.

Leistung: WC-8Co-Bohrer mit Druckfestigkeit von 5500 MPa, Bohrdistanz  $>1500$  m, um 40 % verbesserte Druckbeständigkeit und auf 5 Jahre verlängerte Lebensdauer.

Mechanismus: Hohe Druckfestigkeit, um dem hohen Druck in der Tiefsee ( $>80$  MPa) standzuhalten, kombiniert mit einer CrN-Beschichtung (Dicke  $2\text{--}4$   $\mu\text{m}$ ), um Korrosionseffekte zu reduzieren.

#### **Druckfeste Form**

Anforderungen: Hochfrequenzextrusion ( $>10^6$ -fach) muss lokal hohem Druck ( $>5000$  MPa) standhalten, um Verformungen oder Brüche zu vermeiden.

Leistung: WC-12Co-Matrize mit 6000 MPa Druckfestigkeit, Extrusionszeiten  $>10^6$  mal, 30 % höher als Matrize mit 4500 MPa Druckfestigkeit.

Mechanismus: Hohe Druckfestigkeit reduziert Eindrücke in der Formoberfläche (Tiefe  $<0,5$   $\mu\text{m}$ ) und verlängert die Lebensdauer.

#### **Hohe Temperaturen**

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

Anforderungen: Das Schneiden bei hohen Temperaturen ( $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) erfordert eine hohe Beständigkeit gegenüber thermischer Belastung, wie beispielsweise bei der Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt.

Leistung: Hartmetall mit Gradientenstruktur (6 % Co an der Oberfläche, 12 % im Inneren) mit einer Druckfestigkeit von 4500 MPa, einer Lebensdauer von  $> 4000$  Stunden bei  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 35 % höher als bei gewöhnlichen Materialien.

Mechanismus: Hohe Druckfestigkeit kombiniert mit einer Oxidschicht ( $\text{WO}_3$ , Dicke  $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ ), um einer Kompression bei hohen Temperaturen standzuhalten und die thermische Spannung ( $< 150\text{ MPa}$ ) zu verringern.

### 7.0.3.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Druckfestigkeit von Hartmetall

Um die Druckfestigkeit weiter zu verbessern, können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### Mikrostrukturoptimierung:

Die Korngröße beträgt  $0,2\text{--}0,5\text{ }\mu\text{m}$ , und die Druckfestigkeit kann durch Hochenergie-Kugelmahlen (Geschwindigkeit  $300\text{--}500\text{ U/min}$ , Zeit  $20\text{--}40$  Stunden)  $5000\text{--}6000\text{ MPa}$  erreichen.

Der Co-Gehalt wird auf  $8\text{--}12\text{ }\%$  kontrolliert, um ein Gleichgewicht zwischen Druckfestigkeit und Zähigkeit ( $K_{IC} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) zu gewährleisten.

#### Additivkontrolle:

Durch Zugabe von  $0,2\text{--}0,5\text{ }\%$  VC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  kann die Korngrenzenfestigkeit um  $5\text{--}10\text{ }\%$  und die Druckfestigkeit um  $3\text{--}5\text{ }\%$  erhöht werden.

Vermeiden Sie Zugaben  $> 0,8\text{ }\%$ , um die Bildung spröder Phasen zu verhindern (Verhältnisse  $> 0,5\text{ }\%$ ).

#### Oberflächenverfestigung:

Durch das Aufbringen einer CrN-Beschichtung (Dicke  $2\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ , Härte HV  $3000\text{--}3500$ ) kann die Druckfestigkeit der Oberfläche verbessert und die Festigkeit um  $5\text{--}10\text{ }\%$  erhöht werden.

Durch Laserauftragschweißen (Leistung  $1,5\text{--}2,5\text{ kW}$ , Dicke  $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ ) wird eine Schicht mit hoher Härte gebildet, die die Druckfestigkeit um  $10\text{--}15\text{ }\%$  verbessert.

#### Prozessoptimierung:

Sintertemperatur  $1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Vakuumgrad  $< 10^{-2}\text{ Pa}$ , Dichte  $> 99\text{ }\%$ , Porosität  $< 1\text{ }\%$ .

Durch kaltsostatisches Pressen (CIP, Druck  $200\text{--}300\text{ MPa}$ ) werden Dichte und Druckfestigkeit um  $5\text{--}10\text{ }\%$  erhöht.

#### KI und IIoT :

Mithilfe von KI wurden die Korngrenzendichte und die Co-Verteilung vorhergesagt (Fehler  $< 0,2\text{ }\%$ ) und die Kugelmahlparameter wurden anhand historischer Daten optimiert (Genauigkeit  $\pm 0,5\text{ h}$ ).

In Kombination mit IIoT kann eine Echtzeitüberwachung der Spannungsverteilung (Genauigkeit  $\pm 10\text{ MPa}$ ) und der Korngröße (Abweichung  $< 0,005\text{ }\mu\text{m}$ ) erreicht werden, um die Konsistenz der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Druckfestigkeit (Abweichung <2 %) zu verbessern.

Am 1. Juni 2025 entwickelt das xAI -Team ein auf Deep Learning (DNN) basierendes Druckoptimierungsmodell, das die Vorhersagegenauigkeit der Druckfestigkeit auf  $\pm 50$  MPa erhöhen und so bei der Konstruktion von Tiefseebohrern helfen soll.

Die Druckfestigkeit ist die Kernleistung von Hartmetall unter Hochbelastung. Durch Optimierung der Mikrostruktur, der Prozessparameter und neuer Technologien kann es die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie der Luftfahrt, der Tiefsee und des Formenbaus erfüllen. Durch die intensive Anwendung von KI und dem industriellen Internet der Dinge (IIoT) werden die Druckfestigkeit und die Produktionseffizienz von Hartmetall weiter verbessert, und es werden in den nächsten zwei bis drei Jahren bedeutende Durchbrüche erwartet.

#### 7.0.4. Verschleißfestigkeit von Hartmetall

Die Verschleißfestigkeit von Hartmetall (WC-Co) ist die Fähigkeit, Oberflächenmaterialverlust und Verschleiß zu widerstehen. Sie ist ein wichtiger Leistungsindikator für die Haltbarkeit von Materialien in Umgebungen mit hoher Reibung oder abrasiven Eigenschaften. Im Folgenden werden Definition, Messmethode, Einflussfaktoren, mikroskopische Mechanismen, Anwendungsbedeutung, Optimierung und zukünftige Entwicklung detailliert erläutert.

##### 7.0.4.1. Definition der Verschleißfestigkeit von Hartmetall

Verschleißfestigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit von Hartmetall gegenüber Oberflächenverschleiß unter Reibung, abrasiven oder Kontaktbelastungen. Sie wird üblicherweise durch die Verschleißrate (Einheit:  $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ) oder das Verschleißvolumen gemessen. Hartmetall wird aufgrund seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit häufig in Anwendungen mit hohem Verschleiß eingesetzt. Diese ist hauptsächlich auf die hohe Härte (ca. HV 2000–2500) der Hartphase Wolframkarbid (WC) und die Zähigkeitsunterstützung durch die Bindephase Kobalt (Co) zurückzuführen. Die Verschleißfestigkeit wirkt sich direkt auf die Lebensdauer von Hartmetall beim Schneiden, Bohren und im Formenbau aus.

##### 7.0.4.2. Messverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall

Die Verschleißfestigkeit wird üblicherweise durch standardisierte Verschleißtests ermittelt. Im Folgenden sind gängige Methoden und relevante Details aufgeführt:

##### Sandfluss-Abriebtest (ASTM G65)

Prinzip: Sandfluss als Schleifmittel verwenden, Belastung aufbringen, um abrasiven Verschleiß zu simulieren, und den Volumenverlust der Probe nach dem Verschleiß messen. Die Formel zur Berechnung der Verschleißrate lautet:

$$W_r = \frac{V}{F \cdot L}$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Dabei ist  $W_r$  die Verschleißrate ( $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ),  $V$  das Verschleißvolumen ( $\text{mm}^3$ ),  $F$  die Last (N) und  $L$  die Gleitdistanz (m).

Testbedingungen:

Körnung:  $\text{SiO}_2$  (Härte  $> 800 \text{ HV}$ ).

Gleitgeschwindigkeit: 1–2 m/s, Dauer 30–60 Minuten.

Umgebung: Raumtemperatur (20–25 °C), Luftfeuchtigkeit  $< 50 \%$ .

Vorteile: Es simuliert tatsächliche abrasive Verschleißbedingungen und die Testergebnisse sind für industrielle Anwendungen äußerst relevant.

Einschränkungen: Die Partikelgröße und Gleichmäßigkeit des Sandes müssen kontrolliert werden und die Testergebnisse werden durch den Reibungskoeffizienten beeinflusst.

### Stift-auf-Scheibe-Verschleißtest (ASTM G99)

Prinzip: Die Probe fungiert als Stift, der mit einer rotierenden Scheibe in Kontakt steht, es wird eine Last angelegt und der Massenverlust oder die Tiefe nach dem Verschleiß gemessen.

Vorteile: Geeignet zur Beurteilung von Adhäsionsverschleiß und Oberflächenermüdungverschleiß.

Einschränkungen: Hohe Härteanforderungen an das Scheibenmaterial und die Notwendigkeit, den Reibungswärmeeffekt zu korrigieren.

### Dreikörper-Verschleißtest

Prinzip: Durch Einführen eines dritten Schleifmittels wird der Verschleiß unter komplexen Arbeitsbedingungen simuliert und die Breite und Tiefe der Verschleißnarben gemessen.

Vorteile: Näher an tatsächlichen Anwendungsszenarien, wie beispielsweise dem Verschleiß von Bohrmeißeln im Bergbau.

Der Sandflussverschleißtest (ASTM G65) hat sich aufgrund seiner starken Simulation und seines hohen Standardisierungsgrades zur gängigen Methode zum Testen der Verschleißfestigkeit von Hartmetall entwickelt.

### 7.0.4.3. Faktoren, die die Verschleißfestigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Verschleißfestigkeit wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter Mikrostruktur, Zusammensetzung, Arbeitsbedingungen und Umweltfaktoren. Die spezifische Analyse lautet wie folgt:

#### Härte

**效应:** 硬度越高, 耐磨性越好, 遵循 Archard 磨损公式 ( $V = k \cdot F \cdot L / H$ ,  $H$  为硬度)。

Mechanismus: Hohe Härte reduziert die Schnittiefe des Schleifmittels und die Breite der Oberflächenrille.

Einschränkung: Eine zu hohe Härte kann die Zähigkeit verringern und das Risiko von sprödem Verschleiß erhöhen.

#### Körnung

Wirkung: Eine Kornverfeinerung verbessert im Allgemeinen die Verschleißfestigkeit, eine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

übermäßige Kornverfeinerung kann jedoch negative Auswirkungen haben.

Mechanismus: Eine moderate Korngröße erhöht die Korngrenzendichte und behindert das Eindringen von Schleifpartikeln; zu feine Körner können Korngrenzendefekte verursachen und zu Mikrorissen führen.

#### **Co-Inhalt**

Wirkung: Die Verschleißfestigkeit ist besser, wenn der Co-Gehalt moderat ist.

Mechanismus: Eine angemessene Menge an Co bietet plastische Unterstützung und verringert den adhäsiven Verschleiß. Ist der Co-Gehalt zu hoch, erweicht Co und erhöht den Materialverlust. Ist der Co-Gehalt zu niedrig, fehlt es an Zähigkeit und es besteht die Gefahr von sprödem Verschleiß.

#### **Betriebstemperatur**

Wirkung: Hohe Temperaturen verringern die Verschleißfestigkeit, insbesondere wenn der adhäsive Verschleiß dominiert.

Mechanismus: Hohe Temperaturen erweichen die Co-Phase, was zu erhöhtem Adhäsionsverschleiß und Materialübertragung führt.

#### **Oberflächenrauheit**

Wirkung: Oberflächenglätte verbessert die Verschleißfestigkeit.

Mechanismus: Geringe Rauheit verringert die anfänglichen Verschleißpunkte und verringert die Schleifmitteleinbettung.

#### **Umweltkorrosion**

Wirkung: Korrosive Umgebung beschleunigt den Verschleiß.

Mechanismus: Die saure Umgebung löst die Co-Phase auf, wodurch Korrosionslöcher entstehen und der Verschleiß zunimmt.

### **7.0.4.4. Mikromechanismus der Verschleißfestigkeit von Hartmetall**

Der mikroskopische Mechanismus der Verschleißfestigkeit umfasst folgende Aspekte:

#### **Hohe Härte der WC-Phase**

Die Härte der WC-Phase (HV 2000–2500) widersteht abrasivem Schneiden, verringert den Materialverlust an der Oberfläche und ist die Hauptquelle der Verschleißfestigkeit.

#### **Korngrenzenverstärkung**

Korngrenzen verhindern das Eindringen von Schleifpartikeln durch den Orowan-Verstärkungsmechanismus, und eine moderate Korngröße (0,5–1  $\mu\text{m}$ ) hat die beste Wirkung.

#### **Schmierwirkung der Co-Phase**

Bei entsprechender Menge der Co-Phase sorgt diese für Schmierung und plastische Dämpfung und verringert so den adhäsiven Verschleiß; ist sie zu hoch, verstärkt sie den Materialtransfer.

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

### **Die Oberflächenoxidschicht**

bildet bei hohen Temperaturen eine  $WO_3$ -Oxidschicht, um den Verschleiß zu verringern, aber eine ungleichmäßige Schichtdicke kann zum Abblättern führen.

### **Verschleißart**

Abrasiver Verschleiß: Harte Partikel schneiden in die Oberfläche und bilden Rillen.

Adhäsiver Verschleiß: Durch Erweichen von Co bei hohen Temperaturen kommt es zur Materialübertragung.

Ermüdungverschleiß: Die Ausbreitung von Mikrorissen unter zyklischer Belastung verstärkt den Verschleiß.

### **7.0.4.5. Anwendungsbedeutung der Verschleißfestigkeit von Hartmetall**

Dank seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit eignet sich Hartmetall hervorragend für Anwendungen mit hoher Reibung. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

Anforderungen: Schnittgeschwindigkeit  $> 800$  m/min, muss hoher Reibung und abrasivem Verschleiß standhalten.

Mechanismus: Hohe Härte reduziert den Schneidkantenverschleiß.

#### **Bergbaubohrer**

Anforderungen: Bohren in hartem Gestein (Gesteinhärte  $> 800$  HV), muss abrasivem Verschleiß standhalten.

Mechanismus: Durch die Kornverfeinerung wird die Rillenbreite reduziert und die Lebensdauer verlängert.

#### **Verschleißfeste Form**

Anforderungen: Hochfrequenzextrusion ( $> 10^6$ -fach), muss Oberflächenverschleiß standhalten.

Mechanismus: Geringe Oberflächenrauheit reduziert den anfänglichen Verschleißpunkt.

#### **Hohe Temperaturen**

Anforderung: Schneiden bei hohen Temperaturen ( $> 800$  °C), beispielsweise bei der Bearbeitung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt.

Mechanismus: Die Oberflächenbeschichtung reduziert den Klebstoffverschleiß bei hohen Temperaturen.

### **7.0.4.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Verschleißfestigkeit von Hartmetall**

Um die Verschleißfestigkeit weiter zu verbessern, können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### **Mikrostrukturoptimierung:**

Die Korngröße von  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$  wird ausgewählt und durch Hochenergie-Kugelmahlen erreicht, um die Verschleißfestigkeit zu optimieren.

Der Co-Gehalt wird auf  $8\text{--}12\%$  kontrolliert, um ein Gleichgewicht zwischen Plastizität und Härte herzustellen.

#### **Additivkontrolle:**

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

Durch Zugabe einer kleinen Menge VC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  kann die Korngrenzenfestigkeit erhöht und der Verschleiß verringert werden.

Vermeiden Sie eine übermäßige Zugabe, um die Bildung einer spröden Phase zu verhindern.

#### **Oberflächenverfestigung:**

Tragen Sie eine CrN -Beschichtung auf, um die Oberflächenhärte zu erhöhen und die Verschleißrate zu verringern.

Durch Laserauftragschweißen wird eine Schicht mit hoher Härte gebildet, die die Verschleißfestigkeit weiter verbessert.

#### **Prozessoptimierung:**

Sintertemperatur 1400–1500 °C, Vakuumgrad  $<10^{-2}$  Pa, gewährleistet hohe Dichte.

Die Oberfläche ist auf eine geringe Rauheit poliert, um den anfänglichen Verschleiß zu verringern.

#### **KI und IIoT :**

Nutzen Sie KI, um das Verschleißverhalten vorherzusagen und das Mikrostrukturdesign zu optimieren.

In Kombination mit IIoT kann die Echtzeitüberwachung des Reibungskoeffizienten und des Oberflächenzustands die Beständigkeit der Verschleißfestigkeit verbessern .

Verschleißfestigkeit ist die Kernleistung von Hartmetall unter hohen Reibungsbedingungen. Durch Optimierung der Mikrostruktur, Oberflächenbehandlung und neue Technologien kann es die hohen Anforderungen der Luftfahrt, des Bergbaus und der Hochtemperaturverarbeitung erfüllen. Durch die intensive Anwendung von KI und dem industriellen Internet der Dinge ( IIoT ) dürften sich Verschleißfestigkeit und Produktionseffizienz von Hartmetall in den nächsten zwei bis drei Jahren deutlich verbessern.

### **7.0.5. Dauerfestigkeit von Hartmetall**

Die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall (WC-Co) beschreibt seine Fähigkeit, Ermüdungsbrüchen und Rissausbreitung unter zyklischer Belastung zu widerstehen. Sie ist ein wichtiger Indikator für mechanische Eigenschaften zur Messung der Haltbarkeit von Werkstoffen im Langzeiteinsatz. Im Folgenden werden Definition, Messmethode, Einflussfaktoren, Mikromechanismus, Anwendungsbedeutung, Optimierung und zukünftige Entwicklung detailliert erläutert.

#### **7.0.5.1. Definition der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall**

Unter Ermüdungsbeständigkeit versteht man die Fähigkeit von Hartmetall, der Entstehung und dem Wachstum von Ermüdungsrissen unter wiederholten Be- und Entlastungsbedingungen zu widerstehen. Sie wird üblicherweise durch die Lebensdauer (Anzahl der Zyklen) oder die Risswachstumsrate ( $da/dN$ ) charakterisiert . Die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall beruht hauptsächlich auf der Härte der Hartphase Wolframkarbid (WC) und der Zähigkeitsunterstützung durch die Bindephase Kobalt (Co), die für hochfrequente zyklische Belastungsszenarien geeignet ist, wie z. B. den Langzeiteinsatz von Schneidwerkzeugen und Bohrem.

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



#### 7.0.5.2. Messverfahren für die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

Die Dauerfestigkeit wird üblicherweise durch standardisierte Ermüdungsversuche ermittelt. Im Folgenden sind gängige Methoden und relevante Details aufgeführt:

##### Umlaufbiegeermüdungsversuch (ASTM E466)

Prinzip: Die Probe wird im rotierenden Zustand wechselnden Biegebelastungen ausgesetzt und die Anzahl der Zyklen bis zum Ermüdungsbruch aufgezeichnet. Die Lebensdauer wird in Zyklen (N) angegeben.

Testbedingungen:

Ladefrequenz: 10-50 Hz.

Spannungsverhältnis ( $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ) : 0,1–0,3.

Umgebung: Raumtemperatur (20–25 °C), Luftfeuchtigkeit <50 %.

Vorteile: Es simuliert tatsächliche Wechsellastzustände und eignet sich zur Bewertung der Dauerfestigkeit bei hohen Lastwechselzyklen.

Einschränkungen: Die Oberflächenqualität der Probe muss kontrolliert werden und die Testergebnisse werden durch Spannungskonzentrationen beeinflusst.

##### Axialer Belastungsermüdungstest (ASTM E606)

Prinzip: Die Probe wird einer axialen Wechselbelastung ausgesetzt und die Ermüdungslebensdauer bzw. Risswachstumsrate gemessen.

Vorteile: Geeignet zur Bewertung der Ermüdung bei geringer Lastspielzahl und des Risswachstumsverhaltens.

Einschränkungen: Die Anforderungen an die Prüfeinrichtung sind hoch und die Spannungsverteilung muss korrigiert werden.

##### Risswachstumstest (ASTM E647)

Prinzip: Auf eine vorgerissene Probe wird eine Last aufgebracht und die Beziehung zwischen der Risswachstumsrate ( $da/dN$ ) und dem Spannungsintensitätsfaktor ( $\Delta K$ ) gemessen.

Vorteile: Liefert quantitative Daten zu Risswachstumsmechanismen.

Ergänzende Technologie: Kombination mit optischer Mikroskopie (Auflösung < 1  $\mu m$ ) oder Rasterelektronenmikroskopie (REM) zur Beobachtung der Rissmorphologie.

Der Rotationsbiegeermüdungsversuch hat sich aufgrund seiner starken Simulation und seines hohen Standardisierungsgrades zur gängigen Methode zum Testen der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall entwickelt.

#### 7.0.5.3. Faktoren, die die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Ermüdungsbeständigkeit wird von verschiedenen Faktoren wie Mikrostruktur, Komponentenverhältnis, Belastungsbedingungen und Umwelteinflüssen beeinflusst. Die spezifische Analyse sieht wie folgt aus:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Körnung**

Wirkung: Durch die Kornverfeinerung wird die Dauerfestigkeit generell verbessert.

Mechanismus: Feine Körner erhöhen die Dichte der Korngrenzen und behindern die Rissausbreitung; zu grobe Körner können Spannungskonzentrationspunkte bilden.

### **Co-Inhalt**

Wirkung: Die Anti-Ermüdungsleistung ist besser, wenn der Co-Gehalt moderat ist.

Mechanismus: Eine angemessene Menge an Co sorgt für einen plastischen Puffer und verringert die Spannungskonzentration. Ist der Co-Gehalt zu hoch, wird Co weicher und verringert die Dauerfestigkeit. Ist er zu niedrig, fehlt es an Zähigkeit und es besteht die Gefahr von Rissen.

### **Spannungsverhältnis**

Auswirkung: Das Spannungsverhältnis beeinflusst die Ermüdungslebensdauer.

Mechanismus: Ein niedriges Spannungsverhältnis ( $R < 0,1$ ) erhöht die Ermüdungslebensdauer; ein hohes Spannungsverhältnis ( $R > 0,5$ ) beschleunigt das Risswachstum.

### **Umgebungsfeuchtigkeit**

Wirkung: Hohe Luftfeuchtigkeit verringert die Ermüdungsresistenz.

Mechanismus: Bei zunehmender Luftfeuchtigkeit kann es in der Co-Phase zu leichter Korrosion kommen, wodurch Mikrorisse entstehen und der Ermüdungsbruch beschleunigt wird.

### **Oberflächendefekte**

Auswirkung: Die Oberflächenqualität beeinflusst die Ermüdungsbeständigkeit.

Mechanismus: Oberflächenrisse oder Rauheiten ( $R_a > 0,2 \mu m$ ) werden zur Quelle von Ermüdungsrissen und verkürzen die Lebensdauer.

## **7.0.5.4. Mikroskopischer Mechanismus der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall**

Der mikroskopische Mechanismus der Ermüdungsbeständigkeit umfasst die folgenden Aspekte:

### **Hohe Härte der WC-Phase**

Die Härte der WC-Phase (HV 2000–2500) bietet eine Grundlage für Ermüdungsbeständigkeit und widersteht plastischer Verformung durch zyklische Beanspruchung.

### **Korngrenzenverstärkung**

Korngrenzen behindern die Rissausbreitung durch den Orowan-Verstärkungsmechanismus, und eine moderate Korngröße ( $0,5-1 \mu m$ ) hat die beste Wirkung.

### **Regulierung der Plastizität der Co-Phase**

: Bei geeigneter Menge der Co-Phase absorbiert diese Energie durch plastische Deformation und verzögert die Rissausbreitung; ist sie zu hoch, verstärkt sie die Ermüdungsschäden.

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

### **Rissablenkung**

WC-Korngrenzen verursachen eine Ablenkung des Rissverlaufs und erhöhen so den Widerstand gegen Risswachstum.

### **Ermüdungsschadensart**

Oberflächeninitiation: Zyklische Belastung führt zu Oberflächenmikrorissen (Länge < 0,1 mm).

Interne Ausdehnung: Der Riss erstreckt sich entlang der Korngrenze oder des Co-Pools.

Bruch: Der endgültige Bruch tritt auf, nachdem die Ermüdungslebensdauer erschöpft ist.

### **7.0.5.5. Anwendungsbedeutung der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall**

Dank seiner hervorragenden Ermüdungsbeständigkeit eignet sich Hartmetall hervorragend für zyklische Belastungen. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

Anforderungen: Hochfrequenzschneiden (>500 Hz), Beständigkeit gegen zyklische Ermüdung.

Mechanismus: Hohe Härte verringert die Entstehung von Oberflächenrissen und verlängert die Lebensdauer.

#### **Bergbaubohrer**

Anforderungen: Zyklische Stöße (Frequenz > 500 Hz), Dauerbruchfestigkeit erforderlich.

Mechanismus: Die Verstärkung der Korngrenzen verzögert die Rissausbreitung und verbessert die Haltbarkeit.

#### **Verschleißfeste Form**

Anforderungen: Hochfrequenzextrusion (>10<sup>6</sup>-fach), Ermüdungsbeständigkeit.

Mechanismus: Geringe Oberflächendefekte reduzieren die Ursachen von Ermüdungsrissen.

#### **Mechanische Komponenten**

Anforderungen: Dauerhafte zyklische Belastung, Dauerfestigkeit ist erforderlich.

Mechanismus: Eine angemessene Menge an Co verbessert die Zähigkeit und verzögert Ermüdungsschäden.

### **7.0.5.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall**

Zur weiteren Verbesserung der Ermüdungsbeständigkeit können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### **Mikrostrukturoptimierung:**

Die Korngröße von 0,5–1 µm wird ausgewählt und durch Hochenergie-Kugelmahlen erreicht, um die Korngrenzenverstärkung zu verbessern.

Der Co-Gehalt wird auf 8–12 % kontrolliert, um ein Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte herzustellen.

#### **Additivkontrolle:**

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

Durch Zugabe einer kleinen Menge VC oder TaC kann die Korngrenzenfestigkeit verbessert und die Rissausbreitung verringert werden.

Vermeiden Sie eine übermäßige Zugabe, um die Bildung einer spröden Phase zu verhindern.

#### **Oberflächenverfestigung:**

Tragen Sie eine TiN- oder CrN -Beschichtung auf, um die Ermüdungsbeständigkeit der Oberfläche zu verbessern.

Polieren Sie auf eine geringe Rauheit ( $R_a < 0,1 \mu m$ ), um die Ursachen für Ermüdungsrisse zu verringern.

#### **Prozessoptimierung:**

Sintertemperatur 1400–1500 °C, Vakuumgrad  $< 10^{-2}$  Pa, gewährleistet hohe Dichte.

Kontrollieren Sie die Abkühlrate (3–5 °C/min), um die thermische Belastung zu verringern.

#### **KI und IIoT :**

Verwenden Sie KI, um die Ermüdungslebensdauer vorherzusagen und das Mikrostrukturdesign zu optimieren.

In Kombination mit IIoT kann die Echtzeitüberwachung der Spannungsverteilung und Rissausbreitung die Beständigkeit der Ermüdungsbeständigkeit verbessern.

Die Ermüdungsbeständigkeit ist die Kernleistung von Hartmetall unter zyklischen Belastungen. Durch Optimierung der Mikrostruktur, Oberflächenbehandlung und neue Technologien kann es die hohen Anforderungen der Luftfahrt, des Bergbaus und des Maschinenbaus erfüllen. Durch die intensive Anwendung von KI und dem industriellen Internet der Dinge ( IIoT ) dürften sich die Ermüdungsbeständigkeit und die Produktionseffizienz von Hartmetall in den nächsten zwei bis drei Jahren deutlich verbessern.

### **7.0.6. Schlagzähigkeit von Hartmetall**

Die Schlagzähigkeit von Hartmetall (WC-Co) beschreibt die Widerstandsfähigkeit gegen Brüche und Verformungen unter hohen Stoßbelastungen und ist ein wichtiger Indikator für die mechanische Leistung, um die Zuverlässigkeit von Werkstoffen unter dynamischen Belastungen zu messen. Im Folgenden werden Definition, Messmethode, Einflussfaktoren, mikroskopische Mechanismen, Anwendungsbedeutung, Optimierung und zukünftige Entwicklung detailliert erläutert.

#### **7.0.6.1. Definition der Schlagzähigkeit von Hartmetall**

Schlagzähigkeit bezeichnet die Widerstandsfähigkeit von Hartmetall gegen Rissbildung und Bruch bei plötzlichen, hochenergetischen Stößen. Diese Widerstandsfähigkeit wird üblicherweise durch die Schlagenergie (Einheit J) oder Schlagzähigkeit charakterisiert. Die Schlagzähigkeit von Hartmetall beruht hauptsächlich auf der Zähigkeit der Kobalt-Bindungsphase (Co) und der Härteunterstützung der Hartphase (WC). Diese eignet sich für Anwendungen mit hoher Schlagzähigkeit wie Bohrern im Bergbau und Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 7.0.6.2. Messverfahren für die Schlagzähigkeit von Hartmetall

Die Schlagfestigkeit wird üblicherweise durch standardisierte Schlagprüfungen gemessen. Im Folgenden sind gängige Methoden und relevante Details aufgeführt:

##### Charpy-Schlagprüfung (ASTM E23)

Prinzip: Die Probe wird im Dreipunktbiegezustand durch ein Pendel beaufschlagt und die zum Bruch erforderliche Energie (Schlagarbeit) gemessen.

Testbedingungen:

Probenabmessungen:  $55 \times 10 \times 10$  mm, mit V-Kerbe (Tiefe 2 mm).

Aufprallgeschwindigkeit: 5–5,5 m/s.

Umgebung: Raumtemperatur (20–25 °C).

Vorteile: Es simuliert tatsächliche Aufprallbedingungen und die Testergebnisse korrelieren stark mit den Anwendungsszenarien.

Einschränkungen: Kerbform und Probengröße müssen streng kontrolliert werden und die Ergebnisse werden durch die Kerbempfindlichkeit beeinflusst.

##### Izod-Schlagprüfung (ASTM E23)

Prinzip: Die Probe wird in Form eines Kragbalkens fixiert, dem Aufprall eines Pendels ausgesetzt und die Bruchenergie gemessen.

Vorteile: Geeignet für kleine Proben, einfach zu bedienen.

Einschränkungen: Die Testergebnisse werden durch die Art und Weise beeinflusst, wie die Probe eingespannt wird.

Fallgewichtsschlagversuch

Prinzip: Ein schwerer Hammer fällt aus einer bestimmten Höhe frei auf die Probe und misst die Schlagfestigkeit des Materials.

Vorteile: Simuliert einen Aufprall mit hoher Energie und eignet sich zur Bewertung der dynamischen Leistung.

Ergänzende Technologie: Kombinieren Sie Hochgeschwindigkeitsfotografie (Bildrate > 1000 fps), um den Bruchprozess zu beobachten, oder verwenden Sie Rasterelektronenmikroskopie (SEM), um die Bruchmorphologie zu analysieren.

Der Charpy-Schlagversuch hat sich aufgrund seines hohen Standardisierungsgrades und der starken Simulation zur gängigen Methode zur Prüfung der Schlagfestigkeit von Hartmetall entwickelt.

#### 7.0.6.3. Faktoren, die die Schlagzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Schlagzähigkeit wird von verschiedenen Faktoren wie Mikrostruktur, Komponentenverhältnis, Prüfbedingungen und Umwelteinflüssen beeinflusst. Die spezifische Analyse lautet wie folgt:

##### Co-Inhalt

Wirkung: Je höher der Co-Gehalt, desto besser die Schlagzähigkeit.

Mechanismus: Die Co-Phase absorbiert Aufprallenergie durch plastische Verformung und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verringert den Sprödbbruch; bei zu geringem Co-Gehalt nimmt die Sprödigkeit des Materials zu.

### **Körnung**

Wirkung: Eine moderate Körnung wirkt sich positiv auf die Schlagfestigkeit aus.

Mechanismus: Bei einer moderaten Korngröße (0,5–1  $\mu\text{m}$ ) sind Korngrenzenverfestigung und Zähigkeit im Gleichgewicht; zu feine Körner können Korngrenzendefekte verursachen und zu grobe Körner verringern den Widerstand gegen Rissausbreitung.

### **Zusatzstoff**

Wirkung: Additive können die Schlagzähigkeit verbessern.

Mechanismus: Die Zugabe von TaC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  erhöht die Korngrenzenfestigkeit und verringert intergranulare Brüche.

### **Prüftemperatur**

Wirkung: Niedrige Temperaturen verringern die Schlagfestigkeit.

Mechanismus: Niedrige Temperaturen verringern die Zähigkeit der Co-Phase und erhöhen die Neigung zum Sprödbbruch.

### **Oberflächendefekte**

Wirkung: Oberflächendefekte verringern die Schlagfestigkeit.

Mechanismus: Oberflächenrisse oder Rauheiten ( $R_a > 0,2 \mu\text{m}$ ) werden zu Spannungskonzentrationspunkten und reduzieren die Aufprallenergie.

## **7.0.6.4. Mikroskopischer Mechanismus der Schlagzähigkeit von Hartmetall**

Der mikroskopische Mechanismus der Schlagfestigkeit umfasst folgende Aspekte:

### **Plastische Absorption der Co-Phase:**

Die Co-Phase absorbiert Aufprallenergie durch plastische Verformung und verzögert so die Rissausbreitung. Eine angemessene Co-Menge verbessert die Schlagzähigkeit.

### **Rissablenkung an WC-Korngrenzen**

WC-Korngrenzen verursachen eine Rissverlaufsablenkung, erhöhen die Bruchverlaufslänge und verringern die Bruchgeschwindigkeit.

### **Korngrenzenverstärkung**

Korngrenzen behindern die Rissausbreitung durch den Orowan-Verstärkungsmechanismus, und eine moderate Korngröße (0,5–1  $\mu\text{m}$ ) hat die beste Wirkung.

### **Grenzflächenbindung:**

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung zwischen WC und Co wird durch die Co-Benetzung erreicht und Grenzflächendefekte können die Entstehung von Rissen auslösen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Aufprallbruchtyp**

Intergranularer Bruch: Der Riss verläuft entlang der WC-Korngrenze, was häufiger vorkommt, wenn der Co-Gehalt niedrig ist.

Transgranularer Bruch: Der Riss verläuft durch die WC-Partikel und tritt häufiger bei hohen Aufprallenergien auf.

Gemischter Bruch: Intergranulare und transgranulare Brüche treten gleichzeitig auf, was unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen häufig vorkommt.

### **7.0.6.5. Anwendungsbedeutung der Schlagzähigkeit von Hartmetall**

Dank seiner hervorragenden Schlagfestigkeit eignet sich Hartmetall hervorragend für Anwendungen mit hoher Stoßbelastung. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

#### **Bergbaubohrer**

Anforderungen: Hochfrequente Stöße ( $>500$  Hz), Widerstandsfähigkeit gegen Stoßbruch.

Mechanismus: Hoher Co-Gehalt absorbiert Aufprallenergie und verringert das Bruchrisiko.

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

Anforderungen: Hochgeschwindigkeitsschneiden ( $>800$  m/min), Beständigkeit gegen dynamische Stöße.

Mechanismus: Die Korngrenzenverstärkung verzögert das Risswachstum und verlängert die Lebensdauer.

#### **Schlagmatrize**

Anforderungen: Hochfrequenzprägung ( $> 10^6$ -mal), Beständigkeit gegen Schlagversagen.

Mechanismus: Geringe Oberflächendefekte reduzieren die Rissbildung.

#### **Tiefseeausrüstung**

Anforderungen: Druckstöße in der Tiefsee ( $>80$  MPa), müssen dynamischer Belastung standhalten.

Mechanismus: Eine angemessene Menge an Co und eine Oberflächenbeschichtung verbessern die Schlagfestigkeit.

### **7.0.6.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Schlagzähigkeit von Hartmetall**

Um die Schlagfestigkeit weiter zu verbessern, können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### **Mikrostrukturoptimierung:**

Die Korngröße von  $0,5-1\ \mu\text{m}$  wird ausgewählt und durch Hochenergie-Kugelmahlen erreicht, um das Gleichgewicht zwischen Korngrenzenverstärkung und Zähigkeit zu optimieren.

Der Co-Gehalt wird auf  $8-12\%$  begrenzt, um die Absorption von Aufprallenergie zu verbessern.

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

#### **Additivkontrolle:**

Durch die Zugabe einer kleinen Menge TaC oder Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> kann die Korngrenzenfestigkeit erhöht und interkristalline Brüche verringert werden.

Vermeiden Sie eine übermäßige Zugabe, um die Bildung einer spröden Phase zu verhindern.

#### **Oberflächenverfestigung:**

Tragen Sie eine TiN- oder CrN -Beschichtung auf, um die Schlagfestigkeit der Oberfläche zu verbessern.

Polieren Sie auf eine geringe Rauheit ( $R_a < 0,1 \mu m$ ), um Spannungskonzentrationspunkte zu reduzieren.

#### **Prozessoptimierung:**

Sintertemperatur 1400–1500 °C, Vakuumgrad  $< 10^{-2}$  Pa, gewährleistet hohe Dichte.

Kontrollieren Sie die Abkühlrate (3–5 °C/min), um die thermische Belastung zu verringern.

#### **KI und IIoT :**

Verwenden Sie KI, um das Aufprallbruchverhalten vorherzusagen und das Mikrostrukturdesign zu optimieren.

In Kombination mit IIoT kann die Echtzeitüberwachung der Rissbildung und -ausbreitung genutzt werden, um die Beständigkeit der Schlagfestigkeit zu verbessern.

Die Schlagfestigkeit ist die Kernleistung von Hartmetall unter dynamischen Belastungsbedingungen. Durch Optimierung der Mikrostruktur, Oberflächenbehandlung und neue Technologien kann es die hohen Anforderungen von Bergbau-, Luftfahrt- und Tiefseeausrüstung erfüllen. Durch die intensive Anwendung von KI und dem industriellen Internet der Dinge (IIoT) dürften sich die Schlagfestigkeit und die Produktionseffizienz von Hartmetall in den nächsten zwei bis drei Jahren deutlich verbessern.

### **7.0.7. Umfassende Analyse und Anwendung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall**

Die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall (WC-Co) weisen komplexe Wechselwirkungen und Kompromisse auf, die umfassend berücksichtigt werden müssen, um den Anforderungen verschiedener Anwendungsszenarien gerecht zu werden. Im Folgenden finden Sie eine detaillierte Analyse unter den Aspekten Leistungskompromisse, Optimierungsstrategien und zukünftige Entwicklung.

#### **7.0.7.1. Kompromisse zwischen den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall**

Es besteht ein gewisser Kompromiss zwischen den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall, der sich in den folgenden Aspekten widerspiegelt:

#### **Härte und Zähigkeit**

Zusammenhang: Eine hohe Härte geht meist mit einer geringen Zähigkeit einher und umgekehrt.

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



- Gehalt) erhöht die Verformungsbeständigkeit, verringert jedoch die Plastizität und Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ), was leicht zu Sprödbrüchen führen kann; eine hohe Zähigkeit (erreicht durch einen höheren Co - Gehalt) absorbiert Energie durch plastische Verformung, verringert jedoch die Härte und schwächt die Verschleißbeständigkeit.

Anwendungseinflüsse: Werkzeuge für die Luftfahrt erfordern eine hohe Härte, um Verschleiß zu widerstehen, während Bohrer für den Bergbau eine hohe Zähigkeit benötigen, um Stößen standzuhalten. Beides muss je nach den spezifischen Arbeitsbedingungen aufeinander abgestimmt sein.

### **Ermüdungs- und Stoßfestigkeit**

Zusammenhang: Dauerfestigkeit und Schlagfestigkeit stellen unterschiedliche Anforderungen an die Mikrostruktur.

Mechanismus: Die Ermüdungsbeständigkeit hängt von der Optimierung der Mikrostruktur (z. B. moderate Korngröße) ab, um die Rissausbreitung zu verhindern. Für die Schlagfestigkeit ist ein höherer Co-Gehalt erforderlich, um die Energieabsorptionskapazität zu verbessern und einen sofortigen Bruch zu verringern.

Auswirkungen auf die Anwendung: Bei zyklischer Belastung mit hoher Frequenz (wie etwa bei Schneidwerkzeugen in der Luftfahrt) ist die Ermüdungsbeständigkeit wichtiger; in Szenarien mit hoher Auswirkung (wie etwa bei Bohrmeißeln im Bergbau) hat die Schlagfestigkeit Vorrang.

### **Verschleißfestigkeit und Anpassungsfähigkeit an die Umwelt**

Beziehung: Die Verschleißfestigkeit kann in rauen Umgebungen wie hohen Temperaturen oder Korrosion auf die Probe gestellt werden.

Mechanismus: Hohe Temperaturen ( $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) erweichen die Co-Phase und erhöhen den adhäsiven Verschleiß; die korrosive Umgebung ( $\text{pH-Wert} < 5$ ) führt zur Auflösung der Co-Phase, wodurch Korrosionslöcher entstehen und der Verschleiß beschleunigt wird.

Auswirkungen auf die Anwendung: Bei der Verarbeitung von Turbinenschaufeln für die Luftfahrt muss die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen berücksichtigt werden, und bei Tiefseeborern muss auf die Leistung in korrosiven Umgebungen geachtet werden.

### **7.0.7.2. Optimierungsstrategien für mechanische Eigenschaften von Hartmetall**

Um die Gesamtleistung von Hartmetall zu optimieren, können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### **Mikrostrukturregulierung**

Korngröße: Verwenden Sie WC-Korngrößen von  $0,2\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ . Feine Körner ( $<0,5\text{ }\mu\text{m}$ ) verbessern Härte und Verschleißfestigkeit, während größere Körner ( $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ ) Zähigkeit und Schlagfestigkeit verbessern.

Co-Gehalt: kontrolliert auf  $6\text{--}15\%$ . Ein niedriger Co-Gehalt ( $6\text{--}8\%$ ) eignet sich für hohe Härteanforderungen, ein hoher Co-Gehalt ( $12\text{--}15\%$ ) für hohe Zähigkeit und Schlagfestigkeit.

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

### **Additive Optimierung**

Durch die Zugabe einer kleinen Menge VC oder TaC wird die Korngrenzenfestigkeit erhöht, die Verschleißfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit verbessert und gleichzeitig die Zähigkeit erhalten. Vermeiden Sie eine übermäßige Zugabe, um die Bildung einer spröden Phase zu verhindern.

### **Oberflächenmodifizierungstechnologie**

Tragen Sie eine CrN- oder TiN -Beschichtung auf, um die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit zu erhöhen und die Leistung in Umgebungen mit hohen Temperaturen und Korrosion zu verbessern.

Mittels Laserbeschichtungs- oder Ionenimplantationstechnologie wird eine Oberflächenschicht mit hoher Härte gebildet, um die Schlagfestigkeit und Ermüdungsbeständigkeit zu verbessern.

### **7.0.7.3. Anwendungsszenarien der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall**

Durch umfassende Optimierung kann Hartmetall die Anforderungen der folgenden anspruchsvollen Anwendungen erfüllen:

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

Anforderungen: Hohe Härte und Verschleißfestigkeit, um Schneidverschleiß zu widerstehen, hohe Dauerfestigkeit, um zyklischer Belastung standzuhalten.

Optimierungsstrategie: Korngröße 0,2–0,5  $\mu\text{m}$ , Co - Gehalt 6–8 %, Oberflächenbeschichtung CrN .

#### **Bergbaubohrer**

Anforderungen: Hohe Zähigkeit und Schlagfestigkeit, um Stößen standzuhalten, hohe Verschleißfestigkeit, um Verschleiß durch hartes Gestein zu widerstehen.

Optimierungsstrategie: Korngröße 1–2  $\mu\text{m}$ , Co-Gehalt 12–15 %, Zugabe von TaC zur Verstärkung der Korngrenzen.

#### **Verschleißfeste Form**

Anforderungen: Hohe Härte und Verschleißfestigkeit, um Extrusionsverschleiß zu widerstehen, hohe Ermüdungsbeständigkeit, um die Lebensdauer zu verlängern.

Optimierungsstrategie: Korngröße 0,5–1  $\mu\text{m}$ , Co - Gehalt 8–12 %, Oberfläche auf geringe Rauheit poliert.

### **7.0.7.4. Zukünftige Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall**

Die umfassende Leistungsfähigkeit und Anwendungssicherheit von Hartmetall kann zukünftig durch folgende Technologien weiter verbessert werden:

KI-Technologie: Verwenden Sie KI, um Leistungskompromisse vorherzusagen und das Mikrostrukturdesign (wie Korngröße und Co-Gehalt) zu optimieren.

Industrielles Internet der Dinge ( IIoT ): Echtzeitüberwachung der Spannungsverteilung und Rissausbreitung während des Einsatzes zur Verbesserung der Leistungskonsistenz.

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

**Fortschrittliche Fertigungstechnologie:** Durch die Kombination von 3D-Druck und Nanotechnologie wird Hartmetall mit Gradientenstruktur (z. B. mit hoher Härte an der Oberfläche und hoher Zähigkeit im Inneren) entwickelt, um multifunktionale Anforderungen zu erfüllen.

Umfassende Analysen zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall abgewogen und optimiert werden müssen, um spezifische Anwendungsanforderungen zu erfüllen. Durch die Regulierung der Mikrostruktur, Additive und Oberflächenmodifizierung kann Hartmetall in der Luftfahrt, im Bergbau und im Formenbau vielseitig eingesetzt werden. Zukünftig wird die intensive Anwendung von KI und dem industriellen Internet der Dinge (IIoT) die Leistungssteigerung und Anwendungserweiterung weiter vorantreiben.

## 7.1 Härte- und Zähigkeitsverhältnis von Hartmetall

### (1) Härte von Hartmetall

Die Härte von Hartmetall (WC-Co) gibt die Widerstandsfähigkeit gegen Verformung und Verschleiß an und wird üblicherweise in der Vickershärte (HV) angegeben. Sie liegt zwischen 1200 und 1800 HV. Die Härte wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

#### - Korngröße

(z. B. 0,2–0,5  $\mu\text{m}$ ), desto höher die Härte, die bis zu 1800 HV erreichen kann (Hall-Petch-Effekt).

#### Co-Gehalt:

Wenn der Co-Gehalt niedrig ist (z. B. 6–8 %), ist die Härte höher (HV 1600–1800); wenn der Co-Gehalt hoch ist (z. B. 12–15 %), nimmt die Härte ab (HV 1200–1400).

#### als Zusatzstoff

das Kornwachstum hemmen und die Härte um 5–10 % auf bis zu HV 2000 erhöhen.

#### Durch Oberflächenmodifikationen

wie Aufkohlen oder Laserauftragschweißen kann die Härte auf HV 2000–2500 erhöht werden.

### Härte von Hartmetall

Die Härte von Hartmetall (WC-Co) kann je nach Prüfmethode und Anwendungsszenario auf verschiedene Arten ausgedrückt werden. Gängige Methoden sind:

#### Vickershärte (HV)

**von Hartmetall:** HV 1200–1800, bis HV 2000–2500 (nach Oberflächenmodifizierung).

Beschreibung: Mit einem Vickershärteprüfer eine Standardlast (üblicherweise 30 kg) aufbringen und anhand der Eindrucksfläche berechnen. Vorteile: Geeignet für ein breites Spektrum an Messungen von Hartmetall, die die Widerstandsfähigkeit gegen Verformungen widerspiegeln.

#### Rockwell-Härte (HR)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

: HRA 80–94 (A-Skala).

Beschreibung: Mit einem Diamantkegel wird eine Last von 150 kg aufgebracht und die Eindringtiefe gemessen. Vorteile: Schneller Test, geeignet für groß angelegte Prüfungen.

### **Brinellhärte (HB)**

: HB 1000–1600 (erfordert hohe Belastung, z. B. 3000 kg).

Beschreibung: Zum Eindringen wird eine Stahl- oder Hartmetallkugel verwendet, um den Eindruckbereich zu berechnen.

Einschränkungen: Eingeschränkte Anwendbarkeit bei Materialien mit hoher Härte (z. B. Hartmetall), eine Lastanpassung ist erforderlich.

### **Mikrohärte (HV0,1–HV1)**

Bereich: HV 1200–1800 (kleine Last, z. B. 0,1–1 kg).

Beschreibung: Wird zur mikroskopischen Flächenmessung verwendet, insbesondere zur Analyse von Körnern oder Beschichtungen. Vorteile: Hohe Genauigkeit, geeignet zur lokalen Eigenschaftsbewertung.

Diese Darstellungsmethoden spiegeln die Widerstandsfähigkeit von Hartmetall gegenüber Druck, Verformung und Verschleiß wider. Die Vickershärte (HV) wird aufgrund ihrer breiten Anwendbarkeit am häufigsten verwendet. Der tatsächliche Wert wird durch die WC-Korngröße, den Co-Gehalt und Zusätze beeinflusst (z. B. kann VC die HV um 5–10 % erhöhen).

## **(2) Zähigkeit von Hartmetall**

Die Zähigkeit von Hartmetall (WC-Co) wird üblicherweise durch die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) charakterisiert, die zwischen 8 und 16  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  liegt. Seine Zähigkeitseigenschaften sind wie folgt:

### **Co-Gehalt**

, desto besser die Zähigkeit. Bei einem Co-Gehalt von 6 % liegt der  $K_{IC}$ -Wert bei etwa 8–10  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; bei einem Co-Gehalt von 12–15 % kann der  $K_{IC}$ -Wert 14–16  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erreichen.

### **Bei grober Korngröße**

(z. B. 1–2  $\mu\text{m}$ ) ist die Zähigkeit höher ( $K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ); bei zu feiner Korngröße (z. B.  $< 0,2 \mu\text{m}$ ) kann die Zähigkeit aufgrund von Korngrenzengleiten abnehmen ( $K_{IC} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

### **TaC hinzufügen (0,2 %–0,5 %) als Zusatzstoff**

kann die Korngrenzen stärken und den  $K_{IC}$ -Wert um etwa 5 %–10 % erhöhen.

### **Die Prüfmethode**

basiert auf der Single Edge Notched Beam-Methode (SENB). Beispielsweise beträgt der  $K_{IC}$ -Wert von WC-10Co (Korngröße 0,5  $\mu\text{m}$ , Co 10 %) etwa 12  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  und ist somit für Bohrkronen im Bergbau geeignet. Härte und Zähigkeit müssen ausgewogen sein, wobei eine hohe Zähigkeit üblicherweise mit einer Abnahme der Härte einhergeht ( $HV < 1400$ ).

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



### (3) Arten der Zähigkeit von Hartmetall

Hartmetall (WC -Co) wird hauptsächlich durch die folgenden Indikatoren und Methoden charakterisiert, die seine Fähigkeit widerspiegeln, Brüchen zu widerstehen und Energie zu absorbieren:

**Bruchzähigkeit (  $K_{1c}$  ) von Hartmetall** Die Bruchzähigkeit (  $K_{1c}$  ) ist die Fähigkeit von Hartmetall, der Rissausbreitung zu widerstehen, wenn Risse vorhanden sind, und ihre Einheit ist  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

. Der  $K_{1c}$ -Wert von Hartmetall wird üblicherweise durch den synergistischen Effekt der Hartphase Wolframkarbid (WC) und der Bindephase Kobalt (Co) bestimmt und spiegelt das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit des Materials wider.

Der  $K_{1c}$  von Hartmetall (WC-Co) ist ein wichtiger mechanischer Kennwert für die Widerstandsfähigkeit gegen Rissausbreitung und Bruch und spielt eine entscheidende Rolle für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Materials. Im Folgenden werden verschiedene wichtige Aspekte und Einflussfaktoren detailliert beschrieben.

### Bedeutung der Bruchzähigkeit von Hartmetall

Die Bruchzähigkeit (  $K_{1c}$  ) ist die wichtigste Eigenschaft von Hartmetall, die strukturelle Integrität unter hoher Spannung, Aufprall oder Defektbedingungen aufrechtzuerhalten. Hartmetall wird aufgrund seiner hohen Härte (normalerweise durch WC gewährleistet, etwa HV 2000–2500) häufig zum Schneiden, Bohren und Formenbau verwendet, aber diese hohe Härte geht oft mit einer hohen Sprödigkeit einher, wodurch das Material bei dynamischer Belastung oder beim Vorhandensein von Mikrorissen zu unregelmäßigen Brüchen neigt.  $K_{1c}$  quantifiziert die Fähigkeit des Materials, solchen spröden Brüchen zu widerstehen und bestimmt direkt, ob Hartmetall im tatsächlichen Einsatz unerwarteten Stößen oder defektbedingten Versagen standhalten kann. Beispielsweise kann ein niedrigerer  $K_{1c}$ -Wert in einer Umgebung mit hochfrequenten Stößen oder zyklischer Belastung dazu führen, dass sich Mikrorisse schnell zu Makrobrüchen ausweiten, während ein höherer  $K_{1c}$ -Wert die Ermüdungslebensdauer und Schlagfestigkeit deutlich verlängern kann. Außerdem wirkt sich  $K_{1c}$  auch auf die Sicherheit während der Verarbeitung aus, da ein plötzlicher Bruch von Hartmetallwerkzeugen zu Produktionsunterbrechungen oder Geräteschäden führen kann. Daher ist die Optimierung von  $K_{1c}$  ein wichtiges Ziel zur Verbesserung der Gesamtleistung und Zuverlässigkeit von Hartmetall in industriellen Anwendungen, insbesondere unter extremen Bedingungen (wie hohen Temperaturen, hohem Druck oder korrosiver Umgebung).

### Faktoren, die die Bruchzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Bruchzähigkeit von Hartmetall wird durch eine Vielzahl von Mikrostrukturen, Zusammensetzungsverhältnissen und Parametern des Herstellungsprozesses wie folgt beeinflusst:

### Co-Inhalt

**Funktion :** Co beeinflusst als Bindungsphase  $K_{1c}$  erheblich durch seine Fähigkeit zur plastischen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verformbarkeit.

**Mechanismus:** Mit steigendem Co-Gehalt erhöht sich der Anteil der zähen Phase im Material, was die plastische Dissipationskapazität erhöht und die Rissausbreitung hemmt. Bei niedrigem Co-Gehalt (z. B. 6 % oder weniger) dominiert die WC-Phase, und trotz hoher Härte fehlt ein ausreichender plastischer Puffer, was zu einem niedrigen  $K_{Ic}$ -Wert führt. Bei hohem Co-Gehalt (z. B. 12–15 %) steigt die Plastizität und der  $K_{Ic}$ -Wert deutlich an.

**Bereich und Gleichgewicht:** Der typische Co-Gehalt liegt zwischen 6 % und 15 %, wobei 10 % bis 12 % als optimales Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte gelten.

**Einschränkungen:** Ein zu hoher Co-Gehalt kann die Härte und Verschleißfestigkeit verringern und muss entsprechend den spezifischen Anforderungen angepasst werden.

### Körnung

**Wirkung:** Die WC-Korngröße hat einen zweifachen Effekt auf  $K_{Ic}$ .

**机制:** 较细的晶粒 (如 0.2–0.5  $\mu\text{m}$ ) 通过 Hall-Petch 效应 ( $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ ) 增加晶界密度 ( $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ), 提高强度, 但可能因晶界缺陷 (如空隙或微裂纹) 降低  $K_{Ic}$ ; 适中晶粒尺寸 (0.5–1  $\mu\text{m}$ ) 提供最佳的晶界强化与韧性平衡; 较大晶粒 ( $>2 \mu\text{m}$ ) 减少晶界密度, 增强裂纹偏转能力,  $K_{Ic}$  随晶粒粗大而有所提升, 但硬度可能下降.

**Prozesseinfluss:** Die Korngröße wird durch die Sintertemperatur (1400–1500 °C) und die Sinterzeit (1–3 Stunden) bestimmt. Hohe Temperaturen oder lange Sinterzeiten können leicht zu Kornwachstum führen.

### Zusatzstoff

**Wirkung:** Additive wie VC, TaC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  können den  $K_{Ic}$ -Wert deutlich verbessern.

**Mechanismus:** Diese Additive verstärken die Korngrenzen durch feste Lösung oder Ausfällung, hemmen das WC-Kornwachstum (Korngrenzenwanderungsrate  $< 10^{-10} \text{ m/s}$ ) und erhöhen die Festigkeit der Grenzflächenbindung ( $> 150 \text{ MPa}$ ). Beispielsweise bildet VC (0,2–0,5 %) eine dünne VCx-Schicht, um Schwachstellen an den Korngrenzen zu reduzieren; TaC verbessert die Zähigkeit der Korngrenzen und verringert die Neigung zu intergranularen Brüchen.

**Einschränkungen:** Eine zu hohe Zugabe (z. B.  $> 0,8 \%$ ) kann eine spröde Phase bilden (z. B. zu viel VCx), was wiederum  $K_{Ic}$  reduziert.

### Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur

**Wirkung:** Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur wirkt sich direkt auf  $K_{Ic}$  aus.

**Mechanismus:** Die gleichmäßige Verteilung der WC- und Co-Phasen reduziert die Spannungskonzentration, und die Struktur mit geringer Porosität ( $< 1 \%$ ) und wenigen Korngrenzendefekten ( $< 0,5 \%$ ) erhöht die Zähigkeit. Bei ungleichmäßiger Co-Verteilung (z. B. Bildung von Co-Pools mit einer Größe von  $> 5 \mu\text{m}$ ) breiten sich Risse wahrscheinlich entlang schwacher Bereiche aus, und  $K_{Ic}$  nimmt ab.

**Prozesseinfluss:** Durch Kaltisostatisches Pressen (CIP, Druck 200–300 MPa) oder Vakuumsintern kann die mikrostrukturelle Homogenität verbessert werden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Sinterprozess

**Auswirkung** : Sinterparameter beeinflussen die endgültige Leistung von  $K_{1c}$  .

**Mechanismus** : Die Sintertemperatur (1400–1500 °C) ist zu hoch oder die Sinterzeit zu lang. Dies führt zu groben Körnern und Co-Segregation, was zu einer Verringerung des  $K_{1c}$  -Werts führt . Eine geeignete Temperatur und ein Vakuum ( $<10^{-2}$  Pa) gewährleisten eine dichte Struktur und optimieren die Zähigkeit. Die Abkühlrate (3–5 °C/min) kontrolliert die thermische Spannung ( $<100$  MPa) und verhindert Mikrorissbildung.

**Optimierung** : Mehrstufiges Sintern (z. B. Vorsintern bei niedriger Temperatur + Sintern bei hoher Temperatur) kann die mikrostrukturelle Konsistenz verbessern.

## Oberflächenzustand

**Auswirkung** : Oberflächendefekte oder Eigenspannungen beeinflussen  $K_{1c}$  .

**Mechanismus** : Oberflächenrisse, Rauheit ( $R_a > 0,2 \mu m$  ) oder Zugeigenspannung ( $> 200$  MPa) werden zu Rissbildungsquellen und reduzieren  $K_{1c}$  ; Druckeigenspannung ( $> 400$  MPa) kann  $K_{1c}$  durch Oberflächenmodifikation (wie Kugelstrahlen ) erhöhen.

**Prozesseinfluss** : Polieren auf  $R_a < 0,1 \mu m$  oder Beschichtungsbehandlung (z. B. TiN ) zur Verbesserung der **Oberflächenbeschaffenheit** .

## Mikroskopischer Mechanismus

**Plastische Dissipation der Co- Phase: Die Co-Phase erfährt** bei Aufprall oder Spannung **eine plastische Deformation (Dehnungsgeschwindigkeit  $\sim 10^{-3} s^{-1}$  )** , wodurch Rissenergie absorbiert und die Rissausbreitung verzögert wird.

**Korngrenzenablenkung und -überbrückung** : WC-Korngrenzen verursachen eine Rissablenkung (Winkel  $20^\circ$ – $40^\circ$ ), wodurch die Weglänge vergrößert wird; die Co-Phase erzeugt an der Risspitze einen Überbrückungseffekt, der Energie verbraucht.

**Bindungsstärke der Grenzfläche** : Die WC-Co-Grenzfläche (Bindungsstärke  $> 50$  MPa, Kontaktwinkel  $< 15^\circ$ ) beeinflusst die Rissausbreitungsbeständigkeit, und Grenzflächendefekte (wie etwa Hohlräume  $> 0,5 \%$  ) verringern  $K_{1c}$  .

**Unterdrückung von Mikrorissen** : Additive stärken die Korngrenzen, verringern die Entstehung von Mikrorissen (Länge  $< 0,05$  mm) und verbessern die Gesamtzähigkeit.

Die Bruchzähigkeit ist der Kern der Leistungsoptimierung von Hartmetall und muss durch Anpassung des Co-Gehalts, der Korngröße, der Additive und des Herstellungsprozesses ausgeglichen werden, um den Anforderungen unter verschiedenen Arbeitsbedingungen gerecht zu werden.

## (4) Schlagzähigkeit von Hartmetall

Die Schlagzähigkeit von Hartmetall (WC-Co) beschreibt die Widerstandsfähigkeit gegen Bruch und Verformung unter hochenergetischen Stoßbelastungen und ist ein wichtiger Indikator für die mechanische Zuverlässigkeit von Werkstoffen unter dynamischen Belastungen. Im Folgenden werden Definition, Bedeutung, Messmethode, Einflussfaktoren und mikroskopische Mechanismen detailliert erläutert.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Definition der Schlagzähigkeit von Hartmetall

Schlagzähigkeit bezeichnet die Fähigkeit von Hartmetall, Energie zu absorbieren und einem Bruch bei einem plötzlichen, hochenergetischen Aufprall standzuhalten. Sie wird üblicherweise durch die Schlagenergie (Einheit J) oder die Bruchenergie im Schlagversuch charakterisiert. Die Schlagzähigkeit von Hartmetall wird hauptsächlich durch die plastische Verformbarkeit der Kobalt-Bindungsphase (Co) und die Härte der Wolframkarbid-Hartphase (WC) bestimmt und spiegelt die Bruchfestigkeit des Materials unter hohen Schlagbelastungen wider.

### Die Bedeutung der Schlagzähigkeit von Hartmetall

Die Schlagzähigkeit ist entscheidend für die Leistung von Hartmetall unter dynamischen Bedingungen. Hartmetall wird aufgrund seiner hohen Härte (erreicht durch WC, ca. HV 2000–2500) häufig im Bergbau, beim Zerspanen und im Formenbau eingesetzt. Diese hohe Härte geht jedoch oft mit einer gewissen Sprödigkeit einher, die das Material bei hohen Stoßbelastungen (wie z. B. hochfrequenten Stößen oder plötzlichen Belastungen) anfällig für Sprödbrüche macht. Die Schlagzähigkeit bestimmt direkt, ob Hartmetall solchen plötzlichen Belastungen standhält, ohne zu versagen. Beispielsweise kann bei Bohrern oder Stanzwerkzeugen im Bergbau eine geringe Schlagzähigkeit dazu führen, dass das Material bei hohen Stößen schnell bricht, was zu Geräteschäden oder Produktionsunterbrechungen führen kann. Eine hohe Schlagzähigkeit hingegen kann die Lebensdauer effektiv verlängern und die Sicherheit verbessern. Darüber hinaus beeinflusst die Schlagzähigkeit auch die Zuverlässigkeit von Hartmetall in extremen Umgebungen (wie niedrigen oder hohen Temperaturen) und ist ein wichtiger Indikator für die Optimierung der Gesamtleistung von Materialien.

### Messmethode zur Ermittlung der Schlagzähigkeit von Hartmetall

Die Schlagzähigkeit wird üblicherweise durch standardisierte Tests bestimmt. Im Folgenden sind gängige Methoden und relevante Details aufgeführt:

#### Charpy-Schlagversuch (ASTM E23)

**Prinzip** : Die Probe wird in einem Dreipunktbiegezustand durch ein Pendel beaufschlagt und die zum Bruch erforderliche Energie (Schlagarbeit) gemessen.

#### Testbedingungen :

Probenabmessungen:  $55 \times 10 \times 10$  mm, mit V-Kerbe (Tiefe 2 mm).

Aufprallgeschwindigkeit: 5–5,5 m/s.

Umgebung: Raumtemperatur (20–25 °C).

**Vorteile** : Es simuliert tatsächliche Aufprallbedingungen und die Ergebnisse sind für die Anwendungsszenarien äußerst relevant.

**Einschränkungen** : Kerbform und Probengröße müssen streng kontrolliert werden und die Testergebnisse werden durch die Kerbempfindlichkeit beeinflusst.

#### Izod-Schlagprüfung (ASTM E23)

**Prinzip** : Die Probe wird in Form eines Auslegerbalkens fixiert, dem Aufprall eines Pendels

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



ausgesetzt und die Bruchenergie gemessen.

**Vorteile** : Geeignet für kleine Proben, einfach zu bedienen.

**Einschränkungen** : Die Ergebnisse werden durch die Klemmmethode beeinflusst.

### Fallgewichtsschlagversuch

**Prinzip** : Ein schwerer Hammer fällt aus einer bestimmten Höhe frei auf die Probe und misst die Schlagfestigkeit.

**Vorteile** : Simuliert einen Aufprall mit hoher Energie und eignet sich zur Bewertung der dynamischen Leistung.

**Ergänzende Technologie** : Kombinieren Sie Hochgeschwindigkeitsfotografie (Bildrate > 1000 fps), um den Bruchprozess zu beobachten, oder verwenden Sie Rasterelektronenmikroskopie (SEM), um die Bruchmorphologie zu analysieren.

Der Charpy-Schlagversuch hat sich aufgrund seines hohen Standardisierungsgrades und der starken Simulation zur gängigen Methode zur Prüfung der Schlagzähigkeit von Hartmetall entwickelt.

### Faktoren, die die Schlagzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

Die Schlagzähigkeit von Hartmetall wird durch die Mikrostruktur, das Zusammensetzungsverhältnis, die Testbedingungen und die Umweltfaktoren wie folgt beeinflusst:

#### Co-Inhalt

**Funktion** : Der Co-Gehalt ist der Hauptfaktor, der die Schlagzähigkeit beeinflusst. Je höher der Co-Gehalt, desto besser die Schlagzähigkeit.

**Mechanismus** : Die Co-Phase absorbiert Aufprallenergie durch plastische Verformung (Dehnungsgeschwindigkeit  $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) und verringert die Neigung zu Sprödb Brüchen. Bei niedrigem Co-Gehalt (z. B. 6 % oder weniger) besteht das Material hauptsächlich aus der WC-Phase mit hoher Härte, aber unzureichender Plastizität und geringer Schlagzähigkeit. Bei hohem Co-Gehalt (z. B. 12–15 %) erhöht sich die Plastizität und die Schlagzähigkeit deutlich.

**Bereich und Gleichgewicht** : Der Co-Gehalt liegt zwischen 6 % und 15 %, und 10 % bis 12 % ist normalerweise das optimale Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte.

**Einschränkungen** : Ein zu hoher Co-Gehalt kann die Härte und Verschleißfestigkeit verringern und muss entsprechend den Anwendungsanforderungen angepasst werden.

#### Körnung

**Wirkung** : Die WC-Korngröße hat einen zweifachen Effekt auf die Schlagfestigkeit.

**Mechanismus** : Eine moderate Korngröße (0,5–1  $\mu\text{m}$ ) bietet das beste Gleichgewicht zwischen Korngrenzenverfestigung und Zähigkeit. Die Korngrenzendichte ( $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ) behindert die Rissausbreitung durch den Orowan-Verfestigungsmechanismus. Obwohl feinere Körner ( $<0,2 \mu\text{m}$ ) die Härte erhöhen, können Korngrenzendefekte zunehmen und die Schlagzähigkeit verringern. Größere Körner ( $>2 \mu\text{m}$ ) verlängern die Rissauslenkungswege, die Schlagzähigkeit wird verbessert, die Härte jedoch verringert.

**Prozesseinfluss** : Die Korngröße wird durch die Sintertemperatur (1400–1500 °C) und die Sinterzeit (1–3 Stunden) gesteuert. Zu hohe Temperaturen führen zu groben Körnern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Zusatzstoff**

**Funktion** : Additive wie TaC oder Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> können die Schlagzähigkeit verbessern .

**Mechanismus** : TaC erhöht die Korngrenzenfestigkeit (> 150 MPa) und verringert intergranulare Brüche; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> hemmt das Kornwachstum (Korngrenzenwanderungsrate < 10<sup>-10</sup> m/s) und verbessert die mikrostrukturelle Stabilität.

**Einschränkungen** : Eine zu hohe Zugabe (z. B. > 0,8 %) kann zur Bildung einer spröden Phase und einer Verringerung der Schlagzähigkeit führen.

### **Prüftemperatur**

**Wirkung** : Die Temperatur hat einen erheblichen Einfluss auf die Schlagzähigkeit.

**Mechanismus** : Niedrige Temperaturen (<-40 °C) verringern die Zähigkeit der Co-Phase und erhöhen die Tendenz zum Spröbruch; hohe Temperaturen (>800 °C) können dazu führen, dass die Co-Phase weicher wird und die Energieabsorptionskapazität verringert wird.

**Umweltauswirkungen** : Die geeignete Materialformel muss entsprechend den tatsächlichen Arbeitsbedingungen (z . B. Tiefseeschneiden bei niedrigen Temperaturen oder hohen Temperaturen) ausgewählt werden.

### **Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur**

**Funktion** : Die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur ist für die Schlagfestigkeit von entscheidender Bedeutung.

**Mechanismus** : Gleichmäßig verteilte WC- und Co-Phasen reduzieren die Spannungskonzentration, und Strukturen mit geringer Porosität (<1 %) und wenigen Korngrenzdefekten (<0,5 %) verbessern die Schlagzähigkeit. Bei ungleichmäßig verteiltem Co (z. B. Bildung eines Co-Pools mit einer Größe von >5 µm ) breiten sich Risse wahrscheinlich entlang schwacher Bereiche aus, was die Schlagzähigkeit verringert.

**Prozesseinfluss** : Kaltisostatisches Pressen (CIP, Druck 200–300 MPa) oder Vakuumsintern kann die Gleichmäßigkeit verbessern .

### **Oberflächenzustand**

**Auswirkung** : Oberflächendefekte oder Eigenspannungen beeinträchtigen die Schlagzähigkeit.

**Mechanismus** : Oberflächenrisse, Rauheit (Ra > 0,2 µm ) oder Zugeigenspannung (> 200 MPa) werden zu Spannungskonzentrationspunkten und verringern die Schlagzähigkeit. Druckeigenspannung (> 400 MPa) kann die Schlagzähigkeit durch Oberflächenmodifikation (wie Kugelstrahlen) verbessern.

**Prozesseinfluss** : Polieren auf Ra <0,1 µm oder Beschichtungsbehandlung (z. B. TiN ) zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit.

## **(5) Mikroskopischer Mechanismus der Schlagzähigkeit von Hartmetall**

### **Plastische Absorption der Co-Phase**

Die Co-Phase absorbiert durch plastische Verformung Aufprallenergie und verzögert die

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

Rissausbreitung. Ein entsprechender Co-Anteil verbessert die Schlagzähigkeit.

### Rissablenkung an WC-Korngrenzen

WC-Korngrenzen verursachen eine Ablenkung des Rissverlaufs (Winkel 20°–40°), erhöhen die Bruchverlaufslänge und verringern die Bruchgeschwindigkeit.

### Korngrenzenverstärkung

**晶界强化:** 晶界通过 Orowan 强化机制 ( $\tau \sim Gb/\lambda$ ,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5–1  $\mu\text{m}$ ) 效果最佳。

### Schnittstellenverbindung

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung (> 50 MPa) zwischen WC und Co wird durch die Benetzung mit Co (Kontaktwinkel < 15°) erreicht, und Grenzflächendefekte (z. B. Hohlräume > 0,5 %) können zur Rissbildung führen.

### Aufprallbruchtyp

**Intergranularer Bruch:** Der Riss verläuft entlang der WC-Korngrenze, was häufiger vorkommt, wenn der Co-Gehalt niedrig ist.

**Transgranularer Bruch:** Der Riss verläuft durch die WC-Partikel und tritt häufiger bei hohen Aufprallenergien auf.

**Gemischter Bruch:** Intergranulare und transgranulare Brüche treten gleichzeitig auf, was unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen häufig vorkommt.

Die Schlagzähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft von Hartmetall unter dynamischer Belastung. Sie kann durch Anpassung der Mikrostruktur und der Prozessparameter optimiert werden, um den Anforderungen unterschiedlicher Arbeitsbedingungen gerecht zu werden.

## (6) Zusammenhang zwischen Härte und Zähigkeit von Hartmetall

Es besteht ein gewisser Kompromiss zwischen der Härte und der Zähigkeit (üblicherweise ausgedrückt als Vickershärte HV und Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$ ) von Hartmetall (WC-Co). Die grundlegende Beziehung lautet wie folgt:

Härte (HV 1200–1800) und Zähigkeit ( $K_{Ic}$  8–16  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) zeigen normalerweise einen umgekehrten Trend. Eine hohe Härte (wie etwa HV 1600–1800) geht oft mit einer geringeren Zähigkeit ( $K_{Ic}$  8–10  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) einher, während eine hohe Zähigkeit ( $K_{Ic}$  14–16  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) normalerweise zu einer Verringerung der Härte (HV 1200–1400) führt. Das liegt daran, dass Härte und Zähigkeit auf unterschiedlichen Mikromechanismen beruhen: Die Härte wird hauptsächlich durch die hohe Härte der WC-Phase bestimmt, während die Zähigkeit von der plastischen Verformbarkeit der Co-Phase abhängt.

Die Härte (HV 1200–1800) und Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$  8–16  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) von Hartmetall sind seine wichtigsten mechanischen Eigenschaften, die sich direkt auf seine Zuverlässigkeit bei hohen Belastungen (>4000 MPa), Stoßumgebungen (>500 Hz) und hohen Temperaturen (>800°C)

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

auswirken.

## **(7) Der Kompromiss zwischen Härte und Zähigkeit ist eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von Hartmetall**

Eine hohe Härte ( $HV > 1600$ ) geht normalerweise mit einer geringen Zähigkeit ( $K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) einher, was leicht zu Sprödbrüchen führen kann; eine hohe Zähigkeit ( $K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) hingegen reduziert die Härte ( $HV < 1400$ ) und schwächt die Verschleißfestigkeit. Um beides auszugleichen, muss die Mikrostruktur optimiert werden, einschließlich der WC-Korngröße ( $0,2 - 2 \mu\text{m}$ ) und des Co-Bindephasengehalts ( $6 - 15 \%$ ), um den Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen wie Luftfahrtwerkzeugen (Lebensdauer  $> 15$  Stunden) und Bergbaubohrern (Bohren  $> 1200 \text{ m}$ ) gerecht zu werden.

In diesem Abschnitt wird der Regelungsmechanismus des Härte-Zähigkeits-Gleichgewichts aus drei Blickwinkeln erörtert: Korngrößeneffekt (basierend auf der Hall-Petch-Beziehung), Optimierung des Co-Bindungsphasengehalts und fortschrittliche Technologien (wie Nanokompositstechnologie und Gradientenstrukturdesign). Dabei werden mechanische Modelle (Hall-Petch:  $\sigma_y \sim d^{-1/2}$ , Orowan-Verstärkung), Thermodynamik (Grenzflächenenergie  $< 1,5 \text{ J/m}^2$ ) und Prozessparameter (Sintertemperatur  $1400-1500^\circ\text{C}$ , Vakuumgrad  $< 10^{-2} \text{ Pa}$ ) kombiniert.

### **7.1.1 Korngrößeneffekt (Hall-Petch-Beziehung)**

#### **7.1.1.1 Korngrößeneffekt**

Unter Korngrößeneffekt versteht man die regelmäßigen Änderungen der mechanischen Eigenschaften (wie Härte, Festigkeit und Zähigkeit) von Materialien wie Hartmetall bei Änderungen der Korngröße. Gemäß der Hall-Petch-Beziehung führt eine Verringerung der Korngröße (z. B. von  $2 \mu\text{m}$  auf  $0,5 \mu\text{m}$ ) zu einer Erhöhung der Korngrenzendichte ( $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ), einer Behinderung der Versetzungsbewegung und somit zu einer Erhöhung der Härte (um etwa  $25-30 \%$ , z. B. HV von 1200 auf 1600) und Festigkeit.

#### **Prinzip und Technologie des Korngrößeneffekts Die Korngröße ist ein Schlüsselfaktor bei der Regulierung von Härte und Zähigkeit**

von Hartmetall und folgt der Hall-Petch-Beziehung ( $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ , wobei  $\sigma_y$  die Streckgrenze,  $d$  die Korngröße und  $k$  etwa  $0,3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ist). Durch Reduzierung der WC-Korngröße ( $0,2 - 2 \mu\text{m}$ ) lassen sich Härte ( $HV 1200 - 1800$ ) und Druckfestigkeit ( $> 4000 \text{ MPa}$ ) deutlich steigern. Beispielsweise erhöht sich durch Verfeinerung der Korngröße von  $2 \mu\text{m}$  auf  $0,5 \mu\text{m}$  die Härte von HV 1200 auf HV 1600, und die Schnittlebensdauer von Luftfahrtwerkzeugen erhöht sich von 12 auf 15 Stunden. Zu kleine Körner ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) können jedoch aufgrund von Korngrenzgleiten (Geschwindigkeit  $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$ ) Mikrorisse verursachen, was zu einer Verringerung der Zähigkeit führt ( $K_{1c} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ). Daher erfordert die Optimierung der Korngröße ein Gleichgewicht zwischen Korngrenzenverstärkung und Grenzflächenstabilität.

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



Die Korngröße wird durch Hochenergie-Kugelmahlen (Geschwindigkeit 300–500 U/min, Zeit 20–40 Stunden), Zugabe von Korninhibitoren (wie VC 0,2–0,5 %, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 0,1–0,3 %) und Optimierung des Sinterprozesses (Temperatur 1400–1500 °C, Vakuumgrad <10<sup>-2</sup> Pa) reguliert. In den letzten Jahren sind ultrafeinkörnige (<0,5 µm) und nanokristalline (<100 nm) Hartmetalle zu einem Forschungsschwerpunkt geworden, und ihre Härte kann HV 2000 erreichen, aber das Problem der Stabilität der Nanokorngrenzen muss gelöst werden (Migrationsrate der Korngrenzen <10<sup>-10</sup> m/s).

#### 7.1.1.2 Hall-Petch -Mechanismus und mechanische Analyse

##### Was ist die Hall-Petch -Beziehung?

Die Hall-Petch-Beziehung ist ein wichtiges Grundprinzip der **Materialwissenschaft**. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Korngröße eines polykristallinen Materials und seiner Streckgrenze. Die Beziehung wurde unabhängig voneinander von E. O. Hall (1951) und N. J. Petch (1953) entdeckt und formuliert und ist daher nach ihnen benannt. Vereinfacht ausgedrückt gilt für die Hall-Petch -Beziehung:

**Je feiner die Körner, desto höher ist die Festigkeit (insbesondere Streckgrenze) des Materials.** Dieser Zusammenhang lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

In:

**$\sigma_y$  : Streckgrenze des Materials .**

**$\sigma_0$  :** stellt die Streckgrenze des Materials **Einkristall** dar , oder allgemeiner den Widerstand gegen Versetzungsbewegungen innerhalb des Korns (Gitterreibungsspannung).

**k:** Die **Hall-Petch-Steigung** ist eine **Konstante** , deren Wert vom Material selbst (z. B. Kristallstruktur, Versetzungseigenschaften) und den Eigenschaften der Korngrenze (z. B. Korngrenzenenergie, Korngrenzengleitwiderstand) abhängt. Je höher der k-Wert, desto größer ist der Korngrenzenverstärkungseffekt.

**d:** mittlerer Korndurchmesser des Materials.

#### Kernphysikalisch: Korngrenzen behindern die Versetzungsbewegung

##### Versetzung und plastische Deformation

Die plastische Verformung metallischer Werkstoffe wird hauptsächlich durch das Gleiten von Versetzungen (lineare Defekte in Kristallen) innerhalb der Körner erreicht.

##### Korngrenzen als Barrieren

Korngrenzen sind Grenzflächen zwischen benachbarten Körnern. Aufgrund der unterschiedlichen Kristallorientierung benachbarter Körner ist es für Versetzungen schwierig, direkt von einem Korn zum benachbarten Korn über die Korngrenze zu gleiten.

##### Versetzungsstau

Unter Einwirkung äußerer Spannungen werden Versetzungsquellen aktiviert und es entstehen Versetzungen. Diese Versetzungen bewegen sich entlang der Gleitebene, bis sie durch die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korngrenze blockiert werden und vor der Korngrenze eine „Versetzungsstauung“ bilden.

### **Spannungskonzentration und Aktivierung von Versetzungsquellen in benachbarten Körnern**

Die angesammelten Versetzungsgruppen erzeugen eine hohe lokale Spannungskonzentration an der Korngrenze. Erreicht diese konzentrierte Spannung die zur Aktivierung der Versetzungsquelle im benachbarten Korn erforderliche Spannung, kann sich die plastische Verformung auf das nächste Korn ausbreiten, und das Material gibt im Makromaßstab nach.

### **Kornverfeinerung**

Je feiner die Körner (je kleiner  $d$ ), desto größer ist die Korngrenzenfläche pro Volumeneinheit und desto kürzer ist die mittlere freie Weglänge der Versetzung. Versetzungen treffen auf kürzere Distanz auf Korngrenzenhindernisse, und es bedarf höherer äußerer Spannung, um eine ausreichend starke Versetzungsstauung in den Körnern zu bilden (und damit eine ausreichend hohe Spannungskonzentration zu erzeugen), um die Versetzungsquelle der benachbarten Körner zu aktivieren. Daher steigt die Streckgrenze  $\sigma_y$  des Materials mit abnehmender Korngröße  $d$ .

### **Bedeutung der Hall-Petch-Beziehung**

#### **Einer der wichtigsten Verstärkungsmechanismen**

Die Kornverfeinerung ist eine der wirksamsten und am häufigsten verwendeten Methoden zur Verbesserung der Festigkeit metallischer Werkstoffe und verringert die Zähigkeit des Materials normalerweise nicht wesentlich (sie kann die Zähigkeit sogar verbessern und ist damit anderen Verstärkungsmechanismen wie der Mischkristallverfestigung und der Ausscheidungshärtung überlegen).

### **Gestaltung von Leitfäden**

Es bietet eine theoretische Grundlage und quantitative Werkzeuge zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften von Materialien durch Steuerung ihrer Mikrostruktur (insbesondere der Korngröße). Eines der Hauptziele metallurgischer Prozesse (wie kontrolliertes Walzen, Wärmebehandlung usw.) ist die Verfeinerung der Körner.

### **Den Größeneffekt verstehen**

Erklärt, warum nanokristalline Materialien eine extrem hohe Festigkeit aufweisen.

Die Hall-Petch-Beziehung **ist im Korngrößenbereich vom Mikrometer bis zum Submikrometer sehr gültig** (üblicherweise etwa  $1\ \mu\text{m}$  bis  $0,1\ \mu\text{m}$ ). Wenn die Korngröße auf **den Nanometerbereich** ( $< 100\ \text{nm}$ ) abnimmt, können andere Mechanismen (wie Korngrenzengleiten, Versetzungsabsorption oder Emission an Korngrenzen) dominant werden, und manchmal wird sogar der „umgekehrte Hall-Petch-Effekt“ beobachtet, d. h. die Intensität nimmt mit zunehmender Verringerung der Korngröße ab.

**Der Materialtyp** bezieht sich in erster Linie auf **Metalle und Legierungen**. Ähnliche Zusammenhänge sind bei Keramiken und einigen Polymeren zu beobachten, die

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

Verstärkungsmechanismen können jedoch unterschiedlich sein.

Die Hall-Petch-Beziehung zeigt, dass je kleiner die Korngröße ist, desto höher ist die Korngrenzendichte ( $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ), die Versetzungsbewegung wird behindert und Festigkeit und Härte verbessern sich deutlich. Die Härte (HV) ist ungefähr proportional zur Streckgrenze ( $HV \sim 3\sigma_y$ ). Wenn die Korngröße von  $2 \mu\text{m}$  auf  $0,5 \mu\text{m}$  sinkt, steigt die Härte um etwa 25–30 % (von HV 1200 auf 1600). Wenn die Korngröße jedoch zu klein ist ( $<0,2 \mu\text{m}$ ), verstärkt sich das Gleiten der Korngrenzen, was zu einer Abnahme der Zähigkeit führt ( $K_{IC}$  sinkt von  $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  auf  $<8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). Der Mechanismus basiert auf der Verstärkung der Korngrenzen und der Bruchmechanik: Korngrenzen verbessern die Leistung durch Fixierung von Versetzungen (Orowan-Verstärkung,  $\tau \sim Gb / \lambda$ ,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ), eine hohe Korngrenzendichte erhöht jedoch die Grenzflächenenergie ( $>1,5 \text{ J/m}^2$ ) und verursacht leicht Mikrorisse (Länge  $0,05\text{--}0,1 \mu\text{m}$ ).

Die Analyse der Korngrenzendynamik zeigt, dass die Migrationsrate der Korngrenzen ( $10^{-10} \text{ m/s}$ ) durch die Sintertemperatur ( $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ ) und Additive (VC  $0,2\text{--}0,5\%$ ) gesteuert wird und die Migrationsbarriere  $80\text{--}120 \text{ kJ/mol}$  beträgt. Die thermodynamische Stabilität von feinkörnigem WC wird anhand der Gibbs-Energie ( $\Delta G < 0$ ) bewertet. Bei Korngrößen  $< 0,5 \mu\text{m}$  dominiert die Grenzflächenenergie die Leistungsänderung. Beispielsweise hat WC-10Co (Korn  $0,5 \mu\text{m}$ ) eine Härte von HV 1600 und einen  $K_{IC}$  von  $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  und ist damit für Hochgeschwindigkeitsschneiden ( $> 800 \text{ m/min}$ ) geeignet.

#### 7.1.1.3 Analyse der Faktoren, die den Korngrößeneffekt beeinflussen

Der Korngrößeneffekt wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

##### Ursprüngliche Pulverpartikelgröße

Die Partikelgröße des WC-Pulvers beträgt  $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$ , um eine gleichmäßige Verfeinerung zu gewährleisten. Wenn sie  $> 2 \mu\text{m}$  ist, beträgt die Härte  $< 1400$ . Wenn sie  $< 0,2 \mu\text{m}$  ist, beträgt die Agglomerationsrate  $> 15\%$ .

##### Kugelmahlzeit

Durch 20–40-stündiges Kugelmahlen (Rotationsgeschwindigkeit  $300\text{--}500 \text{ U/min}$ ) können die Körner auf  $0,5 \mu\text{m}$  verfeinert werden; bei  $<15$  Stunden ist die Korngröße  $>1 \mu\text{m}$ ; bei  $>50$  Stunden ist die Kornbruchrate  $>3\%$ .

##### Sintertemperatur

das Kornwachstum kontrolliert werden ( $<0,8 \mu\text{m}$ ), bei  $>1550^\circ\text{C}$  ist die Korngröße  $>2 \mu\text{m}$  und die Härte nimmt um  $10\text{--}15\%$  ab.

##### Zusatzstoff

Eine VC-Zugabe von  $0,2\text{--}0,5\%$  kann das Kornwachstum hemmen ( $<0,5 \mu\text{m}$ ) und die Härte um  $5\text{--}10\%$  erhöhen. Bei  $>0,8\%$  bildet sich eine spröde Phase, was zu  $K_{IC} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  führt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Co-Inhalt

Ein Co-Gehalt von 8–12 % kann die Zähigkeit ausgleichen; wenn er  $< 6 \%$  ist, ist  $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ; wenn er  $> 15 \%$  ist, ist die Härte  $< 1200$ .

Sinteratmosphäre: Ein Vakuum von  $< 10^{-2} \text{ Pa}$  kann Oxidation vermeiden ( $\text{O}_2$ -Gehalt  $< 0,5 \text{ ppm}$ ); die Verwendung einer Argon- Atmosphäre (Reinheit  $> 99,99 \%$ ) kann Korngrenzendefekte reduzieren ( $< 0,2 \%$ ).

## Abkühlrate

Durch die Steuerung der Abkühlrate bei  $3\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  kann die thermische Spannung ( $< 100 \text{ MPa}$ ) reduziert werden; bei  $> 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  beträgt die Mikrorissrate  $> 0,5 \%$ .

## Vorteile, Nachteile und technische Anforderungen der Hall-Petch-Beziehung

Durch die Kornverfeinerung werden Härte und Festigkeit deutlich verbessert ( $\text{HV } 1600$ ,  $\sigma > 4500 \text{ MPa}$ ), sodass es für Anwendungen mit hoher Belastung (wie etwa Werkzeuge für die Luftfahrt) geeignet ist.

Zu kleine Körner ( $< 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ ) führen zu einer verringerten Zähigkeit ( $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) und die Herstellungskosten von nanokristallinem WC sind höher (ca. 20–25 % Anstieg).

## Technische Bedingungen für die Hall-Petch-Beziehung

Erforderlich sind hochpräzise Kugelmahlanlagen (Drehzahlgenauigkeit  $\pm 5 \text{ U}/\text{min}$ ), Online-Kornüberwachung (Abweichung  $< 0,02 \text{ } \mu\text{m}$ ) sowie Hochtemperatur- und Hochdruck-Sinteröfen (Temperaturabweichung  $< \pm 10^\circ\text{C}$ , Druckabweichung  $< \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ ).

## Optimierungsstrategie

**für die Hall-Petch-Beziehung** Um eine hohe Härte ( $\text{HV } 1600$ ) und eine mittlere Zähigkeit ( $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) zu erreichen, wird die folgende Strategie empfohlen:

Wählen Sie WC-Pulver mit einer Partikelgröße von  $0,5\text{--}1 \text{ } \mu\text{m}$  und führen Sie für 20–40 Stunden eine Hochenergie-Kugelmahlung durch (Rotationsgeschwindigkeit  $300\text{--}500 \text{ U}/\text{min}$ ).

Die Sintertemperatur wird auf  $1400\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$  geregelt, der Vakuumgrad beträgt  $< 10^{-2} \text{ Pa}$  und die Korngröße beträgt  $< 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ .

Durch die Zugabe von  $0,2\text{--}0,5 \%$  VC kann das Kornwachstum gehemmt und die Härte um 5–10 % erhöht werden.

Der Co-Gehalt wird auf 8–12 % festgelegt, um einen  $K_{Ic}$ -Wert von  $> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  sicherzustellen. mit Online-Partikelgrößenüberwachung (Abweichung  $< 0,02 \text{ } \mu\text{m}$ ).

Die Korngröße wurde mittels TEM-Analyse (Auflösung  $< 0,1 \text{ nm}$ ) verifiziert und die Korngrenzenspannung ( $< 100 \text{ MPa}$ ) mittels XRD (Spitzenbreitenabweichung  $< 0,2^\circ$ ) ermittelt.

Fortschrittliche Technologie: Versuchen Sie die Nanokomposit-Technologie, um durch Zugabe von Nano-WC-Partikeln ( $< 50 \text{ nm}$ ) eine Dual-Mode-Struktur (Korngrößenverteilung:  $0,2 \text{ } \mu\text{m}$  und  $1 \text{ } \mu\text{m}$ ) zu bilden. Die Härte wird auf  $\text{HV } 1800$  erhöht und der  $K_{Ic}$  erreicht  $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

## Hall-Petch-Beziehung Ingenieurwissenschaftliche Anwendungspraxis

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Feinkörniges Hartmetall eignet sich für viele verschiedene Anwendungsfälle:

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

WC-10Co (Korngröße  $0,5 \mu\text{m}$ , Härte HV 1600) hat eine Lebensdauer von 15 Stunden und eine Leistungssteigerung von 25 % beim Hochgeschwindigkeitsschneiden ( $> 800 \text{ m/min}$ ).

#### **Bergbaubohrer**

WC-8Co (Korngröße  $0,8 \mu\text{m}$ ,  $K_{1c} \approx 13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) hat eine Standzeit von 1.200 m beim Hartgesteinsbohren, eine Steigerung von 40 %.

Verschleißfeste Form

WC-12Co (Korngröße  $0,5 \mu\text{m}$ , Härte HV 1600), Lebensdauer  $> 10^6$  mal beim Extrudieren.

#### **Turbinenschaufeln für die Luftfahrt**

WC-10Co (Korngröße  $0,4 \mu\text{m}$ , VC 0,3 %), Härte HV 1700,  $K_{1c} \approx 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , beim Hochtemperaturschneiden ( $> 800^\circ\text{C}$ , Geschwindigkeit  $> 250 \text{ m/s}$ ) erreicht die Lebensdauer 20 Stunden, eine Steigerung von 30 %.

#### **Neue Form für Energiebatterien**

WC-10Co (Korngröße  $0,3 \mu\text{m}$ , Härte HV 1800), bei Hochfrequenzextrusion ( $> 500 \text{ Hz}$ ), Lebensdauer  $> 10^6$  mal, eine Erhöhung von 50

### **7.1.2 Optimierung des Gehalts an Hartmetall-Bindungsphasen**

#### **Zusammenhang zwischen Typ, Gehalt und Zähigkeit der Hartmetall-Bindungsphase**

Die Zähigkeit von Hartmetall (WC-Co) hängt eng mit der Art und dem Gehalt der Bindephase sowie der Hartphasenstruktur zusammen. Die Optimierung des Bindephasengehalts (insbesondere des Kobaltgehalts) ist das wichtigste Mittel zum Ausgleich von Härte und Zähigkeit des Materials. Der typische Regelbereich liegt zwischen 6 % und 15 %. Nachfolgend eine systematische Analyse:

##### **7.1.2.1 Die zentrale Rolle der Bindungsphase und der technischen Regulierung**

Die Leistungsfähigkeit von Hartmetall wird durch die Hartphase (Karbide wie WC) und die metallische Bindungsphase (hauptsächlich Co) bestimmt.

#### **Kernfunktionen von Co:**

Träger plastischer Verformung: Wenn sich der Riss ausbreitet (Dehnungsgeschwindigkeit beträgt etwa  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), absorbiert er Energie durch plastische Verformung und trägt direkt zur Zähigkeit bei ( $K_{1c} \approx 8-16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

Verbindungsknoten an der Schnittstelle: Ausgezeichnete Benetzbarkeit mit WC (Kontaktwinkel  $< 15^\circ$ , Schnittstellenenergie  $< 1,5 \text{ J/m}^2$ ), wodurch eine hochfeste Verbindungsschnittstelle ( $> 50 \text{ MPa}$ ) entsteht.

Spannungskordinator: Entlastet die Spannungskonzentration zwischen WC-Partikeln und verhindert Sprödbrüche.

#### **Technisches Prinzip der Gehaltsoptimierung**

Der Co-Gehalt muss präzise im Bereich von 6 % bis 15 % kontrolliert werden:

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

Gehalt (<6 %): Die Härte wird deutlich verbessert ( $HV > 1600$ ), die Zähigkeit nimmt jedoch stark ab ( $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) und es besteht die Gefahr von Sprödbrüchen.

Hoher Co-Gehalt (>15 %): Verbesserte Zähigkeit ( $K_{Ic} > 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), aber unzureichende Härte ( $HV < 1200$ ) und leichte Bildung von Co-Pools (Größe >  $5 \mu\text{m}$ ), was zu einer Verringerung der Festigkeit um 10–15 % führt.

Optimaler Gleichgewichtspunkt (8 % – 12 %): Erreichen Sie eine Synergie zwischen Härte HV 1500 und Zähigkeit  $K_{Ic} \approx 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , um anspruchsvollen Szenarien wie Luftfahrtwerkzeugen gerecht zu werden.

### Implementierungstechnologie:

Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Co-Verteilung (Abweichung <0,5 %) durch Verhältnis von hochreinem Co-Pulver (>99,9 %) → kaltisostatisches Pressen (CIP, 200–300 MPa) → Flüssigphasensintern (1400–1500 °C, 1–3 Stunden). Die bahnbrechende Technologie der letzten Jahre ist das Design der Gradientenstruktur: Durch Regulierung der Co-Diffusionsrate ( $<10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) wird der Co-Gehalt an der Oberfläche auf 6 % (Härte HV 1600) reduziert und der innere Gehalt auf 12 % (Zähigkeit  $K_{Ic} \approx 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) erhöht, wodurch eine „harte Oberfläche und ein zähes Inneres“ erreicht werden.

#### 7.1.2.2 Quantitativer Einfluss des Bindemittelgehalts auf die Zähigkeit

Der Co-Gehalt korreliert positiv mit der Zähigkeit, der Wendepunkt der Leistung muss jedoch vermieden werden:

**Mechanismus zur Verbesserung der Zähigkeit: Erhöhung des Co-Gehalts (6 % → 12 %) → Verdickung der Metallschicht → Erweiterung des**

Raums für plastische Verformung → Rissausbreitung muss durch eine dickere plastische Zone verlaufen, wodurch  $K_{Ic}$  von  $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  auf  $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ( $K_{Ic} \propto \text{Co}^{1/2}$ ) erhöht wird.

### Kritisches Ausfallrisiko:

Bei einem Co-Gehalt von >15 % ist der Volumenanteil der Hartphase zu gering (WC-Anteil <85 %) und die Härte sinkt unter HV 1200;

Wenn die Sintertemperatur >1550°C oder die Co-Verteilungsabweichung >1% ist, bildet sich ein Co-Pool (> $5 \mu\text{m}$ ), der zur Rissquelle wird und die Zähigkeit um 10–15% verringert.

### Mechanische Modellunterstützung:

Voigt-Modell der Verbundwerkstoffe:

$$E = V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$$

Quantitative Eigenschaften: Theoretische Härte der WC-10Co-Legierung HV 1500,  $K_{Ic} \approx 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

#### 7.1.2.3 Hierarchische Beziehung zwischen Bindungsphasentyp und Zähigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Kobalt (Co) – Der Goldstandard:**

Die hohe Versetzungsenergie sorgt für eine ausgezeichnete Versetzungsgleitfähigkeit und einen signifikanten Kaltverfestigungseffekt. Außerdem weist das WC-Co-System die beste Zähigkeit auf.

Nickelbasierte (Ni) Legierungen – korrosionsbeständige Alternativen:

Wird in TiC -Ni-Mo, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - NiCr und anderen Systemen verwendet, hat aber aufgrund des Karbidskeletts eine wesentlich geringere Zähigkeit als WC-Co mit gleichem Gehalt (z. B. beträgt der K<sub>1c</sub>-Wert bei TiC -basierten Legierungen normalerweise <10 MPa·m<sup>1/2</sup>).

### **Zähigkeitsmangel spezieller Systeme:**

Obwohl Legierungen auf der Basis von Metallkarbiden (wie TiC- und Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> -Dauerskeletten) die Zähigkeit durch Erhöhung des Ni-Gehalts in begrenztem Umfang verbessern können, sind sie im Wesentlichen begrenzt durch:

Intrinsische Sprödigkeit von Carbiden;

Die Plastizität der Metallphase wird durch das Skelett eingeschränkt;

Die Festigkeit der Grenzflächenbindung ist schwächer als die von Co-WC.

### **7.1.2.4 Starker Kompromiss und kollaborative Optimierungsstrategie**

#### **Widersprüchliche Natur**

Co-Gehalt ↑ → Zähigkeit ↑↑, aber Härte ↓↓. Herkömmliche homogene Materialien können extreme Anforderungen nur schwer erfüllen.

#### **Durchbruchspfad**

##### **Kornverfeinerung:**

Kontrollieren Sie die WC-Partikelgröße auf 0,5-1 μm (wenn >2 μm, K<sub>1c</sub> verringert sich um 5–10 %) und durch die Verwendung einer Feinkornverstärkung werden sowohl die Festigkeit als auch die Zähigkeit verbessert.

##### **Gradientenstrukturdesign:**

Niedriger Co-Gehalt (6 %) auf der Oberfläche: Erzielt eine hohe Härte (HV 1600) und ist verschleißfest;

- Gehalt (12 %): sorgt für hohe Zähigkeit (K<sub>1c</sub> 14 MPa·m<sup>1/2</sup>) und Widerstandsfähigkeit gegen Schlagbruch;

Schlüsseltechnologie: Hinzufügen von 0,2–0,5 % VC zur Hemmung der Co-Diffusion, kombiniert mit schichtweisem Sintern zur Steuerung des Zusammensetzungsgradienten.

##### **Prozesspräzisionskontrolle:**

Sintern: 1400-1500°C/Vakuum <10<sup>-2</sup> Pa, Zeit 1-3 Stunden (wenn >4 Stunden, Co-Seigerungsrate >1%);

Formen: CIP-Druck 200–300 MPa, Dichte > 99 % sicherstellen (wenn < 150 MPa, Porosität > 1 %);

Qualitätsprüfung: Zur Analyse der Co-Verteilung wurde EDS/EBSD (Auflösung <0,5 μm) verwendet, mit einer Abweichung von <0,5 %.

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

### 7.1.2.5 Ingenieurpraxis-Verifizierung

Das optimierte Design der Bindungsphase bewährt sich auch unter extremen Arbeitsbedingungen:

| Anwendungsszenario                            | Materialsystem                                          | Leistungsparameter                                                 | Verbesserung der Lebensdauer  |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Werkzeuge zur Endbearbeitung in der Luftfahrt | WC-10Co (0,5 $\mu\text{m}$ )                            | HV 1500, $K_{1c}$ 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$               | >15 Stunden (+25 %)           |
| Tiefseebohrung                                | Gradient WC-Co (6 % auf der Oberfläche/12 % im Inneren) | Tabelle HV 1600/Intern $K_{1c}$ 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ | >1500 m (+50%)                |
| Bremsbelagform für Hochgeschwindigkeitszüge   | WC-10Co-Gradient                                        | Hochtemperaturreibung > 600°C                                      | >4×10 <sup>5</sup> mal (+60%) |
| Schlagbohrer für den Bergbau                  | WC-8Co                                                  | $K_{1c}$ 13 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$                        | >1200 m (+40%)                |

### 7.1.2.6 Abschließende Anerkennung

Der Co-Gehalt ist der Kern der Zähigkeitskontrolle: Er wird im Bereich von 6 % bis 15 % präzise optimiert, und 8 % bis 12 % sind der goldene Punkt des Festigkeits-Zähigkeits-Gleichgewichts.

#### Der Prozess bestimmt die obere Leistungsgrenze:

Basierend auf hochreinen Rohstoffen (Co > 99,9 %), Präzisionssintern (Temperaturkontrolle  $\pm 2^\circ\text{C}$ ) und zerstörungsfreier Prüfung (Röntgen-/EDS-Abweichung < 0,2 %);

Die Gradientenstruktur ist eine revolutionäre Technologie, die den Kompromiss zwischen Festigkeit und Zähigkeit durchbricht, die Kosten jedoch um 15–20 % erhöht.

#### Anwendungsorientiertes Design:

Szenarien mit hoher Zähigkeit (Bergbau, Tiefsee) → mittlerer bis hoher Co-Gehalt (10 %–15 %) oder Gradientendesign;

Szenario mit hoher Härte (Finishing) → wenig Co (6–8 %) + feinkörniges WC (0,5  $\mu\text{m}$ ) + VC-Zusätze ;

Korrosionsbeständigkeit/Hochtemperaturszenario → Nickelbasierte Bindungsphasenlegierungen erfordern Kompromisse bei der Zähigkeit.

Die Zähigkeit von Hartmetall beruht im Wesentlichen auf dem synergistischen Effekt von Gehalt, Art und Mikrostruktur der Bindungsphase. Durch wissenschaftliche Optimierung des Co-Gehalts (6–15 %), innovatives Gradientendesign und präzise Prozesssteuerung kann es die traditionellen Leistungsgrenzen durchbrechen und extreme Anforderungen vom Mikronschneiden bis zum Kilometerbohren erfüllen.

## 7.2 Ermüdungs- und Schlagfestigkeit von Hartmetall

### Ermüdungsbeständigkeit

Die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall (WC-Co) beschreibt die Fähigkeit, der Entstehung und Ausbreitung von Ermüdungsrissen unter zyklischer Belastung zu widerstehen und spiegelt die Langlebigkeit des Materials im Langzeiteinsatz wider. Sie beruht hauptsächlich auf der Optimierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



der Mikrostruktur (z. B. Korngröße  $0,5\text{--}1\ \mu\text{m}$ ), um die Risswachstumsrate zu reduzieren. Ein moderater Co-Gehalt ( $8\text{--}12\%$ ) sorgt für plastischen Puffer, und die Korngrenzenverstärkung hemmt das Risswachstum. Messmethoden wie der Umlaufbiegeversuch (ASTM E466) können die Ermüdungslebensdauer bewerten.

### **Schlagzähigkeit**

beschreibt die Bruchfestigkeit von Hartmetall bei hochenergetischer Stoßbelastung und spiegelt seine Zuverlässigkeit unter dynamischer Belastung wider. Sie basiert auf einem hohen Co-Gehalt ( $10\text{--}15\%$ ) zur Absorption von Stoßenergie, einer moderaten Korngröße ( $0,5\text{--}1\ \mu\text{m}$ ) zur Ausbalancierung von Zähigkeit und Festigkeit sowie Additiven (wie TaC) zur Verstärkung der Korngrenzen. Der Charpy-Schlagversuch (ASTM E23) ist ein gängiges Messverfahren.

Bei der Ermüdungsbeständigkeit stehen die Gleichmäßigkeit der Mikrostruktur und der Widerstand gegen Rissausbreitung im Vordergrund, während die Schlagfestigkeit eher von der plastischen Energieabsorption der Co-Phase abhängt. Um den Anforderungen unterschiedlicher Arbeitsbedingungen gerecht zu werden, müssen beide Faktoren durch eine Optimierung der Mikrostruktur in Einklang gebracht werden.

Die Ermüdungs- und Schlagfestigkeit von Hartmetall unter zyklischer Belastung ( $> 10^5$ -mal) und hoher Schlagfestigkeit ( $> 500\ \text{Hz}$ ) bestimmt direkt seine Zuverlässigkeit im Bergbau (Bohren  $> 1200\ \text{m}$ ), in der Luftfahrt (Werkzeuglebensdauer  $> 15$  Stunden) und im Formenbau (Extrusion  $> 10^6$ -mal). Die Ermüdungsfestigkeit wird durch die Risswachstumsrate ( $da/dN \sim 10^{-6}\ \text{mm/Zyklus}$ ) charakterisiert, und die Schlagfestigkeit wird anhand der Schlagenergie ( $10\text{--}30\ \text{J}$ ) bewertet. Die Optimierung muss bei der Mikrostruktur (WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}2\ \mu\text{m}$ , Co-Gehalt  $6\%\text{--}15\%$ ) und den mechanischen Eigenschaften (Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K < 25\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) ansetzen.

In diesem Abschnitt werden die Regelungsmechanismen für Ermüdungs- und Schlagfestigkeit unter drei Gesichtspunkten erörtert: Rissausbreitung unter zyklischer Belastung (basierend auf dem Pariser Gesetz), Schlagzähigkeitsprüfung (Charpy und Izod) und moderne Prüftechnologien (wie z. B. In-situ-SEM-Ermüdungsprüfung). Anhand von Bruchmechanik (Pariser Gesetz:  $da/dN = C \cdot \Delta K^m$ ), experimentellen Standards und Anwendungspraktiken werden in diesem Abschnitt die Regelungsmechanismen für Ermüdungs- und Schlagfestigkeit erörtert.

## **7.2.1 Risswachstum von Hartmetall unter zyklischer Belastung (Pariser Gesetz)**

### **Was ist das Pariser Gesetz?**

Das Pariser Gesetz ist ein grundlegendes theoretisches Modell zur Beschreibung des Ermüdungsrisswachstumsverhaltens. Es dient hauptsächlich der Vorhersage des Zusammenhangs zwischen der Risswachstumsrate und dem Spannungsintensitätsfaktorbereich von Werkstoffen unter zyklischer Belastung. Es wird häufig in der Ermüdungsanalyse von Metallen, Verbundwerkstoffen und Hartmetallen (wie WC-Co) eingesetzt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Pariser Gesetzesausdruck

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

In:

$\frac{da}{dN}$ : 裂纹扩展速率 (mm/循环), 表示每循环裂纹长度的增量。

$\Delta K$ : 应力强度因子范围 (MPa·m<sup>1/2</sup>),  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ , 其中  $K_{\max}$  和  $K_{\min}$  分别为最大和最小应力强度因子。

$C$  和  $m$ : 材料常数, 依赖于材料类型、微观结构及环境条件。

Bei Hartmetall liegt mmm normalerweise im Bereich von 2 bis 4 und CCC ist kleiner ( $\sim 10^{-10}$  bis  $10^{-8}$ ).

## Pariser Gesetz

Das Pariser Gesetz ist auf das stabile Stadium des Ermüdungsrisswachstums (d. h. Stadium II) anwendbar, d. h. die Risswachstumsrate steht in einer Potenzbeziehung zu  $\Delta K$ :

Stufe I (Schwellenbereich):  $\Delta K < \Delta K_{th}$  (Schwelle), der Riss wird nicht weiter ausgedehnt.

Stadium II (stabile Dehnungszone): Der Riss dehnt sich nach dem Pariser Gesetz aus.

Stadium III (Zone des schnellen Bruchs):  $\Delta K \rightarrow K_c$  (Bruchzähigkeit), Rissinstabilität.

## Anwendung des Pariser Gesetzes in Hartmetall

Die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall (WC-Co) kann mit dem Pariser Gesetz analysiert werden:

Mikromechanismus: Die Rissausbreitung wird durch WC-Korngrenzen und die Co-Phase beeinflusst, und die Korngrenzendurchbiegung und die plastische Absorptionsenergie von Co verringern  $d_a / d_N$ .

## Faktoren, die das Pariser Gesetz beeinflussen

Co-Gehalt: Ein höherer Co-Gehalt (10–15 %) erhöht die Plastizität und reduziert mmm.

Korngröße: Mäßige Körner (0,5–1  $\mu m$ ) reduzieren  $d_a / d_N$  durch Korngrenzenverstärkung.

Umgebung: Korrosive Umgebungen (z. B. pH < 5) können CCC erhöhen.

Messung: Durch Risswachstumstest (ASTM E647), Aufzeichnung der Beziehung  $d_a / d_N$  mit  $\Delta K$ , Anpassung von CCC und mmm.

## Bedeutung

Das Pariser Gesetz bietet eine theoretische Grundlage für die Vorhersage der Ermüdungslebensdauer von Hartmetall. Es kann zur Optimierung der Mikrostruktur (wie Korngröße und Co-Gehalt) und zur Verlängerung der Ermüdungslebensdauer eingesetzt werden. Es eignet sich für hochzyklische Belastungsszenarien wie Luftfahrtwerkzeuge und Bergbaubohrer.

## Pariser Gesetz Prinzip und technischer Überblick

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch die Risswachstumsrate ( $da / dN$ , Einheit: mm/Zyklus) charakterisiert, die dem Pariser Gesetz folgt:  $da / dN = \cdot \Delta K$

$m$ , wobei  $\Delta K$  die Amplitude des Spannungsfaktors ( $10^{-25}$  MPa·m<sup>1/2</sup>) ist,  $C$   $10^{-9}$ – $10^{-10}$  ist und  $m$  3–4 ist.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unter zyklischer Belastung (Spannungsverhältnis  $R = 0,1$ , Frequenz 5–15 Hz) muss die Risswachstumsrate von Hartmetall auf  $<10^{-6}$  mm/Zyklus begrenzt werden, um eine Lebensdauer von  $>10^5$ -fach zu gewährleisten. Eine Optimierung wird durch Kornverfeinerung (WC 0,5–1  $\mu\text{m}$ ), Co-Gehalt (8–12 %) und Oberflächenmodifizierung (z. B. Ionenimplantation) erreicht.

Ermüdungsprüfungen basieren auf der Messung der Risslänge (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm) unter Dreipunktbiegung (Last 500–1000 N). In den letzten Jahren haben sich In-situ-REM-Ermüdungsprüfungen (Auflösung  $<0,2$   $\mu\text{m}$ ) zu einem Forschungsschwerpunkt entwickelt, da damit Rissausbreitungswege (transgranulares /intergranulares Verhältnis  $<30$  %) und mikroskopische Defekte (Porengröße  $<2$   $\mu\text{m}$ ) in Echtzeit beobachtet werden können.

### Paris'sches Gesetz – Mechanismus und mechanische Analyse Das

Paris'sche Gesetz beschreibt das Verhalten bei stetigem Risswachstum (Stadium II):

$\Delta K$ -Berechnung:  $\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a}$ , wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsamplitude und  $a$  die Risslänge ( $\sim 0,1$ – $0,5$  mm) ist. Wenn  $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $d_a / d_N < 10^{-7}$  mm/Zyklus.

C- und m-Parameter: C beträgt  $10^{-9}$ – $10^{-10}$ , m beträgt 3,2–3,8 und spiegelt die Rissbeständigkeit des Materials wider. Bei einem Co-Gehalt von 10 % verringert sich C um 15–20 %.

Mikromechanismus: Die Co-Phase leitet Rissenergie durch plastische Deformation ab (Dehnung  $\sim 0,05\%$ – $0,1\%$ ) und die WC-Korngrenze (0,5  $\mu\text{m}$ ) behindert die Rissausbreitung (Rate  $<10^{-6}$  mm/Zyklus).

Hochtemperaturermüdung: Bei 800 °C beträgt die Risswachstumsrate  $<10^{-5}$  mm/Zyklus und die Oxidschicht ( $\text{WO}_3$ , Dicke  $\sim 2$   $\mu\text{m}$ ) kann  $da / dN$  um etwa 5–10 % reduzieren.

Eine In-situ-SEM-Analyse zeigt, dass der Rissausbreitungspfad hauptsächlich ein transgranularer Bruch ist (Verhältnis  $> 50$  %), und wenn der Korngrenzenablenkungswinkel 20–40 ° beträgt, sinkt  $d_a / d_N$  um 10–15 %. Beispielsweise beträgt die Risswachstumsrate von WC-10Co ( $\Delta K$  ist  $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) etwa  $10^{-7}$  mm/Zyklus, was den Anforderungen von Luftfahrtwerkzeugen entspricht.

### Analyse der Faktoren, die die Rissausbreitung beeinflussen

Die Rissausbreitung wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

Korngröße: 0,5–1  $\mu\text{m}$  kann  $da / dN$  reduzieren ( $<10^{-7}$  mm/Zyklus); wenn  $>2$   $\mu\text{m}$ ,  $da / dN > 10^{-6}$  mm/Zyklus.

Co-Gehalt: 10 % können  $K_{Ic}$  ( $>12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) optimieren, bei  $<6$  % erhöht sich  $da / dN$  um 20–30 %.

Spannungsverhältnis: Wenn  $R=0,1$ ,  $da / dN < 10^{-7}$  mm/Zyklus; wenn  $R>0,5$ , erhöht sich  $da / dN$  um 40–50 %.

Additive: Eine VC-Zugabe von 0,2–0,5 % kann die Korngrenzenfestigkeit verbessern ( $> 150$  MPa); bei  $> 0,8$  % beträgt das Sprödphasenverhältnis  $> 0,5$  %.

Bei  $R_a < 0,1$   $\mu\text{m}$  beträgt die Rissbildungszeit  $> 10^4$  Mal, bei  $> 0,2$   $\mu\text{m}$  verringert sich die Lebensdauer um 15–20 %.

Mikrodefekte: Wenn die Porosität  $<1$  % ist, ist  $da / dN < 10^{-7}$  mm/Zyklus; wenn  $>2$  %, erhöht sich  $da / dN$  um 30–40 %.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungsfeuchtigkeit: Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $<50\%$  ist  $da/dN < 10^{-7}$  mm/Zyklus; bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $>80\%$  erhöht sich  $da/dN$  aufgrund von Korrosionsermüdung um 20–25 %.

Hartmetall weist eine ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit (Lebensdauer  $> 10^5$ -fach) auf und eignet sich für hochfrequente zyklische Belastungen (z. B. Bohrkronen im Bergbau). In korrosiver Umgebung (Luftfeuchtigkeit  $> 80\%$ ) verringert sich die Lebensdauer um 15–20 %, sodass Oberflächenbeschichtungen (z. B. TiN, Dicke 1–3  $\mu\text{m}$ ) zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit erforderlich sind. Ein hochpräziser Ermüdungsprüfer (Frequenzabweichung  $< 0,2$  Hz), ein In-situ-SEM (Auflösung  $< 0,2$   $\mu\text{m}$ ) und eine Umweltkontrollbox (Feuchtigkeitsgenauigkeit  $\pm 2\%$ ) sind erforderlich.

### Strategie zur Optimierung des Pariser Gesetzes

Zur Reduzierung der Risswachstumsrate ( $< 10^{-7}$  mm/Zyklus) werden die folgenden Strategien empfohlen:

Die WC-Korngröße wird mit 0,5–1  $\mu\text{m}$  gewählt und der Co-Gehalt beträgt 10 %.

Durch die Zugabe von 0,2–0,5 % VC kann die Korngrenzenfestigkeit verbessert und  $da/dN$  um etwa 15–20 % reduziert werden.

$\mu\text{m}$  poliert und die Rissbildungszeit beträgt  $> 10^4$ -mal.

Kontrollieren Sie das Spannungsverhältnis  $R=0,1$ , um  $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  sicherzustellen.

$dN$ -Abweichung  $< 5\%$ ) wird eine Online-Rissüberwachung (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm) eingesetzt.

Sinterdichte  $> 99,5\%$ , Porosität  $< 1\%$ , kombiniert mit Ermüdungsprüfmaschine (Frequenzabweichung  $< 0,2$  Hz).

Fortschrittliche Technologie: Das Auftragen einer TiN-Beschichtung (Dicke 1–3  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2500–3000) verringert die Auswirkungen von Korrosionsermüdung und senkt  $da/dN$  um 10–15 %.

Die Leistung von ermüdungsbeständigem Hartmetall nach der Optimierung **durch technische Anwendung des Pariser Gesetzes ist hervorragend:**

Bergbaubohrer: WC-10Co (Risswachstumsrate  $\sim 10^{-7}$  mm/Zyklus), Lebensdauer  $> 10^5$ -mal bei zyklischem Aufprall, Bohrdistanz  $> 1200$  m.

Luftfahrtwerkzeuge: WC-8Co ( $K_{Ic} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), Ermüdungslebensdauer  $> 10^5$ -fach, Schnittlebensdauer  $> 15$  Stunden.

Verschleißfeste Form: WC-12Co ( $\Delta K < 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), Extrusionszeiten  $> 10^6$  mal, um 25 % erhöht.

Hochgeschwindigkeits-Schienenantriebe: WC-10Co (Korngröße 0,5  $\mu\text{m}$ , TiN-Beschichtung 2  $\mu\text{m}$ ), in Hochfrequenzzyklen ( $> 100$  Hz) beträgt die Risswachstumsrate  $\sim 10^{-8}$  mm/Zyklus und die Lebensdauer ist  $> 10^6$  mal, eine Steigerung von 40 %.

### 7.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung von Hartmetall (Charpy und Izod)

### Überblick über das Prinzip und die Technologie des Schlagzähigkeitstests mit Hartmetall

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Schlagzähigkeit beschreibt die Bruchfestigkeit von Hartlegierungen (WC-Co) unter hochenergetischen Stoßbelastungen und ist ein wichtiger Indikator für ihre Zuverlässigkeit in dynamischen Belastungsumgebungen (wie hochfrequenten Stößen oder transienten Belastungen). Die Schlagzähigkeit wird durch die Fähigkeit zur Absorption von Stoßenergie charakterisiert, üblicherweise ausgedrückt in Schlagenergie (Einheit: J). Diese wird hauptsächlich durch das plastische Verformungsvermögen der Kobalt-Bindungsphase (Co) und die Härte der Wolframkarbid-Hartphase (WC) bestimmt. Die Schlagzähigkeitsprüfung simuliert reale Arbeitsbedingungen (wie z. B. hochfrequente Stöße von Bergbaubohrern oder die dynamische Belastung von Flugzeugwerkzeugen), um die Bruchfestigkeit des Materials unter hohen Belastungen zu bewerten.

### Übersicht über Prüfverfahren:

Die Schlagzähigkeit von Hartmetall wird hauptsächlich mit zwei standardisierten Prüfverfahren gemessen: Charpy und Izod. Bei beiden Verfahren wird die Probe mit einem Pendel beaufschlagt und die zum Bruch benötigte Energie (Schlagarbeit) aufgezeichnet. Es gibt jedoch erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Probenbefestigung, der Belastungsart und der Spannungsverteilung.

#### Prüfmittel:

Pendelenergie: Die Pendelenergie beträgt serienmäßig 300 J.

Aufprallgeschwindigkeit: 4-5 m/s.

Umgebungskontrolle: Raumtemperatur (20–25 °C) ist die Standardtestbedingung. Für Tests mit niedrigen oder hohen Temperaturen sind spezielle Temperaturkontrollgeräte erforderlich.

#### Prüfungen mit hohen Dehnraten:

In den letzten Jahren haben sich Prüfungen mit hohen Dehnraten (Dehnrates  $> 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) zu einem Forschungsschwerpunkt entwickelt, da sie extreme Arbeitsbedingungen wie explosive Stöße (Geschwindigkeit  $> 50 \text{ m/s}$ ) oder Hochgeschwindigkeitsschneiden realistischer simulieren können. Bei hohen Dehnraten zeigen Werkstoffe eine höhere Dehnratenempfindlichkeit, und die Schlagzähigkeit kann abnehmen. Zur Verbesserung der Leistung ist daher eine Optimierung der Mikrostruktur erforderlich.

### Details zum Charpy-Schlagversuch

#### Konzept und Prinzip:

Der Charpy-Schlagversuch (ASTM E23) ist ein klassisches Prüfverfahren zur Schlagzähigkeitsprüfung. Dabei wird die zum Bruch erforderliche Energie durch Aufprall eines Pendels auf die Probe mittels Dreipunkt-Biegebelastung gemessen. Die Probe hat einen rechteckigen Querschnitt, üblicherweise mit einer V-Kerbe, um die unter realen Betriebsbedingungen auftretenden Spannungskonzentrationspunkte zu simulieren. Die Schlagenergie spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, Energie zu absorbieren und Rissausbreitung zu widerstehen und ist ein wichtiger Indikator für die Schlagzähigkeit von Hartmetall.

#### Probe und Belastungsmethode:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Beispielspezifikationen:

Standardgröße: 55 × 10 × 10 mm (Länge × Breite × Höhe).

Kerbenart: V-Kerbe, Tiefe 2 mm, Kerbengrundradius 0,25 mm, Kerbenwinkel 45°.

Kerbwirkung: An der Kerbspitze bildet sich eine Spannungskonzentration, die zur Rissbildung führt und so die Quantifizierung der Defektempfindlichkeit des Materials erleichtert.

### Belastungsmethode:

Die Probe wird horizontal auf zwei Drehpunkte gelegt, und das Pendel fällt aus einer bestimmten Höhe frei herab und trifft mit einer Geschwindigkeit von 4–5 m/s auf die Mitte der Probe (die Rückseite der Kerbe). Die Probe wird einer Dreipunkt-Biegespannung ausgesetzt, und der Riss beginnt an der Kerbenspitze und dehnt sich bis zum Bruch aus.

### Spannungsverteilung:

Beim Dreipunktbiegen entsteht an der Kerbe der Probe eine Zugspannung, die maximale Zugspannung konzentriert sich am Boden der Kerbe und der Spannungskonzentrationsfaktor ( $K_t$ ) beträgt etwa 2–3. Die Aufprallenergie umfasst die Rissbildungsenergie und die Rissausbreitungsenergie, wobei die Rissausbreitungsenergie den größten Einfluss hat.

### Testverfahren:

Probenverarbeitung: Die Proben werden gemäß den Standardabmessungen verarbeitet und die Kerben werden durch Drahtschneiden oder Spezialwerkzeuge verarbeitet, um eine Verarbeitungsgenauigkeit ( $\pm 0,02$  mm) zu gewährleisten.

Umweltkontrolle: Die Probe wird bei einer bestimmten Temperatur (z. B. Raumtemperatur 20–25 °C oder niedrige Temperatur –40 °C) platziert und in einer Temperaturkontrollkammer reguliert.

Stoßbelastung: Pendel loslassen, auf die Probe auftreffen, Höhenunterschied des Pendelausschlags erfassen und Stoßarbeit berechnen:

$$\text{冲击功} = m \cdot g \cdot (h_{\text{初}} - h_{\text{终}})$$

in m ist die Masse des Pendels, g ist die Erdbeschleunigung, hInitial und hfinal sind die Anfangs- bzw. Endhöhen.

### Eigenschaften und Anwendbarkeit:

Der Charpy-Test simuliert den Spannungszustand einer Dreipunktbiegung unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen (z. B. die lokale Spannung beim Auftreffen des Bohrers auf den Fels).

Es eignet sich zur Bewertung der Bruchfestigkeit von Hartmetall in Umgebungen mit hoher Stoßbelastung, insbesondere der Zähigkeitsleistung bei Vorhandensein von Defekten (Kerben).

Die Testergebnisse werden stark von der Kerbgeometrie, der Probengröße und der Temperatur beeinflusst und die Versuchsbedingungen müssen streng kontrolliert werden.

### Details zum Izod-Schlagversuch

#### Konzept und Prinzip:

Der Izod-Schlagversuch (ASTM E23) ist ein weiteres standardisiertes Prüfverfahren zur Schlagzähigkeit. Dabei wird die zum Bruch erforderliche Energie durch Aufprall eines Pendels auf das freie Ende der Probe mittels freitragender Balkenbelastung gemessen. Die Probe wird üblicherweise eingekerbt, um die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Spannungskonzentration und Rissausbreitung zu bewerten. Im Vergleich zum Charpy-Test kommt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Kraftmodus des Izod-Tests einigen tatsächlichen Arbeitsbedingungen (z. B. einer aufprallbelasteten freitragenden Struktur) näher.

#### **Probe und Belastungsmethode:**

##### **Beispielspezifikationen:**

Standardgröße:  $75 \times 10 \times 10$  mm (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe).

Kerbenart: V-Kerbe, Tiefe 2 mm, Kerbengrundradius 0,25 mm, Kerbenwinkel  $45^\circ$ .

Kerbenposition: Die Kerbe befindet sich in der Nähe des festen Probenendes, etwa 22 mm vom Einspannende entfernt.

##### **Belastungsmethode:**

Ein Ende der Probe wird an der Vorrichtung befestigt, das andere Ende aufgehängt, um eine freitragende Balkenstruktur zu bilden. Das Pendel trifft mit einer Geschwindigkeit von 4–5 m/s auf das freie Ende der Probe (die Rückseite der Kerbe). Die Probe wird einer kombinierten Biege- und Scherspannung ausgesetzt. Der Riss beginnt an der Spitze der Kerbe und weitet sich bis zum Bruch aus.

##### **Spannungsverteilung:**

Im freitragenden Balkenmodus erzeugt die Kerbe eine Überlagerung von Zug- und Schubspannung. Die maximale Zugspannung befindet sich am Boden der Kerbe, die Schubspannung verteilt sich entlang der Probendicke. Der Spannungskonzentrationsfaktor ( $K_t$ ) liegt bei etwa 2,5–3,5 und ist damit etwas höher als beim Charpy-Test. Der Rissausbreitungsverlauf wird durch die Schubspannung beeinflusst und kann sich entlang der WC - Co - Grenzfläche oder durch das Korn ausbreiten.

##### **Testverfahren:**

Probenverarbeitung: Die Proben werden gemäß den Standardabmessungen verarbeitet und die Genauigkeit der Kerbverarbeitung wird auf  $\pm 0,02$  mm kontrolliert.

Probenklemmung: Die Probe wird in der Vorrichtung fixiert, wobei darauf zu achten ist, dass das Klemmende nicht verrutscht oder sich löst.

Stoßbelastung: Das Pendel wird losgelassen, um auf das freie Ende der Probe zu treffen, der Höhenunterschied des Pendels wird aufgezeichnet und die Stoßenergie wird berechnet (die Formel ist dieselbe wie beim Charpy-Test).

##### **Eigenschaften und Anwendbarkeit:**

Der Izod-Test simuliert die Spannungsbedingungen einer freitragenden Balkenstruktur (z. B. einer Maschinenbaugruppe, die einem seitlichen Aufprall ausgesetzt ist).

Es eignet sich zur Bewertung der Schlagfestigkeit von Hartmetall unter komplexen Spannungszuständen, insbesondere in Szenarien, in denen die Scherspannung dominiert.

Aufgrund der komplexen Probenbefestigungsmethode und Spannungsverteilung können die Testergebnisse etwas niedriger ausfallen als beim Charpy-Test und sind empfindlich gegenüber den Einspannbedingungen.

#### **Vergleich von Charpy- und Izod-Tests**

Spannungsmodus: Der

Charpy-Test ist ein Dreipunkt-Biegeversuch, der hauptsächlich durch Zugspannungen beeinflusst

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

wird; der Izod-Test ist ein Auslegerbalkentest, bei dem sich Zugspannungen und Scherspannungen überlagern und der Rissausbreitungspfad komplizierter ist.

Probenfixierung:

Charpy-Prüfproben werden an beiden Enden gestützt, was die Fixierung vereinfacht; Izod-Prüfproben werden an einem Ende eingespannt, was höhere Anforderungen an die Vorrichtung stellt.

Unterschied in der Aufprallenergie:

Aufgrund der größeren Scherspannungskomponente des Izod-Tests wird mehr Risswachstumsenergie abgeleitet und die Aufprallenergie ist normalerweise etwas niedriger als die des Charpy-Tests.

Anwendungsszenarien: Der

Charpy-Test eignet sich besser zur Simulation symmetrischer Stöße (z. B. ein frontaler Aufprall eines Bohrers). Der Izod-Test eignet sich besser zur Simulation seitlicher Stöße (z. B. auf mechanische Kragteile).

### Theoretische Grundlagen und Mechanismusanalyse

Die Prüfung der Schlagzähigkeit basiert auf den Prinzipien der Bruchmechanik. Die Schlagenergie hängt mit der Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ) zusammen, die indirekt über die Energiefreisetzungsrate ( $G_c$ ) geschätzt werden kann:

$$K_{Ic} \approx \sqrt{E \cdot G_c}$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul (etwa 550–650 GPa für WC-Co) und  $G_c$  die Bruchenergie ist (beigetragen durch die Plastizität der Co-Phase und den Risswachstumswiderstand).

### Charpy-Prüfmechanismus:

Die Probe wird einem Dreipunkt-Biegestoß ausgesetzt. Die Spannung konzentriert sich an der Kerbe, und der Riss breitet sich entlang der Kerbspitze aus. Die WC-Korngrenze (Korngröße 0,5–1  $\mu\text{m}$ ) erhöht den Ausbreitungswiderstand durch Ablenkung des Rissverlaufs (Ablenkwinkel 20–40°), und die Co-Phase absorbiert Energie durch plastische Verformung (Dehnung 0,05–0,1 %).

### Mechanismus des Izod-Tests:

Im Kraftmodus des freitragenden Balkens wird der Rissausbreitungspfad durch die Scherspannung beeinflusst und kann entlang der WC-Co-Grenzfläche oder durch das Korn verlaufen. Die plastische Dissipation der Co-Phase und die behindernde Wirkung der WC-Korngrenze ähneln denen des Charpy-Tests, aber die Scherspannung erschwert die Rissauslenkung.

### Mikroskopischer Mechanismus:

Plastische Dissipation der Co-Phase: Die Co-Phase absorbiert Aufprallenergie durch plastische Deformation und verzögert die Rissausbreitung. Bei einem Co-Gehalt von 10 % beträgt die Dehnungsrate ca.  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , und die plastische Dissipation ist signifikant.

**WC 晶界阻碍:** WC 晶界通过 Orowan 强化机制 ( $\tau \sim Gb/\lambda$ ,  $\lambda < 1 \mu\text{m}$ ) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5–1  $\mu\text{m}$ ) 效果最佳。

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Bruchmorphologie: Die SEM-Analyse zeigt, dass der Bruch hauptsächlich aus Grübchen (Größe  $< 2 \mu\text{m}$ ) besteht, was darauf hindeutet, dass der plastische Bruch vorherrschend ist und die plastische Verformung der Co-Phase der Hauptmechanismus zur Energieabsorption ist.

Umweltauswirkungen:

Tieftemperatureigenschaften: Bei  $-40^\circ\text{C}$  nimmt die Zähigkeit der Co-Phase leicht ab, der entsprechende Co-Gehalt (10 %) erhält jedoch durch plastische Dissipation immer noch die Schlagzähigkeit.

Hohe Dehnungsrate: Wenn die Dehnungsrate  $> 10^3 \text{ s}^{-1}$  ist, erhöht sich die Risswachstumsrate (um etwa 15–20 %), da dem Material nicht genügend Zeit bleibt, sich vollständig plastisch zu verformen.

### Analyse der Einflussfaktoren

Die Schlagzähigkeit wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

#### Co-Inhalt:

Wirkung: Ein steigender Co-Gehalt ( $> 10\%$ ) verbessert die Schlagzähigkeit aufgrund der erhöhten plastischen Verformbarkeit.

Mechanismus: Bei einem Co-Gehalt  $< 6\%$  nimmt die Sprödigkeit des Materials zu, bei einem Co-Gehalt  $> 15\%$  nimmt die Härte ab, was sich auf die Verschleißfestigkeit auswirkt.

Empfehlung: Ein Co-Gehalt von 10–12 % ist der Ausgleichspunkt zwischen Zähigkeit und Härte.

#### Körnung:

Funktion: Mittlere Korngröße ( $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$ ) optimiert die Schlagzähigkeit.

Mechanismus: Zu feine Körner ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) verringern die Zähigkeit aufgrund vermehrter Korngrenzendefekte; zu grobe Körner ( $> 2 \mu\text{m}$ ) verringern die Korngrenzendichte und verringern den Widerstand gegen Rissausbreitung.

#### Zusatzstoff:

Funktion: Durch Zugabe von VC oder TaC wird die Schlagzähigkeit verbessert.

Mechanismus: VC ( $0,2\text{--}0,5\%$ ) hemmt das Kornwachstum und stärkt die Korngrenzen; eine übermäßige Menge ( $> 0,8\%$ ) bildet eine spröde Phase und verringert die Zähigkeit.

#### Kerbtiefe:

Wirkung: Die Kerbtiefe nimmt zu und die Spannungskonzentration verstärkt sich.

Mechanismus: Wenn die Kerbtiefe  $> 3 \text{ mm}$  ist, steigt der Spannungskonzentrationsfaktor und die Schlagzähigkeit nimmt ab.

Standard: 2 mm ist die Standardprüftiefe.

#### Sinterdichte:

Funktion: Hohe Dichte verbessert die Schlagzähigkeit.

Mechanismus: Wenn die Dichte  $< 98\%$  beträgt, nimmt die Porosität zu ( $> 2\%$ ) und die Poren werden zu Rissquellen, was die Zähigkeit verringert.

Empfohlen: Dichte  $> 99\%$ , Porosität  $< 1\%$ .

#### Prüftemperatur:

Wirkung: Niedrige Temperaturen verringern die Schlagzähigkeit.

Mechanismus: Bei Temperaturen unter  $-60^\circ\text{C}$  nimmt die Zähigkeit der Co-Phase deutlich ab und der Anteil spröder Brüche nimmt zu.

#### Dehnungsrate:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wirkung: Eine hohe Dehnungsrate verringert die Schlagzähigkeit.

Mechanismus: Bei einer Dehnungsrate  $>10^3 \text{ s}^{-1}$  hat das Material nicht genügend Zeit zur plastischen Verformung und die Rissausbreitung wird beschleunigt.

### Optimierungsstrategie

Um die Schlagzähigkeit von Hartmetall zu verbessern, können die folgenden Strategien angewendet werden:

#### Mikrostrukturopptimierung:

Der Co-Gehalt beträgt 10–12 %, die WC-Korngröße 0,5–1  $\mu\text{m}$ , wodurch Zähigkeit und Härte ausgeglichen werden.

#### Additivkontrolle:

Durch die Zugabe von 0,2–0,5 % VC oder TaC können die Korngrenzenfestigkeit erhöht und die Schlagzähigkeit verbessert werden.

#### Prozesskontrolle:

Sinterdichte  $>99\%$ , Porosität  $<1\%$ , erreicht durch Vakuumintern (1400–1500°C, Vakuum  $<10^{-2} \text{ Pa}$ ).

#### Testgenauigkeit:

Die Bearbeitungsgenauigkeit der Kerbtiefe beträgt  $\pm 0,02 \text{ mm}$  und die Pendelenergieabweichung liegt bei  $<0,5 \text{ J}$ .

#### Verbesserte Leistung bei niedrigen Temperaturen:

Durch die Zugabe von Ni (1–3 %) als zusätzliche Bindephase wird die Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen verbessert und die hohe Schlagzähigkeit bei  $-60^\circ\text{C}$  aufrechterhalten.

#### Fraktographische Analyse:

mittels SEM (Auflösung  $<0,2 \mu\text{m}$ ). Die Grübchengröße betrug  $<2 \mu\text{m}$ , was darauf hindeutet, dass ein plastischer Bruch vorherrschend war.

### Ingenieuranwendungspraxis

Hartmetall mit hoher Schlagzähigkeit eignet sich gut für eine Vielzahl von Szenarien:

Bergbaubohrer: WC-10Co (Co-Gehalt 10 %), mit optimierter Mikrostruktur, um den Anforderungen an hochfrequente Stöße ( $> 500 \text{ Hz}$ ) gerecht zu werden.

Luftfahrtwerkzeuge: WC-8Co, geeignet für dynamische Belastungen beim Hochgeschwindigkeitsschneiden ( $>800 \text{ m/min}$ ).

Verschleißfeste Matrice: WC-12Co, widersteht Hochfrequenzprägung ( $>10^6$ -mal).

Tiefseeventil: WC-10Co, funktioniert gut bei Hochdruckeinwirkung ( $> 80 \text{ MPa}$ ) in der Tiefsee.

Form für Windturbinenblätter: WC-10Co (Ni 2 %), stabil bei niedrigen Temperaturen ( $-60^\circ\text{C}$ ) und hoher Dehnungsrate ( $> 10^3 \text{ s}^{-1}$ ).

### Schlagzähigkeitsprüfung mit Hartmetall (Charpy und Izod) – Tabellenvergleich

Nachfolgend finden Sie einen direkten Vergleich der Prüfmethoden für die Schlagzähigkeit nach Charpy und Izod in Hartmetall (WC-Co) in Form einer Tabelle. Dabei werden die Konzepte, Probenspezifikationen, Belastungsmethoden, Spannungsverteilung, Prüfverfahren,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eigenschaften und Anwendbarkeit, Mikromechanismen und Einflussfaktoren behandelt.

| Projekt                   | Charpy-Schlagversuch (ASTM E23)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Izod-Schlagprüfung (ASTM E23)                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Konzept<br>Prinzip        | Es wird die Dreipunkt-Biegemethode angewendet. Das Pendel prallt auf die Probe, um die zum Bruch erforderliche Energie (Schlagarbeit) zu messen. Die Probe verfügt über eine V-Kerbe, um die Spannungskonzentration zu simulieren und die Bruchfestigkeit zu bewerten.                                                                                                                                                                                                                | Es wird die Belastungsmethode eines freitragenden Balkens angewendet. Das Pendel schlägt auf das freie Ende der Probe, um die Bruchenergie zu messen. Die Probe wird eingekerbt, um die Widerstandsfähigkeit gegen Spannungskonzentration und Rissausbreitung zu bewerten.                                       |
| Probe<br>Spezifikation    | – Abmessungen: $55 \times 10 \times 10$ mm (Länge $\times$ Breite $\times$ Höhe). – Kerbe: V-förmig, Tiefe 2 mm, Bodenradius 0,25 mm, Winkel $45^\circ$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | – Maße: $75 \times 10 \times 10$ mm (Länge $\times$ Breite $\times$ Höhe). – Kerbe: V-förmig, 2 mm tief, 0,25 mm Bodenradius, $45^\circ$ -Winkel, ca. 22 mm vom Einspannende entfernt.                                                                                                                           |
| laden<br>Weg              | Die Probe wird horizontal auf zwei Drehpunkte gelegt und das Pendel schlägt mit einer Geschwindigkeit von 4–5 m/s auf die Mitte der Probe (die Rückseite der Kerbe) auf, wodurch eine Dreipunkt-Biegekräft entsteht.                                                                                                                                                                                                                                                                  | Ein Ende der Probe ist an der Vorrichtung befestigt, das andere Ende ist aufgehängt und bildet so einen Auslegerbalken. Das Pendel trifft mit einer Geschwindigkeit von 4–5 m/s auf das freie Ende der Probe (die Rückseite der Kerbe).                                                                          |
| Stress<br>verteilt        | Der Spannungskonzentrationsfaktor ( $K_t$ ) beträgt etwa 2–3. Die Aufprallenergie wird hauptsächlich durch die Rissausdehnungsenergie verursacht.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Zugspannung und Schubspannung überlagern sich an der Kerbe. Die maximale Zugspannung liegt am Kerbgrund, die Schubspannung verteilt sich über die Dicke. Der Spannungskonzentrationsfaktor ( $K_t$ ) beträgt etwa 2,5–3,5.                                                                                       |
| prüfen<br>Verfahren       | 1. Probe und Kerbe bearbeiten (Genauigkeit $\pm 0,02$ mm). 2. Bei einer bestimmten Temperatur lagern (z. B. 20–25 °C oder -40 °C). 3. Mit einem Pendel aufprallen, Höhenunterschied erfassen und Aufprallenergie berechnen: Aufprallenergie = $m \cdot g \cdot (h_{\text{initial}} - h_{\text{final}})$ .                                                                                                                                                                             | 1. Bearbeiten Sie die Probe und die Kerbe (Genauigkeit $\pm 0,02$ mm). 2. Fixieren Sie ein Ende der Probe, um sicherzustellen, dass es nicht locker ist. 3. Das Pendel schlägt auf das freie Ende, erfasst den Höhenunterschied und berechnet die Aufprallenergie (die Formel ist dieselbe wie bei Charpy).      |
| Merkmale<br>Anwendbarkeit | – Simuliert Dreipunkt-Biegespannung (z. B. Frontalaufprall eines Bohrers). – Geeignet zur Bewertung der Bruchfestigkeit von Hartmetall bei symmetrischem Aufprall. – Die Ergebnisse werden stark von der Kerbgeometrie und der Temperatur beeinflusst.                                                                                                                                                                                                                                | – Simuliert freitragende Balkenkräfte (z. B. seitliche Stöße auf mechanische Teile). – Geeignet zur Bewertung der Schlagfestigkeit von Hartmetall unter komplexen Spannungszuständen. – Die Ergebnisse sind empfindlich gegenüber den Einspannbedingungen.                                                       |
| Mikro<br>Mechanismus      | – Plastische Dissipation der Co-Phase: Die Co-Phase absorbiert Energie durch plastische Deformation (Dehnung 0,05 % – 0,1 %) und verzögert so die Rissausbreitung. – WC-Korngrößenhindernis: Korngrößen (0,5 – 1 $\mu\text{m}$ ) erhöhen den Widerstand durch Ablenkung von Rissen (Winkel $20^\circ$ – $40^\circ$ ). – Scherspannungen entlang der WC-Co-Grenzfläche Bruchmorphologie: Es dominieren Grübchen (Größe $< 2 \mu\text{m}$ ), die auf einen plastischen Bruch hinweisen. | – Plastische Dissipation der Co-Phase: Ähnlich wie Charpy absorbiert die Co-Phase Energie plastisch. – WC-Verstopfung der WC-Korngrößen: Der Rissverlauf ist komplizierter und kann sich unter dem Einfluss von oder durch das Korn erstrecken. – Bruchmorphologie: Hauptsächlich Grübchen, aber Scherspannungen |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

| Projekt      | Charpy-Schlagversuch (ASTM E23)                                                                                                                                                                                                                       | Izod-Schlagprüfung (ASTM E23)                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |                                                                                                                                                                                                                                                       | können den Anteil intergranularer Brüche erhöhen.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Beeinflussen | - Co-Gehalt: 10–12 % gleicht Zähigkeit und Härte aus. - Korngröße: 0,5–1 µm ist optimal, zu fein oder zu grob verringert die Zähigkeit. - Zusätze: VC (0,2–0,5 %) stärkt die Korngrenzen, zu viel (> 0,8 %) bildet spröde Phasen. - Kerbtiefe: > 3 mm | - Co-Gehalt: wie bei Charpy, 10–12 % sind gut. - Korngröße: 0,5–1 µm ist am besten. - Zusätze: VC (0,2–0,5 %) hat die gleiche Wirkung. - Kerbtiefe: > 3 mm verringert die Zähigkeit. - Sinterdichte: > 99 %, Porosität < 1 %. - Temperatur: < –60 °C verringert die Zähigkeit. - Dehnungsgeschwindigkeit: > 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> |
| Faktor       | Spannungskonzentration verstärkt und verringert die Zähigkeit. - Sinterdichte: > 99 %, Porosität < 1 %. - Temperatur: < –60 °C Zähigkeit nimmt ab. - Dehnungsrate: > 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> beschleunigt Risswachstum (ca. 15–20 %).         | beschleunigt das Risswachstum, die Wirkung ist aufgrund der Scherspannung etwas größer als bei Charpy.                                                                                                                                                                                                                                      |

### 7.3 Analyse des Versagensmechanismus von Hartmetall

Hartmetall neigt unter harten Arbeitsbedingungen (hohe Reibung > 800 MPa, Aufprall > 500 Hz, hohe Temperatur > 800 °C) zu Verschleiß (Verschleißrate > 0,1 mm<sup>3</sup>/Nm) und Bruchabplatzungen (Risslänge > 0,05 mm). Dies kann zum Versagen von Werkzeugen in der Luftfahrt (Lebensdauer < 10 Stunden), Bergbaubohren (Bohren < 1000 m) und Matrizen (Extrusion < 10<sup>6</sup>-fach) führen. Die Analyse des Versagensmechanismus deckt die Ursache der Leistungsminderung durch ein Verschleißmodell (Archard-Formel), Bruchmechanik (Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t > 1,5$ ) und fortschrittliche Analysetechniken (wie Röntgen-Mikrotomografie) auf und schafft so eine Grundlage für die Optimierung.

In diesem Abschnitt werden die Versagensmechanismen unter drei Gesichtspunkten erörtert: Verschleißversagen (Abrasionsverschleiß, Adhäsionsverschleiß), Bruch und Abplatzen (Spannungskonzentration und Mikrorisse) sowie Umwelteinflüsse (hohe Temperaturen, Korrosion). Mikroskopische Analysen (SEM, Röntgen-Mikrotomografie), mechanische Modelle ( $K_t$  c 10-14 MPa·m<sup>1/2</sup>) und Fallstudien werden kombiniert.

#### 7.3.1 Verschleißschäden an Hartmetall (Abrasiveverschleiß, Adhäsivverschleiß)

##### Verschleißprinzip und Technologieübersicht bei

**Hartmetall** Verschleiß ist die häufigste Form von Hartmetallversagen und umfasst abrasiven Verschleiß (Schneiden durch harte Partikel, Verschleißrate ~0,1 mm<sup>3</sup>/N·m) und adhäsiven Verschleiß (Materialübertragung, Verschleißtiefe >5 µm). Abrasiver Verschleiß tritt häufig im Bergbau auf (Gesteinshärte >800 HV), adhäsiver Verschleiß noch häufiger beim Schneiden (Temperatur >600 °C). Basierend auf der Archard-Formel ( $V = k \cdot F \cdot S / H$ ) erfordert die Optimierung eine Verbesserung der Härte (HV 1500) und Oberflächengüte (Ra <0,1 µm).

Verschleißtests basieren auf einem Sandfluss von 200–400 g/min und einer Last von 100–150 N. In den letzten Jahren hat sich die Röntgen-Mikrotomographie (Auflösung <1 µm) zu einem

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Forschungsschwerpunkt entwickelt, mit der die Morphologie von Verschleißnarben in drei Dimensionen (Rillenbreite  $<10\text{ }\mu\text{m}$ ) rekonstruiert werden kann.

### **Verschleißversagensmechanismus und Analyse von Hartmetall**

#### **Abrasiver Verschleiß**

Hartpartikel ( $\text{SiO}_2$ , Härte  $> 800\text{ HV}$ ) schneiden WC (Tiefe  $0,5\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ ) und bilden Rillen (Breite  $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ ). Bei einer Härte von  $1500\text{ HV}$  beträgt die Verschleißrate  $< 0,1\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ; bei einer Härte von  $< 1200$  erhöht sich die Verschleißrate um  $20\text{--}30\%$ .

#### **Haftschicht**

Bei hohen Temperaturen ( $>600^\circ\text{C}$ ) erweicht die Co-Phase ( $\text{HV}\sim 300$ ) und es kommt zur Materialübertragung auf die Gegenfläche (Dicke  $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ ). Eine WC-Korngröße von  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  verringert die Haftung (Verschleißrate  $< 0,12\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ).

#### **Verschleiß bei hohen Temperaturen**

Bei  $800\text{ }^\circ\text{C}$  beträgt die Verschleißrate  $< 0,15\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  und es bildet sich eine Oxidschicht ( $\text{WO}_3$ , Dicke  $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ ), die den Verschleiß um  $5\text{--}10\%$  reduziert.

#### **Korrosion und Verschleiß**

In saurer Umgebung ( $\text{pH} < 5$ ) erhöht sich die Verschleißrate um  $15\text{--}20\%$ , wobei die Auflösung der Co-Phase (Rate  $\sim 10^{-10}\text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$ ) die Hauptursache ist.

Die Röntgen-Mikrotomographie zeigt, dass abrasiver Verschleiß hauptsächlich rillenförmig ist und adhäsiver Verschleiß von Rissgruben (Durchmesser  $\sim 5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ ) begleitet wird. Beispielsweise beträgt die Verschleißrate von WC-10Co (Korn  $0,5\text{ }\mu\text{m}$ )  $< 0,1\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , was den Anforderungen des Bergbaus entspricht.

### **Analyse der Faktoren, die den Verschleißschaden**

**von Hartmetall beeinflussen**. Der Verschleißschaden wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst:

**Härte:** Bei  $\text{HV } 1500$  beträgt die Verschleißrate  $< 0,1\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , bei  $< 1200$  erhöht sich die Verschleißrate um  $20\text{--}30\%$ .

**Korngröße:** Bei  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$  ist die Verschleißrate gering, bei  $> 2\text{ }\mu\text{m}$  erhöht sich die Verschleißrate um  $15\text{--}20\%$ .

**Co-Gehalt:** Bei einem Co-Gehalt von  $10\%$  ist der adhäsive Verschleiß geringer, bei einem Co-Gehalt von  $> 15\%$  erhöht sich die Verschleißrate um  $10\text{--}15\%$ .

**Oberflächenrauheit:** Wenn  $\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m}$  ist, ist die Verschleißrate gering; wenn sie  $> 0,2\text{ }\mu\text{m}$  ist, erhöht sich die Verschleißrate um  $20\text{--}25\%$ .

**Betriebstemperatur:**  $> 600^\circ\text{C}$ , Adhäsionsverschleiß erhöht sich um  $40\%\text{--}50\%$ .

**Schleifkorngröße:** Bei  $< 50\text{ }\mu\text{m}$  beträgt die Verschleißrate  $< 0,1\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ , bei  $> 100\text{ }\mu\text{m}$  erhöht sich die Verschleißrate um  $30\%\text{--}40\%$ .

**Umweltkorrosion:** Bei einem pH-Wert  $< 5$  erhöht sich die Verschleißrate um  $15\text{--}20\%$ , bei einem pH-Wert  $> 7$  ändert sich die Verschleißrate um  $< 5\%$ .

die Verschleißrate ( $< 0,1\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ ) **zu verringern**

, werden folgende Strategien empfohlen:

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

Die WC-Korngröße wird mit 0,5–1  $\mu\text{m}$  gewählt und die Härte beträgt HV 1500.

Der Co-Gehalt beträgt 10 %, um den Adhäsionsverschleiß zu verringern.

Die Oberfläche wird auf  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  poliert und die Verschleißrate um 15–20 % reduziert.

Durch Zugabe von 0,2–0,5 % VC kann die Härte um 3–5 % erhöht werden.

Durch die Verwendung von Kühlmittel (Temperatur  $< 500^\circ\text{C}$ ) wird der adhäsive Verschleiß um 20–30 % reduziert.

$\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( 0,1–0,3 %) bildet unter Hochtemperaturbedingungen eine  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  -Schicht (Dicke  $\sim 1 \mu\text{m}$  ), und die Verschleißrate verringert sich um 5–10 %.

Beschichtungsschutz: Durch Aufbringen einer CrN- Beschichtung (Dicke 2–4  $\mu\text{m}$  , Härte HV 3000–3500) wird die Verschleißrate auf  $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  reduziert.

### Hartmetallverschleißfehler – Technische Anwendungspraxis:

Verschleißarmes Hartmetall bietet gute Leistung:

Bergbaubohrer: WC-10Co (Verschleißrate  $< 0,1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  ), Bohrdistanz  $> 1200 \text{ m}$  , eine Steigerung von 40 %.

Luftfahrtwerkzeuge: WC-8Co (Härte HV 1500), geringer adhäsiver Verschleiß, Lebensdauer  $> 15$  Stunden.

Verschleißfeste Matriz: WC-12Co ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  ) , Verschleißrate  $< 0,12 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  , Extrusionszeiten  $> 10^6$  mal .

Flugzeugturbinschaufeln: WC-10Co (Korngröße 0,5  $\mu\text{m}$  , CrN -Beschichtung 3  $\mu\text{m}$  ) , bei Hochtemperaturverschleiß ( $> 800^\circ\text{C}$ ), Verschleißrate  $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  , Lebensdauer  $> 4000$  Stunden, eine Steigerung von 40%.

### 7.3.2 Bruch und Abplatzungen bei Hartmetall (Spannungskonzentration und Mikrorisse)

#### Prinzip und Technologieübersicht

Brüche und Abplatzungen werden durch Spannungskonzentrationen ( $K_t > 1,5$  ) und Mikrorisse (Länge  $> 0,05 \text{ mm}$ ) verursacht, die häufig bei Werkzeugen in der Luftfahrt (Lebensdauer  $< 10$  Stunden) und Bohrmeißeln im Bergbau (Bohrung  $< 1000 \text{ m}$ ) auftreten. Brüche basieren auf der Bruchmechanik ( $K_t$  10-14  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ) , und Abplatzungen gehen mit einem Versagen der Grenzfläche einher (Bindungsfestigkeit  $< 40 \text{ MPa}$ ). Zur Optimierung sind eine Erhöhung von  $K_t$  und der Grenzflächenenergie ( $< 1,5 \text{ J/m}^2$  ) erforderlich .

Fehleranalyse: Risse wurden mittels Rasterelektronenmikroskop (SEM) (Auflösung  $< 0,2 \mu\text{m}$ ), Computertomographie (Genauigkeit  $\pm 0,02 \text{ mm}$ ) und Schallemissionsmessung (Frequenzbereich 20 kHz–500 kHz) erkannt . Beispielsweise betrug die Lebensdauer von WC-10Co-Werkzeugen aufgrund von Abplatzungen durch Mikrorisse  $< 10$  Stunden.

#### Mechanismus und Analyse

Bruch: Spannungskonzentration ( $K_t$  ist 1,8-2,0) löst Risswachstum aus (Geschwindigkeit  $10^2 \text{ m/s}$ ) und ein Bruch tritt auf , wenn  $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (Risslänge  $> 0,5 \text{ mm}$ ).

Abplatzen: Grenzflächenspannungen ( $> 80 \text{ MPa}$ ) führen zum Reißen der Co-Phase (Tiefe  $\sim 5-10 \mu\text{m}$  ) , die Bindungsstärke liegt bei  $< 40 \text{ MPa}$ .

Rissverlauf: Transgranularer Bruch (WC-Kornbruch, Größe 0,5  $\mu\text{m}$  ) und intergranularer Bruch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Korngrenzenablösung, Breite 0,05–0,1  $\mu\text{m}$ ) treten gleichzeitig auf. Bei einem Rissablenkungswinkel von 20–40° verringert sich die Ausdehnungsrate um 5–10 %.

Umweltauswirkungen: In einer korrosiven Umgebung (NaCl-Konzentration 3,5 %) erhöht sich die Risswachstumsrate um 20–25 %, und Spannungskorrosion (SCC) ist die Hauptursache.

<sup>3</sup>-mal im Voraus). Beispielsweise beträgt die Bruchrate von WC-10Co ( $K_{Ic} < 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )  $< 0,2 \%$ , was den Werkzeuganforderungen entspricht.

Analyse der Einflussfaktoren

Bruch und Abplatzungen werden durch folgende Faktoren beeinflusst:

$K_{Ic}$ : Wenn  $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ist, beträgt die Bruchrate  $< 0,2 \%$ , wenn sie  $< 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ist, erhöht sich die Bruchrate um 40–50 %.

Korngröße: Bei 0,5–1  $\mu\text{m}$  breitet sich der Riss langsam aus, bei  $> 2 \mu\text{m}$  erhöht sich die Bruchrate um 20–30 %.

Co-Gehalt: Bei 10 % ist die Ablöserate geringer, bei  $< 6 \%$  erhöht sich die Ablöserate um 15–20 %.

Oberflächendefekte: Wenn die Risslänge  $> 0,05 \text{ mm}$  ist, erhöht sich die Bruchrate um 40–50 %.

Spannungskonzentration: Wenn  $K_t > 2$ , erhöht sich die Abplatzrate um 30–40 %.

Umweltkorrosion: Wenn die NaCl-Konzentration  $> 3,5 \%$  ist, erhöht sich die Risswachstumsrate um 20–25 %.

Temperatur: Bei  $> 600^\circ\text{C}$  führt thermische Spannung ( $> 150 \text{ MPa}$ ) zu einer um 15–20 % erhöhten Abplatzrate.

### Optimierungsstrategie

Zur Reduzierung von Brüchen und Abplatzungen ( $< 0,2 \%$ ) werden folgende Strategien empfohlen: Der Co-Gehalt beträgt 10 % und die WC-Korngröße 0,5 bis 1  $\mu\text{m}$ , um  $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  zu erreichen.

Durch Zugabe von 0,2–0,5 % VC kann die Korngrenzenfestigkeit um 5–10 % erhöht werden.

Die Oberfläche wird auf  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  poliert und die Rissbildung um 20–25 % reduziert.

Gestalten Sie die abgerundeten Ecken (Radius  $> 0,5 \text{ mm}$ ) so, dass  $K_t < 1,5$  ist.

Zur Erkennung von Mikrorissen wurden CT-Scans (Genauigkeit  $\pm 0,02 \text{ mm}$ ) und Schallemission (Frequenzbereich 20 kHz–500 kHz) verwendet.

Korrosionsschutz: Durch das Aufbringen einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke 1–3  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2500–3000) werden die Auswirkungen der Spannungskorrosion gemindert und die Bruchrate auf  $< 0,1 \%$  gesenkt.

### Technische Anwendungspraxis:

Hartmetall mit geringer Bruchrate zeigt gute Leistungen:

Luftfahrtwerkzeuge: WC-10Co ( $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), Bruchrate  $< 0,2 \%$ , Lebensdauer  $> 15$  Stunden.

Bergbaubohrer: WC-8Co (Abtragsrate  $< 0,2 \%$ ), Bohrdistanz  $> 1200 \text{ m}$ , eine Steigerung von 40 %.

Verschleißfeste Form: WC-12Co ( $K_t < 1,5$ ), Extrusionszeiten  $> 10^6$ -fach, um 25 % erhöht.

PCB-Bohrer: WC-10Co (Korn 0,5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung 2  $\mu\text{m}$ ), beim Bohren unter hoher Belastung ( $> 10^4$  Löcher) beträgt die Bruchrate  $< 0,1 \%$  und die Lebensdauer beträgt  $> 10^5$  Löcher, was einer Verbesserung um 80 % entspricht.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.4 Strategien zur Verbesserung der Hartmetallleistung

### 7.4.1 Strategie zur Leistungssteigerung bei Hartmetall – Kornverfeinerung bei Hartmetall

#### Überblick über das Prinzip und die Technologie der Kornverfeinerung bei Hartmetall

Die Kornverfeinerung von Hartmetall (WC-Co) ist eine Technologie zur mikrostrukturellen Optimierung, mit der die Korngröße von Wolframkarbid (WC) präzise auf unter 0,5 µm eingestellt werden kann. Dieser Prozess verbessert die Härte und Festigkeit des Materials erheblich und legt eine solide Grundlage für die Anwendung von Hartmetall unter harten Arbeitsbedingungen. Die Kornverfeinerung beruht auf dem Hall-Petch-Effekt ( $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$ ), der besagt, dass mit abnehmender Korngröße die Korngrenzendichte erheblich zunimmt (bis zu  $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ), wodurch die Beständigkeit des Materials gegen plastische Verformung und Risswachstum verbessert wird. Durch diese Veredelungstechnologie kann die Härte auf HV 1600–1800 und die Festigkeit auf über 4500 MPa erhöht werden, wodurch sich Hartmetall hervorragend für hochfeste Werkzeuge und verschleißfeste Komponenten eignet.

Der Kernprozess zur Kornverfeinerung umfasst eine 20–40-stündige Hochenergie-Kugelmahlung mit schnell rotierenden Mahlkörpern (z. B. Wolframkarbidkugeln), um die Rohstoffe mechanisch zu zerkleinern und gleichmäßig zu vermischen. Anschließend erfolgt eine Vakuumsinterung (Temperaturbereich 1400–1500 °C, strenge Vakuumkontrolle  $<10^{-2}$  Pa), um die Korngrößenstabilität zu gewährleisten und übermäßiges Kornwachstum zu vermeiden. In den letzten Jahren haben technologische Fortschritte die Einführung von Mehrkomponentenadditiven (z. B. VC+TaC+ ZrC) zur weiteren Optimierung der Kornverfeinerung gefördert. Diese Additive werden in einem geringen Verhältnis von 0,1–0,3 % hinzugefügt, wodurch die Korngröße im ultrafeinen Bereich von 0,2–0,5 µm gehalten werden kann, wodurch die Härte auf HV 1800–2000 gesteigert wird und gleichzeitig die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) auf  $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erhöht wird, was mehr Möglichkeiten für High-End-Anwendungen bietet.

#### Mechanismus und Analyse der Kornverfeinerung von Hartmetall

Die Kornverfeinerung verbessert die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall deutlich, indem sie die WC-Korngröße ( $<0,5 \text{ µm}$ ) reduziert. Der Mechanismus kann auf mikroskopischer Ebene eingehend analysiert werden:

#### Korngrenzenverstärkung

- Korngröße auf  $<0,5 \text{ µm}$  steigt die Korngrenzendichte deutlich an ( $>10^{13} \text{ m}^{-2}$ ). Gemäß dem Hall-Petch -Effekt erhöht sich die Materialhärte um 25–30 % (HV 1600–1800) und die Festigkeit um etwa 20–25 %. Dieses hochdichte Korngrenzennetzwerk behindert wirksam Versetzungsbewegungen und verbessert die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Verformungen.

#### Orowan-Verbesserung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Wenn der Kornabstand  $\lambda$  auf  $<0,5 \mu\text{m}$  reduziert wird, erhöht sich der Verstärkungsfaktor  $\tau \sim Gb/\lambda$  (wobei  $G$  der Schubmodul und  $b$  der Burgers-Vektor ist) deutlich, und Versetzungen bleiben an den Korngrenzen hängen, was die Gleitfestigkeit weiter verbessert. Dieser Mechanismus ist besonders bei feinen Körnern ausgeprägt.

### **Mikroskopische Gleichmäßigkeit**

Die feinen Körner sind gleichmäßig verteilt, wodurch lokale Spannungskonzentrationspunkte reduziert, das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit verbessert und das Material weniger anfällig für Sprödbrüche bei hoher Belastung wird.

lässt sich durch eine Verfeinerung der Korngröße auf  $<0,5 \mu\text{m}$  eine Härte von HV 1700 erreichen und die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  liegt bei etwa  $12\text{--}13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Diese Kombination von Eigenschaften macht diese Legierung besonders geeignet für hochfeste Werkzeuge wie Bohrer für den Bergbau und Schneidwerkzeuge für die Luftfahrt.

### **Analyse der Einflussfaktoren**

Der Effekt der Kornverfeinerung wird durch eine Kombination aus Prozessparametern und Materialzusammensetzung beeinflusst, darunter:

#### **Körnung**

Wenn die Korngröße auf  $<0,5 \mu\text{m}$  eingestellt wird, kann die Härte 1600 HV überschreiten; wenn die Korngröße jedoch  $1 \mu\text{m}$  überschreitet, nimmt die Korngrenzendichte ab, die Härte fällt auf  $<1500 \text{ HV}$  und der Leistungsvorteil geht allmählich verloren.

#### **Kugelmahlzeit**

Durch energiereiches Kugelmahlen über 20–40 Stunden kann die Korngröße effektiv auf  $<0,5 \mu\text{m}$  verfeinert werden. Wenn die Kugelmahlzeit weniger als 15 Stunden beträgt, kann die Korngröße  $1 \mu\text{m}$  überschreiten, was zu einem unbefriedigenden Verfeinerungseffekt führt.

#### **Sintertemperatur**

Im Temperaturbereich von  $1400\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$  bleiben die Körner stabil und übermäßiges Wachstum wird vermieden. Übersteigt die Temperatur  $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ , können die Körner auf  $>1 \mu\text{m}$  wachsen und die Leistung nimmt ab.

#### **Co-Inhalt**

Bei einem Co-Gehalt von 10 % kann die Bruchzähigkeit  $K_{IC} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  erreichen, was einen ausreichenden plastischen Puffer bietet; bei einem Co-Gehalt unter 6 % nimmt die Zähigkeit deutlich ab ( $K_{IC} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), was den Anwendungsbereich des Materials einschränkt.

### **Optimierungsstrategie**

Um die hohen Leistungsziele (Härte HV 1700, Bruchzähigkeit  $K_{IC} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) zu erreichen, werden folgende Optimierungsstrategien empfohlen:

Die WC-Korngröße  $<0,5 \mu\text{m}$  wurde ausgewählt und durch 20–40 Stunden langes Hochenergie-Kugelmahlen erreicht, um sicherzustellen, dass die Rohstoffe vollständig zerkleinert und gleichmäßig gemischt wurden.

Die Sintertemperatur wird streng auf  $1400\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$  kontrolliert und das Vakuum wird bei  $<10^{-2} \text{ Pa}$

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

gehalten, um Kornwachstum und Oxidationsreaktionen zu verhindern.

Der Co-Gehalt wird bei 10 % gehalten und das Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte durch Anpassung des Verhältnisses optimiert.

Verwendung eines Laser-Partikelgrößenanalysators (Messabweichung  $<0,02 \mu\text{m}$ ), um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten und zu vermeiden, dass lokale Überkornpartikel die Leistung beeinträchtigen.

### **Ingenieuranwendungspraxis**

Kornfeinstes Hartmetall zeigt in zahlreichen technischen Anwendungen eine hervorragende Leistung:

#### **Bergbaubohrer**

WC-10Co (Korngröße  $<0,5 \mu\text{m}$ ) mit einer Härte von HV 1700 kann die Bohrdistanz deutlich auf  $>1500 \text{ m}$  verlängern, eine Steigerung von 50 % gegenüber herkömmlichen Verfahren, wodurch die Effizienz des Bergbaus effektiv verbessert wird.

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

WC-8Co (Korngröße  $<0,5 \mu\text{m}$ ), durch Kornverfeinerung wird die Lebensdauer auf  $>15$  Stunden verlängert, eine Steigerung von 25 %, die den Anforderungen an hochpräzises Schneiden gerecht wird.

#### **Verschleißfeste Form**

WC-12Co (Korngröße  $<0,5 \mu\text{m}$ ), Extrusionszeiten übersteigen das  $10^6$ -fache, Leistungsverbesserung von 25 %, geeignet für Hochfrequenz-Stanzvorgänge.

## **7.4.2 Strategien zur Verbesserung der Hartmetalleistung, Hartmetallzusätze (VC, TaC)**

### **Prinzip und technischer Überblick**

Die Leistung von Hartmetall wird durch die Zugabe von Additiven (wie VC, TaC) verbessert. Diese optimieren die Mikrostruktur, erhöhen die Korngrenzenfestigkeit deutlich und verhindern das Wachstum von WC-Körnern, wodurch die Gesamtleistung des Materials verbessert wird. Die zugesetzte Menge von VC und TaC wird üblicherweise auf 0,2–0,5 % begrenzt. Durch Mischkristallverfestigung und Korngrenzenmodifizierung wird die Härte auf 1.600–1.800 HV und die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) auf  $10\text{--}14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  erhöht. Der Prozessablauf umfasst ein Hochenergie-Kugelmahlen, um die Additive gleichmäßig mit den Rohstoffen zu vermischen und diese dann in einer Vakuumsinter-Umgebung bei  $1.400\text{--}1.500 \text{ }^\circ\text{C}$  zu verfestigen. In den letzten Jahren hat sich die Entwicklung von Multiadditiven (wie VC+TaC+ ZrC, mit einem Verhältnis von 0,1–0,3 %) zu einem wichtigen Forschungsschwerpunkt entwickelt. Der synergistische Effekt dieser Additive steigert die Härte auf HV 1800-2000 und  $K_{IC}$  auf  $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  und bietet so neue Möglichkeiten für die Anwendung von Hartmetall unter extremen Arbeitsbedingungen.

### **Mechanismus und Analyse**

Additive verbessern die Leistung von Hartmetall durch die folgenden spezifischen Mechanismen:

#### **VC hinzufügen**

Durch Zugabe von 0,2–0,5 % VC wird an der Korngrenze eine VCx-Phase (Dicke  $<20 \text{ nm}$ ) gebildet,

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

die die Härte um etwa 10–15 % erhöhen kann, indem sie das Wachstum von WC-Körnern hemmt (Wachstumsrate  $< 10^{-10}$  m/s), während die Stabilität der Mikrostruktur erhalten bleibt.

#### **TaC -Zugabe**

Durch die Zugabe von 0,2–0,5 % TaC wird die Korngrenzenfestigkeit ( $> 150$  MPa) erheblich verbessert und die Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  durch Mischkristallverfestigung um 5–10 % erhöht, wodurch die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Risswachstum effektiv verbessert wird.

#### **Multi-Additive**

VC+TaC+ZrC (Gesamtverhältnis 0,1 % - 0,3 %) kann durch Mischkristallverfestigung mit einem Korngrenzenabstand von  $< 0,2 \mu\text{m}$  eine zusätzliche Härtesteigerung von 3 % - 5 % erreichen, und  $K_{Ic}$  erreicht  $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , wodurch eine doppelte Optimierung von Härte und Zähigkeit erreicht wird.

#### **Mechanisches Modell**

Kombiniert mit Orowan-Verstärkung ( $\tau \sim Gb / \lambda$ ) und Korngrenzenverfestigung wird die Versetzungsbewegung wirksam behindert und die Verformungsbeständigkeit deutlich erhöht. Beispielsweise erreicht die Härte der WC-10Co-Legierung nach Zugabe von 0,3 % VC+TaC 1700 HV und der  $K_{Ic}$  beträgt  $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , was den Anforderungen an Hochleistungsbohrer entspricht.

#### **Analyse der Einflussfaktoren**

Der Einfluss von Additiven auf die Leistungssteigerung wird durch viele Faktoren begrenzt:

##### **Zusatzstoffgehalt**

VC und TaC liegen bei 0,2–0,5 %, und die Leistung ist innerhalb dieses Bereichs optimal; wenn der Wert 0,8 % übersteigt, kann das Sprödphasenverhältnis 0,5 % überschreiten, was zu einer Verringerung der Zähigkeit führt.

##### **Multi-Additiv-Verhältnis**

VC:TaC :ZrC = 1:1:1, die Härtezunahme ist am größten ( $> 1800$ ); wenn das Verhältnis unausgewogen ist (z. B. 1:2:1), kann das Sprödphasenverhältnis 1 % überschreiten, was die Stabilität des Materials beeinträchtigt.

##### **Kugelmahlzeit**

20–40 Stunden Kugelmahlen gewährleisten eine gleichmäßige Verteilung der Additive. Bei weniger als 15 Stunden sind die Additive ungleichmäßig verteilt und die Wirkung ist begrenzt.

##### **Sintertemperatur**

Bei 1400–1500 °C bleiben die chemische Stabilität und die korngrenzenverstärkende Wirkung des Zusatzstoffs erhalten; wenn die Temperatur 1550 °C überschreitet, kann der Zusatzstoff verdampfen oder es können Nebenreaktionen auftreten, die zu einer Leistungsminderung führen.

#### **Optimierungsstrategie**

Um die hohen Leistungsziele (Härte HV 1700, Bruchzähigkeit  $K_{Ic} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) zu erreichen, werden folgende Optimierungsstrategien empfohlen:

Durch Zugabe von VC/ TaC / ZrC (Gesamtverhältnis 0,1–0,3 %, Verhältnis 1:1:1) kann die Härte durch Mischkristallverfestigung um 3–5 % erhöht werden.

Das energiereiche Kugelmahlen dauert 20–40 Stunden, um sicherzustellen, dass die Zusatzstoffe und Rohstoffe vollständig vermischt und gleichmäßig verteilt werden.

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

Die Sintertemperatur wird auf 1400–1500 °C geregelt und der Vakuumgrad beträgt  $<10^{-2}$  Pa, um die Verflüchtigung von Zusatzstoffen zu verhindern.

Mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Auflösung  $<0,1$  nm) wurde der Korngrenzenmodifizierungseffekt verifiziert und die mikroskopische Verteilung der Additive sichergestellt.

### **Ingenieurierungspraxis**

Additiv optimierte Hartmetalle eignen sich hervorragend für technische Anwendungen:

#### **Bergbaubohrer**

WC-10Co ( VC + TaC 0,3 %) mit einer Härte von HV 1700 kann die Bohrdistanz auf  $>1500$  m verlängern, eine Steigerung von 50 %, wodurch die Effizienz des Bergbaus deutlich verbessert wird.

#### **Luftfahrtwerkzeuge**

WC-8Co ( TaC 0,3 %), Lebensdauer auf  $>15$  Stunden verlängert, eine Steigerung von 25 %, um den Anforderungen hochpräziser Schnitte gerecht zu werden.

#### **Neuer Energie -Elektrolyseur**

WC-10Co ( VC + TaC + ZrC 0,2 %), mit einer Härte von über 1800, hat eine Lebensdauer von  $>10^3$  Stunden bei elektrochemischem Schock ( $>10^3$ -mal ), eine Steigerung von 40 %.

### **7.4.3 Strategien zur Verbesserung der Hartmetalleistung und zur Verstärkung der Hartmetalloberfläche**

#### **Überblick über Prinzipien und Technologien der Oberflächenverfestigung von Hartmetall**

verbessert die Oberflächenhärte und Verschleißfestigkeit durch Methoden wie Aufkohlen, Ionenimplantation und Laserauftragschweißen erheblich und gewährleistet so den langfristigen Einsatz von Hartmetall in Umgebungen mit hohem Verschleiß und dynamischer Belastung. Der Aufkohlungsprozess bildet in einer  $\text{CH}_4$ -Atmosphäre bei 850–950 °C eine WC-reiche Schicht (Dicke 10–30  $\mu\text{m}$ , Härte  $>2000$ ), die Ionenimplantation führt durch  $\text{N}^+$ -Ionen (Dosis  $10^{16}$ – $10^{17}\text{cm}^{-2}$ , Energie 80–120 keV) eine Restdruckspannung ( $>400$  MPa) ein und beim Laserauftragschweißen wird eine Laserleistung von 1,5–2,5 kW verwendet, um eine Schicht mit hoher Härte (Dicke 50–100  $\mu\text{m}$ , Härte  $>2500$ ) zu erzeugen. Zusammen verringern diese Technologien die Verschleißrate auf  $<0,08\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ . In den letzten Jahren hat sich die plasmaunterstützte Ionenimplantation (PIII, Dosis  $10^{17}$ – $10^{18}\text{ cm}^{-2}$ ) zu einem Forschungsschwerpunkt entwickelt. Ihre Tiefenverfestigungswirkung kann  $>0,5\text{ }\mu\text{m}$  erreichen und so die Oberflächenbeständigkeit deutlich verbessern.

#### **Mechanismus und Analyse der Oberflächenverfestigung von Hartmetall**

Der konkrete Mechanismus der Oberflächenverfestigung ist wie folgt:

##### **Aufkohlung**

Kohlenstoffatome diffundieren (Diffusionsrate  $\sim 10^{-11}\text{ cm}^2/\text{s}$ ) und bilden auf der Oberfläche eine WC-reiche Schicht (Dicke 10–30  $\mu\text{m}$ ) mit einer Härte von über 2000 HV. Die Verschleißrate wird auf  $<0,08\text{ mm}^3/\text{Nm}$  reduziert, wodurch die Verschleißfestigkeit der Oberfläche effektiv verbessert

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



wird.

### **Ionenimplantation**

Die Implantationstiefe der  $N^+$ -Ionen beträgt  $0,1\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$ , wodurch eine durch eine feste Lösung verstärkte Struktur mit einer Restdruckspannung von  $>400\text{ MPa}$  entsteht, die Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  um  $5\text{--}10\%$  erhöht und die Beständigkeit gegen Risswachstum an der Oberfläche verbessert wird.

### **Laserauftragschweißen**

Durch das Schmelzen des Oberflächenmaterials mit einer Laserleistung von  $1,5\text{--}2,5\text{ kW}$  entsteht eine  $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$  dicke Schicht mit hoher Härte (Härte  $> 2500$ ). Dadurch wird die Verschleißrate weiter auf  $<0,07\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  reduziert und die Ermüdungsbeständigkeit verbessert. Beispielsweise erreicht die WC-10Co-Legierung unter der Bedingung einer aufgekohlten Schicht von  $20\text{ }\mu\text{m}$  eine Härte von HV 2000 und die Verschleißrate liegt bei  $<0,08\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ . Dies erfüllt die hohen Leistungsanforderungen von Luftfahrtwerkzeugen voll und ganz.

## **Analyse der Faktoren, die die Oberflächenverfestigung von Hartmetall beeinflussen**

Der oberflächenverfestigende Effekt wird durch verschiedene Prozessparameter und Materialeigenschaften beeinflusst:

### **Aufkohlungstemperatur**

Bei  $850\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$  ist die Kohlenstoffschichtdicke stabil bei  $10\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ , bei Temperaturen über  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  kann die Kohlenstoffschicht zu dick sein ( $> 50\text{ }\mu\text{m}$ ), wodurch die Gefahr des Abplatzens steigt.

### **Ionenimplantationsdosis**

Dosis von  $10^{16}$  und  $10^{17}\text{ cm}^{-2}$  beträgt die Restspannung  $>400\text{ MPa}$ . Übersteigt die Dosis  $10^{18}\text{ cm}^{-2}$ , kann die Oberflächenschädigungsrate auf  $>5\%$  ansteigen und die Lebensdauer beeinträchtigen.

### **Laserleistung**

Bei  $1,5\text{--}2,5\text{ kW}$  ist die Mantelschicht gleichmäßig und dicht; wenn die Leistung  $3\text{ kW}$  übersteigt, kann die thermische Spannung  $200\text{ MPa}$  überschreiten und Mikrorisse verursachen.

### **Körnung**

Bei einer Korngröße  $<0,5\text{ }\mu\text{m}$  ist die Oberflächenverfestigungswirkung am besten; bei einer Korngröße  $>2\text{ }\mu\text{m}$  beträgt die Härtezunahme weniger als  $10\%$  und die Verstärkungseffizienz nimmt ab.

### **Oberflächenrauheit**

Bei einem  $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$  ist die Verstärkungsschicht fest mit dem Substrat verbunden; bei einem  $R_a > 0,2\text{ }\mu\text{m}$  kann sich die Verschleißrate um  $15\text{--}20\%$  erhöhen.

## **Optimierungsstrategie zur Oberflächenverfestigung von Hartmetall**

Um die hohen Härte- und Verschleißfestigkeitsziele (Härte HV 2000, Verschleißrate  $<0,08\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) zu erreichen, werden folgende Optimierungsstrategien empfohlen:

Die Aufkohlungstemperatur wird auf  $850\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$  geregelt und die Dicke der Kohlenstoffschicht wird präzise bei  $10\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$  gehalten, um eine gleichmäßige Oberflächenhärtung zu gewährleisten.

Die Ionenimplantationsdosis wurde auf  $10^{16}\text{--}10^{17}\text{ cm}^{-2}$  und die Energie auf  $80\text{--}120\text{ keV}$  eingestellt, um eine stabile Restdruckspannung zu erzeugen.

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

Die Laserbeschichtungsleistung wurde auf 1,5–2,5 kW eingestellt und die Beschichtungsschichtdicke auf 50–100  $\mu\text{m}$  geregelt.

Wählen Sie WC mit einer Korngröße  $<0,5 \mu\text{m}$  und polieren Sie die Oberfläche auf  $R_a <0,1 \mu\text{m}$ , um Verschleißquellen zu reduzieren.

mittels Röntgenbeugungsanalyse (Auflösung  $<1 \mu\text{m}$ ), um eine gleichmäßige Spannungsverteilung und Dicke sicherzustellen.

### Praxis der technischen Anwendung zur Oberflächenverstärkung von Hartmetall

Oberflächengehärtetes Hartmetall eignet sich gut für technische Anwendungen:

#### Luftfahrtwerkzeuge

WC-10Co (aufgekohlte Schicht 20  $\mu\text{m}$ ), Härte erreicht HV 2000, Lebensdauer wird auf  $>15$  Stunden verlängert, eine Steigerung von 25 %, erfüllt die Anforderungen für hochpräzises Schneiden.

#### Bergbaubohrer

WC-8Co (ionenimplantiertes  $N^+ 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ), Verschleißrate  $<0,08 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , Bohrdistanz übersteigt 1500 m, eine Steigerung von 50 %, wodurch die Effizienz des Bergbaus deutlich verbessert wird.

#### Verschleißfeste Form

WC-12Co (Lasermantelschicht 80  $\mu\text{m}$ ), Härte  $>2500$ , Extrusionszeit mehr als  $10^6$ -mal, eine Steigerung von 25 %, geeignet für Hochfrequenz-Stanzvorgänge.

### 7.4.4 Strategie zur Leistungssteigerung bei Hartmetall – Fortschrittliche Fertigungstechnologie für Hartmetall (3D-Druck)

#### Prinzip und technischer Überblick über die fortschrittliche Fertigungstechnologie von Hartmetall

- Molding-Verfahren wird verwendet, um die Materialverteilung präzise zu steuern und so Härte (HV 1500–1800), Zähigkeit ( $K_{Ic} 10\text{--}14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) und Ermüdungsbeständigkeit ( $>10^5$ -fach) zu optimieren. Das SLM-Verfahren verwendet 200–300 W Laserleistung und eine Schichtdicke von 20–50  $\mu\text{m}$ . Die Binder-Jet-Molding-Technologie erreicht durch Binder Jetting einen hochauflösenden ( $<50 \mu\text{m}$ ) Druck. In den letzten Jahren hat sich die Nano-3D-Drucktechnologie (Schichtdicke  $<10 \mu\text{m}$ ) zu einem hochmodernen Hotspot entwickelt, mit dem hochpräzise Gradientenstrukturen mit auf  $>1800$  und  $K_{Ic}$ -Werten über  $13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  hergestellt werden können, wodurch ein neuer Weg für die Konstruktion komplexer Komponenten eröffnet wird.

#### Mechanismus und Analyse der fortschrittlichen Fertigungstechnologie von Hartmetall

Zu den Mechanismen, durch die der 3D-Druck die Leistung verbessert, gehören:

##### Gradientenstruktur

Durch die Anpassung der Materialverteilung wird eine hohe Härte an der Oberfläche (HV  $>1800$ ) erreicht, während im Inneren eine hohe Zähigkeit ( $K_{Ic} >13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) erhalten bleibt. Dadurch wird die Spannungskonzentration wirksam verringert und die Gesamtzuverlässigkeit verbessert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Mikrosteuerung**

Eine Schichtdicke von  $<50\text{ }\mu\text{m}$  gewährleistet eine Dichte von  $>99\%$ , die Porosität wird auf  $<0,5\%$  reduziert und die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Risswachstum wird erhöht.

### **Wärmebehandlungseffekt**

Eine Nachbehandlungstemperatur von  $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  beseitigt Restspannungen ( $<100\text{ MPa}$ ), was die Ermüdungsbeständigkeit und die strukturelle Stabilität weiter verbessert.

Beispielsweise weist die durch SLM hergestellte WC-10Co-Legierung eine Härte von HV 1700,  $K_{Ic}$   $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  und eine Ermüdungslebensdauer von mehr als dem  $10^5$ -Fachen auf und zeigt damit eine hervorragende Gesamtleistung.

### **Analyse der Faktoren, die die fortschrittliche Fertigungstechnologie für Hartmetall beeinflussen**

Die Ergebnisse des 3D-Drucks werden von einer Vielzahl von Prozessparametern beeinflusst:

#### **Laserleistung**

Bei  $200\text{--}300\text{ W}$  bildet sich das Schmelzbad stabil und die Materialien werden gleichmäßig verschmolzen; über  $350\text{ W}$  kann die thermische Spannung  $>150\text{ MPa}$  erreichen, was die Qualität der Teile beeinträchtigt.

#### **Schichtdicke**

Bei Schichtdicken von ca.  $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$  beträgt die Dichte  $>99\%$ , bei Schichtdicken über  $100\text{ }\mu\text{m}$  kann die Porosität auf  $>1\%$  ansteigen und die Leistungsfähigkeit dadurch reduziert werden.

#### **Druckgeschwindigkeit**

$10\text{--}20\text{ mm/s}$  gewährleisten die Festigkeit der Zwischenschichtbindung; wenn die Geschwindigkeit  $30\text{ mm/s}$  übersteigt, verringert sich die Festigkeit der Zwischenschichtbindung, was sich auf die Gesamtfestigkeit auswirkt.

#### **Nachbearbeitungstemperatur**

$800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  optimieren die Mikrostruktur; wenn die Temperatur  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  übersteigt, können die Körner wachsen und die Leistung kann nachlassen.

### **Optimierungsstrategie für fortschrittliche Hartmetall-Fertigungstechnologie**

Um die hohen Leistungsziele (Härte HV 1700, Bruchzähigkeit  $K_{Ic} >12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) zu erreichen, werden folgende Optimierungsstrategien empfohlen:

Die Laserleistung wurde auf  $200\text{--}300\text{ W}$  geregelt und die Schichtdicke auf  $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$  eingestellt, um die Stabilität und Dichte des Schmelzbades zu gewährleisten.

Die Druckgeschwindigkeit wurde bei  $10\text{--}20\text{ mm/s}$  gehalten und die Nachbearbeitungstemperatur betrug  $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , um Restspannungen zu beseitigen.

Optimieren Sie den Co-Gehalt auf  $10\%$ , um das Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte zu verbessern.

Nutzen Sie die Computertomographie (CT, Auflösung  $<10\text{ }\mu\text{m}$ ), um innere Defekte zu erkennen und die Druckqualität sicherzustellen.

### **Technische Anwendungspraxis der fortschrittlichen Fertigungstechnologie von Hartmetall**

3D-gedrucktes Hartmetall eignet sich hervorragend für technische Anwendungen:

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

### **Luftfahrtwerkzeuge**

WC-8Co (SLM-Verfahren), Härte HV 1700, Lebensdauer auf >15 Stunden verlängert, eine Steigerung von 25 %, um den Anforderungen hochpräziser Verarbeitung gerecht zu werden.

### **Verschleißfeste Form**

WC-12Co (Binder-Jetting-Verfahren), Extrusionszeiten übersteigen das 10<sup>6</sup>-fache, eine Steigerung von 25 %, geeignet für Formen mit komplexer Form.

### **Komplexe Teile**

WC-10Co (Nano-3D-Druck), Bruchzähigkeit  $K_{IC} > 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , Ermüdungslebensdauer >10<sup>5</sup>-fach, eine Steigerung von 30 %, geeignet für kundenspezifische Hochleistungskomponenten.

## **7.5 Zukünftige Entwicklungstrends: Anwendung von KI+IIoT in der Leistungsoptimierung von Hartmetall**

Künstliche Intelligenz (KI) und das industrielle Internet der Dinge (IIoT) haben die Leistungsoptimierung und industrielle Anwendung von Hartmetall (WC-Co) revolutioniert. Dank der datenbasierten Modellierungsfunktionen der KI und der Echtzeit-Wahrnehmungs- und Steuerungsfunktionen des IIoT konnte Hartmetall intelligente Verbesserungen in den Bereichen Mikrostrukturdesign, Leistungsüberwachung, Fehlvorhersage und Prozessoptimierung erzielen. Im Folgenden werden die Anwendungsaussichten von KI und IIoT in der Leistungsoptimierung von Hartmetall anhand von vier Aspekten systematisch erörtert: Mikrostrukturoptimierung, Echtzeit-Leistungsüberwachung, Fehlvorhersage und intelligente Wartung, Prozessoptimierung und intelligente Fertigung, kombiniert mit neuesten Forschungsergebnissen und Daten.

### **7.5.1 Mikrostrukturoptimierung: KI-gesteuertes Präzisionsdesign**

Mithilfe von Algorithmen wie maschinellem Lernen (ML), Deep Learning (DL) und Reinforcement Learning (RL) in Kombination mit Big-Data-Analysen kann die KI-Technologie die komplexe Beziehung zwischen den Parametern der Mikrostruktur von Hartmetall (wie Korngröße, Co-Gehalt, Additivverhältnis) und der Leistung (Härte, Zähigkeit) genau vorhersagen und so ein optimales Design der Mikrostruktur erreichen.

#### **Korngrößenoptimierung**

KI-Algorithmen wie Support Vector Machines (SVM) und Deep Neural Networks (DNN) können die Auswirkung der Korngröße auf die Härte anhand historischer Prozessdaten (z. B. Kugelmahlzeit, Sintertemperatur) mit einer Vorhersagegenauigkeit von 92–96 % vorhersagen (Fraunhofer-Institut, Deutschland, 2024).

Im Jahr 2024 entwickelte das Fraunhofer-Institut in Deutschland ein KI-basiertes Kornoptimierungssystem auf Basis digitaler Zwillinge. Durch Simulation der WC-Co-Mikrostruktur (Monte-Carlo-Methode) wurde die Korngrößenabweichung auf  $\pm 0,01 \mu\text{m}$  kontrolliert und die Härtekonstanz um 12–15 % verbessert (HV 1650–1800). Beispielsweise erhöhte sich bei einer Optimierung der Korngröße von  $0,5 \mu\text{m}$  auf  $0,3 \mu\text{m}$  die Härte um 10 % (HV 1700–

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



1870) und die Zähigkeit ( $K_{Ic}$ ) blieb bei 12–13 MPa·m<sup>1/2</sup> (Vickers-Härteprüfgerät und Einkanten-Kerbbalkenprüfung).

### Optimierung von Co-Gehalt und -Verteilung

Im Jahr 2024 entwickelte das Massachusetts Institute of Technology (MIT) ein KI-gestütztes System zur Optimierung des Co-Gehalts, das Bayessche Optimierung und Monte-Carlo-Simulation kombinierte, um die Abweichung der Co-Verteilung auf <0,1 % zu kontrollieren (Analyse mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie) und die Leistungskonsistenz um 15–18 % zu verbessern.

die KI den Co-Gehalt dynamisch an (6–10 %), kontrolliert die Abweichung der Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ) auf <0,4 MPa·m<sup>1/2</sup> und verbessert die Zähigkeitskonstanz ( $K_{Ic}$  20 %, Testbereich 12–14 MPa·m<sup>1/2</sup>). Nach der Optimierung stabilisiert sich die Härte des Hartmetalls WC-10Co bei HV 1680–1750 und die Zähigkeit verbessert sich um 10 % ( $K_{Ic}$  von 12,5 auf 13,8 MPa·m<sup>1/2</sup>).

### Optimierung des Additivverhältnisses

die Auswirkung des Verhältnisses von Additiven (wie VC, TaC) auf die Leistung durch den Gradient Boosting Tree (GBDT)-Algorithmus, optimiert die VC-Zugabe (0,2–0,4 %) mit einer Genauigkeit von 95 % und erhöht die Härte um 5–8 % (HV 1750–1850). Im Jahr 2025 zeigte eine Studie der Universität Uppsala in Schweden, dass nach der KI-Optimierung des VC+TaC - Verhältnisses (1:1, 0,3 % Gesamtzugabe) die Kornwachstumsrate um 6 % abnahm (<10<sup>-9</sup> m/s, TEM-Messung) und die Härte HV 1900–1950 erreichte.

## 7.5.2 Echtzeit-Leistungsüberwachung: Hochpräzise Wahrnehmung des IIoT

IIoT ermöglicht die Echtzeitüberwachung der Leistungsparameter von Hartmetall durch eingebettete Sensoren, Edge Computing und 5G-Netzwerke und gewährleistet so Prozessstabilität und Leistungskonsistenz.

### Überwachung wichtiger Parameter

#### Körnung

- Nanopartikelgrößenanalysator (Genauigkeit ±0,005 µm) überwacht die Änderung der Korngröße in Echtzeit und die Abweichung wird auf <0,01 µm geregelt (RWTH Aachen, Deutschland, 2024).

#### Co-Inhalt

Ein Röntgen-Metaanalyse-Sensor (Genauigkeit ±0,05%) überwacht die Co-Diffusionsrate (<10<sup>-10</sup> cm<sup>2</sup>/s) und stellt die Verteilungshomogenität sicher (Abweichung <0,3%).

#### Spannungsverteilung

Dehnungssensoren (Genauigkeit ±0,5 MPa) überwachen thermische Spannungsänderungen mit einer  $\Delta K_{Ic}$ - Abweichung von <0,4 MPa·m<sup>1/2</sup> und einer Härteschwankung von <±1,8 % (HV 1650–1680).

### Dynamische Prozessanpassung

IIoT überträgt Echtzeitdaten über das 5G-Netz an die Cloud-Plattform (Verzögerung < 5 ms) und passt in Kombination mit KI-Algorithmen die Kugelmahlzeit (Abweichung ± 0,3 Stunden) und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sintertemperatur (Abweichung  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) dynamisch an. Beispielsweise wird die Korngrößenabweichung von  $0,05\text{ }\mu\text{m}$  auf  $0,02\text{ }\mu\text{m}$  reduziert und die Leistungskonsistenz um 15 % verbessert (Härteabweichung  $< 0,5\%$ ).

### Überwachung der Oberflächenverbesserung

Laser- Auftragschweißverfahren, IIoT nutzt Infrarot-Temperatursensoren (Genauigkeit  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ), um thermische Spannungsänderungen (Abweichung  $< 8\text{ MPa}$ ) zu überwachen und die Qualität der Mantelschicht zu optimieren. Im Jahr 2024 entwickelte die RWTH Aachen ein KI+IIoT Das Laser-Auftragschweißsystem passt die Laserleistung ( $1,5\text{--}2,5\text{ kW}$ ) in Echtzeit an, um die Härte der Auftragschicht auf HV 2600–2700 zu erhöhen, mit einer Dickenabweichung von  $< 5\text{ }\mu\text{m}$  (SEM-Messung).

### 7.5.3 Fehlvorhersage und intelligente Wartung: Kollaborative Anwendung von KI+IIoT

KI und IIoT verbessern die Ausfallvorhersage und die intelligenten Wartungsfunktionen von Hartmetall erheblich, verlängern dessen Lebensdauer und reduzieren die Ausfallrate.

#### Risswachstum und Ermüdungsbruchvorhersage

KI verwendet rekurrenzierende neuronale Netzwerke (RNN), um die Risswachstumsrate ( $\text{da}/\text{dN}$ ) mit einer Genauigkeit von  $> 92\%$  vorherzusagen (Universität Tokio, Japan, 2024).

IIoT ist mit Körperschallsensoren (Frequenzgenauigkeit  $\pm 1,5\text{ kHz}$ ) ausgestattet, um Rissbildungssignale in Echtzeit (Vorlauf  $> 10^3$ -mal) über ein 5G-Netzwerk zu überwachen.

Im Jahr 2024 entwickelte die Universität Tokio in Japan ein KI-basiertes System zur Vorhersage der Ermüdungslebensdauer, das die Risswachstumsrate vorhersagt (Genauigkeit  $\pm 10^{-10}\text{ mm/Zyklus}$ ) und die Lebensdauer von Bergbaubohrern um 15–20 % erhöht (von 1500 m auf 1800 m Bohrdistanz).

Die Ausfallrate wurde von 0,15 % auf  $< 0,08\%$  reduziert (Feldtestdaten).

#### Vorhersage der Schlagzähigkeit

Im Jahr 2024 entwickelte die Universität Lund in Schweden ein KI-Vorhersagesystem, das Finite-Elemente-Analyse (FEA) und neuronale Netzwerke (NN) kombiniert, um die Schlagzähigkeit ( $K_{IC}$ ) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  vorherzusagen. Nach der Optimierung erhöhte sich die Schlagzähigkeit von Bergbaubohrern um 22 % ( $K_{IC}$  von 12,0 auf  $14,6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) und die Lebensdauer verlängerte sich um 20–25 % (Feldversuch).

#### Vorhersage von Verschleißschäden

Verbessert die Verschleißfestigkeit von Bergbaubohrern um 20–25 % durch Echtzeitüberwachung der Verschleißnarbenmorphologie (Genauigkeit der Rillenbreitenvorhersage  $\pm 0,4\text{ }\mu\text{m}$ , gemessen unter dem Mikroskop). Die Verschleißrate wird von  $0,1\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  auf  $0,075\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  reduziert (ASTM G65-Test).

#### Risserkennung und Ausfallzeitvorhersage

Im Jahr 2024 entwickelte die britische Universität Cambridge ein KI-basiertes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Risserkennungssystem, das Schallemissions- (AE) und CT-Daten (Auflösung < 5  $\mu\text{m}$ ) kombiniert, um die Fehlervorhersagegenauigkeit auf  $\pm 0,8$  Stunden zu verbessern. Die Vorhersagezeit wurde vom  $10^3$ -fachen auf das  $10^4$ -fache erhöht, wodurch die Rate unerwarteter Ausfallzeiten um 30 % reduziert wurde (Daten aus industriellen Anwendungen).

#### 7.5.4 Prozessoptimierung und intelligente Fertigung: Effiziente Zusammenarbeit von KI+IIoT

KI und IIoT haben bei der Herstellung von Hartmetall die Prozesseffizienz, Leistungsstabilität und Produktionsintelligenz deutlich verbessert.

##### Optimierung des Additivverhältnisses

KI verwendet genetische Algorithmen (GA), um das Verhältnis der VC/ TaC / ZrC -Zusätze (Gesamtzugabe 0,1 %–0,3 %) mit einem Fehler von <0,04 % und einer Abweichung der Härteconsistenz von <1,5 % zu optimieren (Seoul National University, Südkorea, 2024). Im Jahr 2024 entwickelte die Seoul National University in Südkorea ein KI-Additiv-Optimierungssystem, das die Härte auf HV 1900–2000 erhöht und die Zähigkeit bei  $K_{1c}$  12–13  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  hält, indem die Kornwachstumsrate in Echtzeit überwacht wird (< $10^{-10}$  m/s, TEM-Messung).

##### Prozessparameteroptimierung

IIoT nutzt Sensoren (Korngrößengenauigkeit  $\pm 0,004 \mu\text{m}$ ), um den Kugelmahl- und Sinterprozess in Echtzeit zu überwachen. KI passt Parameter wie die Mahldauer (20–40 Stunden, Abweichung  $\pm 0,4$  Stunden) und die Sintertemperatur (1400–1450  $^{\circ}\text{C}$ , Abweichung  $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mithilfe eines Gradientenabstiegsalgorithmus an. Die Produktionseffizienz stieg um 18–22 % (die Einzelchargenproduktion stieg von 100 Stück auf 120 Stück/Stunde, Industriedaten).

##### Optimierung der Oberflächenverbesserung

der aufgekohlten Schicht (10–30  $\mu\text{m}$ , Fehler < 4  $\mu\text{m}$ ) und die Ionenimplantationsdosis ( $10^{16}$ – $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , Fehler < 5 %). Die Härteconsistenz wird auf < 1,8 % (HV 2000–2500) verbessert. IIoT überwacht die Aufkohlungstemperatur in Echtzeit (850–950  $^{\circ}\text{C}$ , Abweichung  $\pm 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), um die Qualität der aufgekohlten Schicht zu optimieren.

##### Qualitätsprüfung und intelligente Wartung

KI und IIoT nutzen Oberflächenleistungsdaten (Härte, Verschleißrate) für eine automatisierte Qualitätskontrolle mit einer Erfolgsquote von 98,5 % (Industriedaten). KI prognostiziert Ausfallzeiten (Fehler < 4 Stunden), und IIoT optimiert Wartungsstrategien, wodurch Ausfallzeiten um 32–35 % und Unfallraten um 30–35 % reduziert werden (Feldtests).

#### 7.5.5 Das erste Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie

2025 wurde von der CTIA GROUP LTD erstmals als „Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie“ bezeichnet und markiert eine neue Phase, in der sich Chinas Hartmetallindustrie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vollständig in Richtung intelligenter Fertigung bewegt. Dieses Konzept spiegelt nicht nur die umfassende Anwendung von KI und IIoT -Technologien ( Industrielles Internet der Dinge ) in der Wolframindustrie wider , sondern unterstreicht auch Chinas strategisches Ziel, technologisch führend in der globalen Hartmetallindustrie zu sein. Im Folgenden werden die praktische Bedeutung, die hohe Entropie von Hartmetall und die Bedeutung der Hartmetall-Chargenherstellung detailliert beschrieben.

#### **7.5.5.1 Die praktische Bedeutung des Konzepts „Das erste Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie“**

CTIA GROUP LTD hat das Konzept „2025 ist das erste Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie“ erstmals am 3. Januar 2025 vorgeschlagen und spiegelt damit den technologischen Transformationsbedarf und den Wettbewerbsdruck der chinesischen Wolframindustrie auf dem globalen Hartmetallmarkt wider.

#### **Modernisierungsbedarf der Industrie**

China ist der weltweit größte Hersteller von Hartmetall und wird im Jahr 2024 mehr als 60 % der globalen Produktion ausmachen (Daten der China Tungsten Industry Association) , verlässt sich jedoch seit langem auf traditionelle Herstellungsverfahren (wie Pressen und Sintern) und klaffen bei der Produktionseffizienz und Leistungskonsistenz hinter europäischen und amerikanischen Ländern (wie Sandvik und Kennametal) zurück (Abweichung der Härtekonsistenz 5–8 % gegenüber 2–3 %). Die Einführung von KI+IIoT optimiert datengesteuert die Prozessparameter (wie die Abweichung der Sintertemperatur  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), steigert die Produktionseffizienz um 18–22 % (die Einzelchargenproduktion steigt von 100 auf 120 Stück/Stunde) und reduziert die Abweichung der Härtekonsistenz auf  $<2\%$ , wodurch der Abstand zum internationalen Spitzenniveau verringert wird.

#### **Technologieautonomie**

In der Vergangenheit stützte sich Chinas Hartmetallherstellung auf importierte Ausrüstung und Technologie (wie beispielsweise das deutsche Laserbeschichtungssystem ) . Im Jahr 2025 entwickelten die CTIA GROUP LTD und die Tsinghua-Universität gemeinsam ein inländisches KI-Optimierungssystem, das das Additivverhältnis (VC/ TaC -Verhältnis 1:1, Fehler  $<0,03\%$ ) durch einen genetischen Algorithmus (GA) optimierte und die Härte auf HV 1950–2000 erhöhte, wodurch eine unabhängige Technologiekontrolle erreicht wurde. Der KI-Vorschlag im ersten Jahr markiert Chinas Wandel vom Technologienachzügler zum Technologieführer. Der Einsatzanteil inländischer Ausrüstung soll von 40 % im Jahr 2024 auf 65 % im Jahr 2026 steigen (Branchenprognose).

#### **Verbesserte globale Wettbewerbsfähigkeit**

KI und IIoT fördern die Leistungsoptimierung von Hartmetall (z. B. Erhöhung des  $K_{1c}$ -Werts auf  $13\text{--}15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) und machen chinesische Hartmetallprodukte in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Flugzeugwerkzeuge) und im Bergbau (Steigerung der Bohrlebensdauer um 20 %) wettbewerbsfähiger. Chinas Hartmetallexporte werden bis 2025 voraussichtlich um 15 % (laut Prognose des chinesischen Handelsministeriums um rund 5 Milliarden US-Dollar) steigen und damit seine globale Marktposition weiter festigen.

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



#### 7.5.5.2 Bedeutung der Hochentropiebehandlung von Hartmetall

Hartmetalle mit hoher Entropie beziehen sich auf die Bildung von Hartmetallen auf Basis von Legierungen mit hoher Entropie (HEA) durch die Einführung mehrerer Elemente (wie W, Ti, Ta, Nb, Cr), um die Vielfalt und Stabilität der Leistung zu verbessern.

#### Durchbruch in der Leistung

Es besteht ein Widerspruch zwischen der Härte und der Zähigkeit von herkömmlichem WC-Co-Hartmetall (bei einer Härte von HV 1800 beträgt der  $K_{Ic}$ -Wert normalerweise  $<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ). Eine hohe Entropie verbessert die Gesamtleistung durch den synergistischen Effekt mehrerer Elemente erheblich. CTIA GROUP LTD plant, im Jahr 2025 ein hochentropisches Hartmetall (W-Ti-Ta-Nb-Co) mit einer Härte von HV 2100–2200 und einer Zähigkeit von  $K_{Ic}$  14–16  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  (Test mit einseitiger Kerbbalkenmethode) zu entwickeln, das 20–30 % höher ist als bei herkömmlichem WC-Co.

#### Mikrostrukturoptimierung

Bei der Hochentropiebehandlung werden KI-Algorithmen (wie Deep Learning, DL) verwendet, um das Elementverhältnis ( $\text{W}:\text{Ti}:\text{Ta}:\text{Nb} = 1:1:1:1$ , Fehler  $<0,05 \%$ ) vorherzusagen. Dadurch entsteht eine gleichmäßige Hochentropiephase (Korngröße 0,3–0,5  $\mu\text{m}$ , TEM-Messung) und Korngrenzendefekte werden reduziert ( $<0,1 \%$ ). Die Korngrenzenbindungsfestigkeit wird um 25 % erhöht ( $> 180 \text{ MPa}$ , Nanoindentationstest), und die Ermüdungsbeständigkeit wird deutlich verbessert (Lebensdauer  $> 1,5 \times 10^5$ -fach, Rotationsbiegeermüdungstest).

#### Anwendungsentwicklung

Hochentropisches Hartmetall weist eine ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit auf (Härte  $> \text{HV } 1800$  bei  $800^\circ\text{C}$ ) und eignet sich für Schneidwerkzeuge für Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken. Die Lebensdauer erhöht sich um 30 % (von 12 Stunden auf 15,6 Stunden, Feldtest). Die Korrosionsbeständigkeit ist um 20 % erhöht (saure Umgebung, pH-Wert  $< 4$ , Korrosionsrate  $< 0,05 \text{ mm/Jahr}$ , elektrochemischer Test). Daher eignet es sich für Tiefseebergbauausrüstung.

#### 7.5.5.3 Die Bedeutung der Hartmetall-Dosierung

Die von CTIA GROUP LTD vorgeschlagene Chargenverwaltung für Hartmetallsorten bezieht sich auf die digitale Verwaltung von Hartmetallprodukten während ihres gesamten Lebenszyklus durch KI+IIoT-Technologie, die Einrichtung einer Datenbank mit Chargennummern der Sorten und die Erzielung einer Leistungsrückverfolgbarkeit sowie kundenspezifischer Produktion.

#### Rückverfolgbarkeit der Leistung

Jede Charge von Hartmetallprodukten erfasst Produktionsparameter (wie Sintertemperatur  $1400^\circ\text{C}$ , Co-Gehalt 10 %) über IIoT-Sensoren, generiert eine eindeutige Chargennummer und speichert diese auf der Cloud-Plattform (Datenkapazität  $> 1 \text{ TB}$ , 2025). Benutzer können Leistungsdaten (wie Härte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV 1750,  $K_{1c} \approx 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) über die Chargennummer abfragen, um die Leistungskonsistenz (Abweichung  $< 1,5 \%$ ) sicherzustellen.

### **Kundenspezifische Produktion**

passt die Güteformel (z. B. WC-12Co + 0,3 % TaC) automatisch an die Kundenanforderungen an (z. B. benötigen Bohrer für den Bergbau einen  $K_{1c}$ -Wert von  $> 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), wodurch der Produktionszyklus um 25 % verkürzt wird (von 8 auf 6 Tage). Die Chargennummerierung unterstützt die individuelle Anpassung kleiner Chargen, um den vielfältigen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (Werkzeuge mit hoher Zähigkeit) und der neuen Energiebranche (Batterieformen) gerecht zu werden.

### **Verbesserung des Qualitätsmanagements**

wird KI eingesetzt, um historische Daten ( $> 100.000$  Chargen) zu analysieren, abnormale Prozesse (wie Korngrößenabweichungen  $> 0,02 \mu\text{m}$ ) zu identifizieren, Parameter zu optimieren und die Erfolgsquote deutlich zu verbessern. Die Effizienz der Fehleranalyse wird um 30 % verbessert, und die Chargennummernrückverfolgbarkeit ermöglicht die schnelle Lokalisierung problematischer Chargen ( $< 1$  Stunde), wodurch die Rückrufkosten um 20–25 % gesenkt werden.

## **7.5.6 Zukunftsaussichten und Herausforderungen bei der Verbesserung der Hartmetallleistung**

### **Zukunftsaussichten für die Leistungssteigerung von Hartmetall**

#### **Intelligente Fertigung**

KI und IIoT werden die Umstellung der Hartmetallherstellung auf intelligente Fabriken weiter vorantreiben und die Produktionseffizienz dürfte bis 2027 um 30–40 % steigen (Prognose von McKinsey).

#### **Multimaterialoptimierung**

Mithilfe künstlicher Intelligenz lässt sich die Leistungsfähigkeit mehrphasiger Verbundhartmetalle (wie WC-Co-TiC) vorhersagen. Die erwartete Härte liegt bei über HV 2000 und die Zähigkeit erreicht  $K_{1c} \approx 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

#### **Vollständiges Lebenszyklusmanagement**

IIoT ermöglicht die Leistungsverfolgung vom Rohmaterial bis zur Anwendung und verbessert die Fehlervorhersage um das Zehnfache.

### **Herausforderungen bei der Verbesserung der Hartmetallleistung**

#### **Datenqualität**

KI-Modelle sind auf qualitativ hochwertige Daten angewiesen. Aktuelle Industriedaten weisen ein hohes Rauschen auf (Abweichung  $> 10 \%$ ), und die Sensorgenauigkeit muss verbessert werden.

#### **Kosten**

von IIoT-Geräten (Sensoren, 5G-Module) ist teuer und der ROI ist kurzfristig gering ( $< 5 \%$ ).

#### **Sicherheit**

Bei der Übertragung im 5G-Netz besteht das Risiko eines Datenverlusts und die

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

Verschlüsselungstechnologie muss verstärkt werden (AES-256-Standard).

KI und IIoT eröffnen neue Wege zur Leistungsoptimierung von Hartmetall. Durch Mikrostrukturoptimierung (Korngrößenabweichung  $< 0,01 \mu\text{m}$ , um 15 % verbesserte Härtekonsistenz), Echtzeit-Leistungsüberwachung (Härteabweichung  $< 1,8 \%$ ), Ausfallvorhersage (Vorschub  $> 10^4$  - fach, Ausfallrate  $< 0,08 \%$ ) und Prozessoptimierung (um 18–22 % verbesserte Produktionseffizienz) werden die Leistungskonsistenz, Zuverlässigkeit und Produktionseffizienz von Hartmetall deutlich verbessert. KI und IIoT werden die Entwicklung der Hartmetallherstellung hin zu einem intelligenten und umfassenden Lebenszyklusmanagement weiter vorantreiben und effizientere und zuverlässigere Lösungen für die Luftfahrt, den Bergbau, die erneuerbaren Energien und andere Bereiche bieten.

## 7.6 Relevante nationale und internationale Normen

Im Folgenden sind nationale und internationale Normen zu den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall aufgeführt, die chinesische, ISO-, amerikanische und europäische Normen abdecken, um sicherzustellen, dass die Leser die Test- und Bewertungsgrundlagen vollständig verstehen:

### in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall :

für Eigenschaften von Hartmetall“: legt die Prüfverfahren für Härte (HV), Bruchzähigkeit ( $K_{1c}$ ) und Druckfestigkeit fest.

GB/T 3849-2008 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall: Gilt für Härteprüfungen (HV 1200–2000).

GB/T 7997-2010 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall: Basierend auf der Single Edge Notched Beam-Methode (SENB) zum Prüfen von  $K_{1c}$ .

GB/T 3488-2008 „Testmethoden für die Mikrostruktur von Hartmetall“: wird für die Analyse von Korngröße und Mikrostruktur verwendet.

### in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall :

ISO 28079:2009 „Prüfverfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von palmenförmigen Proben aus Hartmetall“: Prüfung  $K_{1c}$  ( $8\text{--}16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

ISO 6507-1:2018 „Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe“: Gilt für die Härteprüfung von Hartmetall.

ISO 3327:2009 Prüfverfahren für die Druckfestigkeit von Hartmetall: Prüfung der Druckfestigkeit (4000–6000 MPa).

ISO 3738-1:2010 Prüfverfahren für den Verschleiß von Hartmetallen: Basierend auf der Prüfung auf abrasiven Verschleiß (ähnlich ASTM G65).

### Amerikanische Normen zu den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall:

ASTM E399-20 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit metallischer Werkstoffe: Test  $K_{1c}$ , anwendbar auf Hartmetall.

ASTM E647-15 „Testmethode für die Wachstumsrate von Ermüdungsrissen“: Testen Sie die Wachstumsrate von Rissänderungen ( $da/dN$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM E23-18 „Verfahren zum Schlagzähprüfen mit gekerbten Proben“: Schlagenergieprüfung nach Charpy und Izod.

ASTM G65-16 Trockensand-/Gummirad-Verschleißtestmethode: Testet die Verschleißfestigkeit von Hartmetall (Verschleißrate  $<0,1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ).

#### Europäische Normen zu den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall:

EN ISO 6507-1:2018 „Härteprüfung nach Vickers“: entspricht ISO 6507-1.

EN 843-1:2006 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit von Hochleistungskeramiken: Anwendbar auf den  $K_{IC}$ - Test von Hartmetall.

EN 1071-3:2005 „Prüfverfahren für den Verschleiß keramischer Werkstoffe“: Gilt für die Prüfung der Verschleißfestigkeit von Hartmetall.

EN ISO 6892-1:2019 „Zugversuch an metallischen Werkstoffen“: kann zur Festigkeitsprüfung von Hartmetall verwendet werden.

#### Verweise

- [1] Nationaler Standard. GB/T 18376-2001 „Testverfahren für Eigenschaften von Hartmetall“.
- [2] Nationaler Standard. GB/T 7997-2010 „Testverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall“.
- [3] Nationaler Standard. GB/T 3488-2008 „Testverfahren für die Mikrostruktur von Hartmetall“.
- [4] Li Ming, et al. ( 2020 ) . „ Einfluss der Sintertemperatur auf die Mikrostruktur von Hartmetall “ . „ Wärmebehandlung von Metallen“, 45(3), 12-18.
- [5] Zhang Wei, et al. ( 2021 ) . „ Einfluss von VC-Additiven auf die Eigenschaften von Hartmetall “ . „ Pulvermetallurgie -Technologie“, 39(4), 45-50.
- [6] Liu Yang, et al. ( 2022 ) . „Einfluss des Co-Gehalts auf die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall “ . „Journal of Materials Research“, 36(5), 321-327.
- [7] Chen Lei, et al. ( 2023 ) . „Einfluss der Sinteratmosphäre auf Korngrenzendefekte in Hartmetall“. Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 33(6), 89-95.
- [8] Zhao Gang, et al. ( 2024 ) . „Einfluss der Abkühlrate auf die thermische Spannung von Hartmetall“. Materials Science and Technology, 52(2), 101-108.
- [9] Wang Qiang, et al. ( 2023 ) . „Einfluss des Hochenergie-Kugelmahlens auf die WC-Kornverfeinerung“. Journal of Materials Science and Engineering, 41(3), 234-240.
- [10] Li Qiang, et al. ( 2025 ) . „Leistungsoptimierung von Hartmetall für Flugzeugturbinschaufeln“. Journal of Aeronautical Materials, 45(1), 15-22.
- [11] ISO 3327:2009. Hartmetalle — *Bestimmung der Druckfestigkeit* .
- [12] ASTM E647-15. Standardprüfverfahren zur Messung der Wachstumsgeschwindigkeit von *Ermüdungsrisse* .
- [13] ASTM G65-16. Standardprüfverfahren für den Abriebtest mit trockenen Sand-/ *Gummirädern* .
- / Upadhyaya, GS ( 1998 ) . Hartmetalle : Herstellung, Eigenschaften und Prüfung . Wiley Press.
- [15] Konyashin , I., et al. (2015). "Mikrostruktur und Eigenschaften von WC - Co Hartmetallen . "

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



International Journal of Refractory Metals and Hard Materials , 49, 203- 211 .

[16] Prakash, LJ (2016). " Oberflächenmodifizierung von Hartmetallen: Eine Übersicht . " *Journal of Materials Science* , 51(10) , 4657-4671.

[17] Hall, EO (1951). "Die Deformation und Alterung von Weichstahl: III Diskussion der Ergebnisse . " *Proceedings of the Physical Society* , 64(381) , 747- 753 .

[18] Schiotz, J., et al. ( 1998 ) . " Erweichung von Metallen bei sehr kleinen Korngrößen . " *Nature* , 391 ( 6667 ) , 561-563.

RM (1996). *Sintertheorie und -praxis*. Wiley Press .

[20] Sandvik Coromant .

( 2023 ) . " Leistungsdaten von Hochgeschwindigkeits-Schneidwerkzeugen."

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Zeitplan:

Das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit von Hartmetall: Hauptleistungsparameter

| Leistung                      | Parameterbereich                          | Anwendungsszenario                                            | Bemerkung                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Härte (HV)                    | 15002500±30                               | Luftfahrtwerkzeuge, Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen     | Eine hohe Härte (HV > 2000 ± 30) kann leicht zu einer Verringerung der Zähigkeit führen und erfordert Ausgleich und Optimierung.                                       |
| Zähigkeit ( K <sub>1c</sub> ) | 820 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5            | Luftfahrtwerkzeuge, Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen     | Eine hohe Zähigkeit ( K <sub>1c</sub> >15 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5 ) geht häufig mit einer Abnahme der Härte einher, die sich auf die Verschleißfestigkeit auswirkt. |
| Druckfestigkeit               | >4000 MPa±100 MPa                         | Hohe Belastungsbedingungen                                    | Es hängt eng mit der Korngröße und dem Co-Gehalt zusammen.                                                                                                             |
| Leben schneiden               | >20 Stunden ±1 Stunde                     | Luftfahrtwerkzeuge (Hochgeschwindigkeitsschneiden 1000 m/min) | Feinkörniges WCCo (0,5 μm ± 0,01 μm, Co 10 % ± 1 %), Härte HV 1800 ± 30, verlängerte Lebensdauer.                                                                      |
| Bohrabstand                   | >1500 m±100 m                             | Bergbaubohrer                                                 | Co 8 % ± 1 % optimiert die Zähigkeit und verbessert die Bohrleistung.                                                                                                  |
| Anzahl der Quetschungen       | >10 <sup>6</sup> mal ±10 <sup>5</sup> mal | Verschleißfeste Form                                          | Die Kornverfeinerung (0,5 μm ± 0,01 μm) verbessert die Haltbarkeit.                                                                                                    |

Faktoren, die die Korngröße beeinflussen, wirken sich auf das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit von Hartmetall aus

| Faktor                            | Parameterbereich                                      | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                                                | Optimierungsvorschläge                                                                                                       |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ursprüngliche Pulverpartikelgröße | 0,51 μm ± 0,01 μm                                     | Partikelgröße <1 μm erhöht die Härte (HV > 1800 ± 30); > 2 μm Härte < 1500 ± 30.                                                                                             | Verwenden Sie Pulver mit einer Körnung von 0,51 μm ± 0,01 μm, um eine gleichmäßige Verfeinerung zu gewährleisten.            |
| Kugelmahlzeit                     | 40 Stunden ± 1 Stunde (400 U/min ± 10 U/min)          | Nach 40 Stunden verringert sich die Größe auf 0,5 μm ± 0,01 μm und die Härte erhöht sich um 30 % ± 5 %; nach <20 Stunden beträgt die Größe > 1 μm und die Leistung nimmt ab. | Das Kugelmahlen wurde 40 h ± 1 h lang durchgeführt und die Rotationsgeschwindigkeit wurde auf 400 U/min ± 10 U/min geregelt. |
| Sintertemperatur                  | 1450 °C ± 10 °C                                       | Bei 1450 °C beträgt die Korngröße <0,7 μm ± 0,01 μm; bei >1500 °C beträgt die Korngröße >2 μm und die Härte nimmt um 10 % ± 2 % ab.                                          | Kontrollieren Sie 1450 °C ± 10 °C, um Kornwachstum zu vermeiden.                                                             |
| Additive (VC)                     | 0,3 % ± 0,01 %                                        | 0,3 % hemmen das Kornwachstum und erhöhen die Härte um 5 % ± 1 %, > 0,5 % bilden eine spröde Phase, K <sub>1c</sub> < 8 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5.                          | Fügen Sie 0,3 % ± 0,01 % VC hinzu und kontrollieren Sie die Korngröße auf <0,5 μm ± 0,01 μm.                                 |
| Co-Inhalt                         | 10 % ± 1 %                                            | 10 % haben eine ausgewogene Härte (HV 1800±30) und Zähigkeit ( K <sub>1c</sub> > 12 MPa · m <sup>1/2</sup> ± 0,5) ; <6 % haben eine unzureichende Zähigkeit.                 | Stellen Sie Co auf 10 % ± 1 % ein, um eine ausgewogene Leistung sicherzustellen.                                             |
| Sinteratmosphäre                  | Vakuumgrad <10 <sup>-3</sup> Pa ± 10 <sup>-4</sup> Pa | Vakuum verhindert Oxidation (O <sub>2</sub> < 0,1 ppm±0,01 ppm) und reduziert Korngrenzdefekte (<0,1 %±0,02 %).                                                              | Verwenden Sie Vakuum oder hochreine Argon- Atmosphäre (Reinheit > 99,99 % ± 0,01 %).                                         |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Einflussfaktoren der Optimierung des Bindephasengehalts auf die Härte- und  
Zähigkeitsbalance von Hartmetall

| Faktor            | Parameterbereich        | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                                            | Optimierungsvorschläge                                                                                      |
|-------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Co-Verhältnis     | 8 % 10 % ± 1 %          | ± 30) und Zähigkeit ( $K_{1c}$ 12 MPa · m <sup>1/2</sup> ± 0,5) ; <6 % $K_{1c}$ <10 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5.                                                          | Wählen Sie Co 8 % 10 % ± 1 % , um eine ausgewogene Leistung sicherzustellen .                               |
| Sintertemperatur  | 1450 °C ± 10 °C         | 1450 °C sorgt für eine gleichmäßige Verteilung von Co (Abweichung <1 % ± 0,2 %); bei >1500 °C bildet sich ein Co-Pool (>10 µm ± 1 µm).                                   | Kontrolle 1450 °C ± 10 °C, Co- Verteilungsabweichung < 1 % ± 0,2 %.                                         |
| WC- Partikelgröße | 0,51 µm ± 0,01 µm       | 0,51 µm verbessert die Grenzflächenbindung; >2 µm verringert sich $K_{1c}$ um 5 % ± 1 %.                                                                                 | Wählen Sie WC 0,51 µm ± 0,01 µm.                                                                            |
| Additive (VC)     | 0,3 % ± 0,01 %          | 0,3 % kontrolliert die Co-Diffusion (Rate <10 <sup>-10</sup> cm <sup>2</sup> /s ± 10 <sup>-11</sup> cm <sup>2</sup> /s); >0,5 % bildet eine spröde Phase (>1 % ± 0,2 %). | Durch Zugabe von 0,3 % ± 0,01 % VC kann die Co-Diffusion gehemmt werden.                                    |
| Formdruck         | 250 MPa ± 5 MPa         | 250 MPa erhöhen die Dichte (>99,5 % ± 0,1 %); <200 MPa Porosität >2 % ± 0,5 %.                                                                                           | Verwenden Sie kaltsostatisches Pressen bei 250 MPa ± 5 MPa.                                                 |
| Sinterzeit        | 2 Stunden ± 0,1 Stunden | Kontrollierte Co-Benetzung für 2 Stunden (Kontaktwinkel <5°±1°); Co- Segregationsrate >0,5%±0,1% für >3 Stunden.                                                         | Das Sintern wurde 2 Stunden ± 0,1 Stunden lang durchgeführt, um die Gleichmäßigkeit des Co sicherzustellen. |

Hauptleistungsparameter der Hartmetall-Ermüdungsbeständigkeit und Schlagfestigkeit

| Leistung                    | Parameterbereich                                                       | Anwendungsszenario                                                        | Bemerkung                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Risswachstumsrate (da/ dN ) | <10 <sup>-6</sup> mm/Zyklus±10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus                 | Bergbaubohrer, Schneidwerkzeuge für die Luftfahrt, verschleißfeste Formen | Eine niedrige Risswachstumsrate (z. B. 10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus ± 10 <sup>-8</sup> mm/Zyklus) verlängert die Ermüdungslebensdauer (> 10 <sup>5</sup> -fach ± 10 <sup>4</sup> -fach). |
| Aufprallenergie             | 1050 J ± 1 J                                                           | Bergbaubohrer, Schneidwerkzeuge für die Luftfahrt, verschleißfeste Formen | Charpy-Schlagenergie 20 J ± 1 J erfüllt hohe Schlagzähigkeitsanforderungen (z. B. > 10 <sup>3</sup> Hz ± 100 Hz).                                                                      |
| Ermüdungsleben              | >10 <sup>5</sup> mal ± 10 <sup>4</sup> mal                             | Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen                                     | Kornverfeinerung (0,5 µm ± 0,01 µm) und Co-Optimierung (10 % ± 1 %) verbessern die Ermüdungsbeständigkeit erheblich.                                                                   |
| Auswirkungen auf das Leben  | Bohren>1500 m±100 m, Extrusion>10 <sup>6</sup> mal±10 <sup>5</sup> mal | Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen                                     | Hoher $K_{1c}$ ( 12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5) gewährleistet die Zuverlässigkeit gegen Stöße.                                                                                         |

Faktoren, die das Risswachstum auf die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

| Faktor  | Parameterbereich  | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                   | Optimierungsvorschläge           |
|---------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Körnung | 0,51 µm ± 0,01 µm | 0,51 µm da/ dN <10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus ± 10 <sup>-8</sup> mm/Zyklus; >2 µm da/ dN >10 <sup>-6</sup> mm/Zyklus ± 10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus. | Wählen Sie WC 0,51 µm ± 0,01 µm. |

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Faktor                  | Parameterbereich          | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                | Optimierungsvorschläge                                                          |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Co-Inhalt               | 10 % ± 1 %                | 10 % K <sub>1c</sub> > 12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5, niedriger da/ dN ; < 6 % da/ dN- Anstieg um 30 % ± 5 %.                | Stellen Sie Co auf 10 % ± 1 % ein.                                              |
| Spannungsverhältnis (R) | 0,1 ± 0,01                | R=0,1 da/ dN < 10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus ± 10 <sup>-8</sup> mm/Zyklus; R>0,5 da/ dN erhöht um 50 % ± 5 %.                   | Kontrolle R = 0,1 ± 0,01.                                                       |
| Additive (VC)           | 0,3 % ± 0,01 %            | 0,3 % erhöhen die Korngrenzenfestigkeit (>200 MPa ± 20 MPa); >0,5 % Sprödphase > 1 % ± 0,2 %.                                | VC 0,3 % ± 0,01 % hinzufügen.                                                   |
| Oberflächenrauheit      | Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm    | Ra < 0,05 μm, Rissbildungszeit > 10 <sup>4</sup> -mal ± 10 <sup>3</sup> -mal; > 0,1 μm, Lebensdauer um 20 % ± 5 % reduziert. | Polieren auf Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm.                                            |
| Mikroskopische Defekte  | Porosität < 0,5 % ± 0,1 % | Porosität < 0,5 % da/ dN < 10 <sup>-7</sup> mm/Zyklus ± 10 <sup>-8</sup> mm/Zyklus; > 1 % da/ dN - Erhöhung um 40 % ± 5 %.   | Die Porosität wird auf < 0,5 % ± 0,1 % kontrolliert und durch CT-Scans erkannt. |

### Faktoren, die die Schlagzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

| Faktor         | Parameterbereich  | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                  | Optimierungsvorschläge                                                             |
|----------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Co-Inhalt      | 10 % ± 1 %        | 10 % Aufprallenergie > 20 J ± 1 J; < 6 % Aufprallenergie < 10 J ± 1 J.                                         | Wählen Sie Co 10 % ± 1 %.                                                          |
| Körnung        | 0,51 μm ± 0,01 μm | 0,51 μm K <sub>1c</sub> > 12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5; > 2 μm, die Schlagenergie nimmt um 20 % ± 5 % ab.     | Wählen Sie WC 0,51 μm ± 0,01 μm.                                                   |
| Additive (VC)  | 0,3 % ± 0,01 %    | 0,3 % Schlagenergie steigt um 10 % ± 2 %; > 0,5 % Sprödphase > 1 % ± 0,2 %.                                    | VC 0,3 % ± 0,01 % hinzufügen.                                                      |
| Kerbtiefe      | 2 mm ± 0,01 mm    | 2 mm Standardtest; > 3 mm Aufprallenergiereduzierung 30 % ± 5 %.                                               | Kontrollieren Sie die Kerbtiefe auf 2 mm ± 0,01 mm.                                |
| Sinterdichte   | > 99,5 % ± 0,1 %  | > 99,5 % Schlagenergie > 20 J ± 1 J; < 99 % Porosität > 2 % ± 0,5 %.                                           | Stellen Sie eine Sinterdichte von > 99,5 % ± 0,1 % sicher.                         |
| Prüftemperatur | 40 °C ± 1 °C      | Bei 40 °C beträgt die Schlagenergie > 15 J ± 1 J, bei < 60 °C verringert sich die Schlagenergie um 20 % ± 5 %. | Die Leistung wird durch Tests bei niedrigen Temperaturen (40 °C ± 1 °C) bestätigt. |

### Hauptleistungsparameter des Hartmetall-Versagensmechanismus

| Leistung             | Parameterbereich                                        | Fehlerszenarien                                                           | Bemerkung                                                                                                                                                               |
|----------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verschleißrate       | < 0,06 mm <sup>3</sup> /N·m ± 0,01 mm <sup>3</sup> /N·m | Bergbaubohrer, Schneidwerkzeuge für die Luftfahrt, verschleißfeste Formen | Hohe Verschleißraten (> 0,06 mm <sup>3</sup> /N·m ± 0,01 mm <sup>3</sup> /N·m) führen zu einer verkürzten Werkzeuglebensdauer (z. B. Werkzeug < 10 Stunden ± 1 Stunde). |
| Risslänge            | < 0,1 mm ± 0,01 mm                                      | Luftfahrtwerkzeuge, Bergbaubohrer                                         | Mikrorisse (> 0,1 mm ± 0,01 mm) führen zu Abplatzungen und verringern die Zuverlässigkeit.                                                                              |
| Bruchrate            | < 0,1 % ± 0,02 %                                        | Luftfahrtwerkzeuge, verschleißfeste Formen                                | Ein hoher K <sub>1c</sub> (12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5) verringert das Bruchrisiko.                                                                                   |
| Schälgeschwindigkeit | < 0,1 % ± 0,02 %                                        | Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen                                     | Grenzflächenenergie > 1 J/m <sup>2</sup> ± 0,1 J/m <sup>2</sup> reduziert Abplatzungen.                                                                                 |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



### Faktoren, die das Verschleißversagen von Hartmetall beeinflussen

| Faktor               | Parameterbereich  | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                               | Optimierungsvorschläge                                                 |
|----------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Härte                | HV 1800±30        | HV 1800±30: Verschleißrate <0,06 mm <sup>3</sup> / N · m ± 0,01 mm <sup>3</sup> / N · m ;<br><1500±30: Erhöhung um 30%±5%.  | Stellen Sie eine Härte von HV 1800±30 sicher.                          |
| Körnung              | 0,51 μm ± 0,01 μm | 0,51 μm: geringe Verschleißrate; > 2 μm: Erhöhung um 20 % ± 5 %.                                                            | Wählen Sie WC 0,51 μm ± 0,01 μm.                                       |
| Co-Inhalt            | 10 % ± 1 %        | 10 % weniger adhäsiver Verschleiß; >12 % Verschleißrate erhöht sich um 15 % ± 3 %.                                          | Stellen Sie Co auf 10 % ± 1 % ein.                                     |
| Oberflächenrauheit   | Ra<0,05μm±0,01μm  | Ra <0,05 μm, die Verschleißrate ist niedrig; >0,1 μm, sie erhöht sich um 25 % ± 5 %.                                        | Polieren auf Ra <0,05 μm ± 0,01 μm.                                    |
| Betriebstemperatur   | <800 °C ± 10 °C   | >800 °C: Der Adhäsionsverschleiß erhöht sich um 50 % ± 5 %.                                                                 | Verwenden Sie Kühlmittel, um die Temperatur <600 °C ± 10 °C zu regeln. |
| Schleifpartikelgröße | <50 μm ± 5 μm     | <50μm: Verschleißrate <0,06 mm <sup>3</sup> /N·m ± 0,01 mm <sup>3</sup> /N·m; >100μm: Verschleißrate erhöht sich um 40%±5%. | Kontrollieren Sie die Schleifpartikelgröße auf <50 μm ± 5 μm.          |

### Faktoren, die Bruch und Abplatzen von Hartmetall beeinflussen

| Faktor                                           | Parameterbereich                            | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                                   | Optimierungsvorschläge                                                              |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Zähigkeit ( K <sub>1c</sub> )                    | >12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5              | K <sub>1c</sub> >12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5, die Bruchrate beträgt <0,1 % ± 0,02 %; <10 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5, die Bruchrate erhöht sich um 50 % ± 5 %. | Stellen Sie sicher, dass K <sub>1c</sub> >12 MPa·m <sup>1/2</sup> ± 0,5 ist.        |
| Körnung                                          | 0,51 μm ± 0,01 μm                           | Die Risswachstumsrate von 0,51 μm ist langsam; die Bruchrate von >2 μm erhöht sich um 30 % ± 5 %.                                                               | Wählen Sie WC 0,51 μm ± 0,01 μm.                                                    |
| Co-Inhalt                                        | 10 % ± 1 %                                  | 10 % weniger Abblättern; <6 % Abblätterungsrate erhöht sich um 20 % ± 5 %.                                                                                      | Stellen Sie Co auf 10 % ± 1 % ein.                                                  |
| Oberflächendefekte                               | Riss <0,1 mm ± 0,01 mm                      | Bei Rissen > 0,1 mm erhöht sich die Bruchrate um 50 % ± 5 %.                                                                                                    | Mithilfe einer Computertomographie wurden Risse erkannt und die Oberfläche poliert. |
| Spannungskonzentrationsfaktor ( K <sub>t</sub> ) | <2±0,1                                      | K <sub>t</sub> > 3, die Ablöserate erhöht sich um 40 % ± 5 %.                                                                                                   | Abgerundete Ecken (Radius > 0,5 mm ± 0,01 mm), K <sub>t</sub> < 2 ± 0,1.            |
| Grenzflächenenergie                              | >1 J/m <sup>2</sup> ± 0,1 J/ m <sup>2</sup> | >1 J/m <sup>2</sup> , die Abplatzrate verringert sich um 20 % ± 5 %; <0,5 J/m <sup>2</sup> , die Abplatzrate erhöht sich um 30 % ± 5 %.                         | Optimierte Grenzflächenenergie >1 J/m <sup>2</sup> ± 0,1 J/ m <sup>2</sup> .        |

### Hauptleistungsparameter der Leistungsverbesserung von Hartmetall

| Leistung                      | Parameterbereich            | Anwendungsszenario                                        | Bemerkung                                                                                                                       |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Härte (HV)                    | 18002500±30                 | Luftfahrtwerkzeuge, Bergbaubohrer, verschleißfeste Formen | Ultrafeine Körner (<0,2 μm ± 0,01 μm) und Oberflächenverstärkungen (wie z. B. Laserbeschichtungen) können >3000 ± 50 erreichen. |
| Zähigkeit ( K <sub>1c</sub> ) | 1015 MPa·m <sup>1/2</sup> ± | Bergbaubohrer, verschleißfeste                            | Additive (VC, TaC ) und Co-Optimierung (10%±1%) erhöhen K <sub>1c</sub> auf über 12                                             |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

| Leistung       | Parameterbereich                                     | Anwendungsszenario                       | Bemerkung                                                                                                                                                                           |
|----------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| c )            | 0,5                                                  | Formen                                   | $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ .                                                                                                                                         |
| Ermüdungsleben | $>10^5 \text{ mal} \pm 10^4 \text{ mal}$             | Verschleißfeste Formen,<br>Bergbaubohrer | PIII ( $10^{18} \text{ cm}^{-2} \pm 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) verlängert die Lebensdauer auf $>10^6$ -fach $\pm 10^5$ -fach.                                                       |
| Verschleißrate | $<0,06 \pm 0,01 \text{ m}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ | Luftfahrtwerkzeuge,<br>Bergbaubohrer     | Durch Ionenimplantation und Laserauftragschweißen können die Werte auf $<0,04 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ reduziert werden. |

### Einflussfaktoren auf Kornverfeinerung und Additive zur Verbesserung der Hartmetalleistung

| Faktor                 | Parameterbereich                          | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                                    | Optimierungsvorschläge                                                                                                              |
|------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Körnung                | $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$   | Härte $<0,5 \mu\text{m} >2000 \pm 30$ ; Härte $>1 \mu\text{m} <1800 \pm 30$ .                                                                                    | Wählen Sie WC $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und mahlen Sie die Mischung 40 Stunden $\pm 1$ Stunde lang in der Kugelmühle. |
| Zusatzstoffe (VC/ TaC) | $0,3 \% \pm 0,01 \%$                      | $0,3 \%$ Härte steigt um $5 \% \pm 1 \%$ , $K_{1c}$ steigt um $10 \% \pm 2 \%$ ; $>0,5 \%$ Sprödphase $>1 \% \pm 0,2 \%$ .                                       | VC/ TaC $0,3 \% \pm 0,01 \%$ hinzufügen.                                                                                            |
| Kugelmahlzeit          | 40 Stunden $\pm 1$ Stunde                 | Nach 40 Stunden beträgt die Korngröße $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , nach $<20$ Stunden beträgt die Korngröße $>1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ . | Kugelmühle für 40 h $\pm 1$ h (500 U/min $\pm 10$ U/min).                                                                           |
| Sintertemperatur       | $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ | Bei $1450^\circ\text{C}$ sind die Körner stabil, bei $>1500^\circ\text{C}$ sind die Körner $>1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .                               | Geregelt auf $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , Druck $<10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ .                       |
| Co-Inhalt              | $10 \% \pm 1 \%$                          | $10 \% K_{1c} >12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ ; $<6 \% K_{1c} <10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ .                                      | Stellen Sie Co auf $10 \% \pm 1 \%$ ein.                                                                                            |
| ZrC -Zugabe            | $0,2 \% \pm 0,01 \%$                      | $0,2 \%$ Härte $>2500 \pm 50$ ; $>0,5 \% K_{1c}$ nimmt um $10 \% \pm 2 \%$ ab.                                                                                   | ZrC hinzufügen.                                                                                                                     |

### Faktoren, die die Oberflächenverstärkung von Hartmetall beeinflussen und die Leistung verbessern

| Faktor                | Parameterbereich                                      | Auswirkungen auf die Leistung                                                                                                                                                           | Optimierungsvorschläge                                                                                                                                        |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aufkühlungstemperatur | $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$              | Bei $900^\circ\text{C}$ bildet sich eine WC-Schicht ( $1050 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , HV $>2500 \pm 50$ ); die Rissrate liegt bei $>1000^\circ\text{C}$ bei $>1 \% \pm 0,2 \%$ . | Kontrollierte Temperatur: $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , $\text{CH}_4$ -Durchflussrate: $10 \text{ l/min} \pm 0,1 \text{ l/min}$ .                |
| Ionendosis            | $10^{17} \text{ cm}^{-2} \pm 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ | $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ Härte $>2200 \pm 30$ ; $>10^{18} \text{ cm}^{-2}$ Schaden $>1 \% \pm 0,2 \%$ .                                                                                | Bei Verwendung von $\text{N}^+$ beträgt die Dosis $10^{17} \text{ cm}^{-2} \pm 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ und die Energie $100 \text{ keV} \pm 1 \text{ keV}$ . |
| Körnung               | $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$               | $0,51 \mu\text{m}$ hat die beste Verstärkungswirkung; $>2 \mu\text{m}$ Härtezunahme ist $<10 \% \pm 2 \%$ .                                                                             | Wählen Sie WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .                                                                                                       |
| Co-Inhalt             | $10 \% \pm 1 \%$                                      | $10 \%$ Verstärkungsschicht ist stabil; $<6 \%$ Rissrate erhöht sich um $20 \% \pm 5 \%$ .                                                                                              | Stellen Sie Co auf $10 \% \pm 1 \%$ ein.                                                                                                                      |
| Oberflächenrauheit    | $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$   | $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m}$ weist eine niedrige Verschleißrate auf; $>0,1 \mu\text{m}$ erhöht sich um $15 \% \pm 3 \%$ .                                                             | Polieren auf $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ .                                                                                            |
| Laserleistung         | $2 \text{ kW} \pm 0,1 \text{ kW}$                     | Die 2-kW-Ummantelungsschicht ist gleichmäßig (Dicke $50100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ); bei $>3 \text{ kW}$ erhöht sich die Rissrate um $10 \% \pm 2 \%$ .                         | Die Laserleistung wurde auf $2 \text{ kW} \pm 0,1 \text{ kW}$ und die Scangeschwindigkeit auf $10 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$ geregelt.                |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

Anhang:

## Was ist die Hall-Petch -Beziehung?

Die Hall-Petch-Beziehung ist ein klassisches theoretisches Modell, das den Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen (vor allem Festigkeit und Härte) und der Korngröße beschreibt. Sie wird häufig bei Metallen, Legierungen und keramischen Werkstoffen (wie z. B. Hartmetall WC-Co) verwendet. Diese Beziehung zeigt, dass mit abnehmender Korngröße Festigkeit und Härte des Werkstoffs deutlich zunehmen. Der Kernmechanismus ist die behindernde Wirkung von Korngrenzen auf die Versetzungsbewegung. Die Hall-Petch-Beziehung wurde erstmals 1951 bzw. 1953 von E. O. Hall und N. J. Petch vorgeschlagen und dient hauptsächlich der Untersuchung des mechanischen Verhaltens polykristalliner Werkstoffe.

### Grundlegende Konzepte und Formeln

Die Hall-Petch-Beziehung kann durch die folgende mathematische Formel ausgedrückt werden:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

或对于硬度:

$$HV = HV_0 + k' d^{-1/2}$$

其中:

- $\sigma_y$ : 材料的屈服强度 (单位: MPa)。
- $HV$ : 材料的硬度 (例如维氏硬度, 单位: HV)。
- $\sigma_0$  或  $HV_0$ : 单晶材料的屈服强度或硬度 (晶粒尺寸趋于无穷大时的极限值), 反映晶粒内部的固有阻力。
- $k$  或  $k'$ : Hall-Petch常数, 与材料类型和晶界特性相关 (单位:  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  或  $\text{HV} \cdot \text{m}^{1/2}$ )。
- $d$ : 平均晶粒尺寸 (单位: m, 通常为  $\mu\text{m}$  量级)。
- $d^{-1/2}$ : 晶粒尺寸的倒数平方根, 表示晶界密度的增加。

**直观解释:** 晶粒尺寸越小 ( $d$  越小),  $d^{-1/2}$  越大, 晶界密度越高, 位错运动受阻越明显, 因此材料的强度和硬度 ( $\sigma_y$  或  $HV$ ) 越高。

### Mikroskopischer Mechanismus

Die physikalische Grundlage der Hall-Petch-Beziehung ist die behindernde Wirkung von Korngrenzen auf die Versetzungsbewegung. Die mechanischen Eigenschaften polykristalliner Werkstoffe werden hauptsächlich durch folgende Mechanismen beeinflusst:

### Korngrenzen behindern die Versetzungsbewegung :

In polykristallinen Werkstoffen sind Korngrenzen zwischen den Körnern natürliche Hindernisse für die Versetzungsbewegung. Versetzungen sind Träger plastischer Materialverformung. Wenn sich Versetzungen auf Korngrenzen zubewegen, können sie diese aufgrund unterschiedlicher Orientierungen der Korngrenzen (der Ablenkwinkel der Korngrenzen beträgt üblicherweise  $20^\circ$ – $40^\circ$ ) und der Korngrenzenenergie ( $> 1,5 \text{ J/m}^2$ ) nicht leicht überschreiten .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Versetzungen häufen sich an Korngrenzen und bilden Versetzungsstaus, die zu lokalen Spannungskonzentrationen führen. Das Überschreiten von Korngrenzen erfordert höhere Spannungen, was sich in einer Erhöhung der Streckgrenze niederschlägt.

#### Erhöhte Korngrenzendichte :

Mit abnehmender Korngröße (z. B. von 2  $\mu\text{m}$  auf 0,5  $\mu\text{m}$ ) nimmt die Korngrenzendichte deutlich zu (von  $\sim 10^{12} \text{ m}^{-2}$  auf  $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ ). Je höher die Korngrenzendichte, desto mehr Hindernisse stehen der Versetzungsbewegung pro Volumeneinheit im Weg, und Festigkeit und Härte des Materials nehmen entsprechend zu.

von 2  $\mu\text{m}$  auf 0,5  $\mu\text{m}$  abnimmt, die Korngrenzendichte um etwa das Vierfache zunimmt und die Härtezunahme 25–30 % erreichen kann (z. B. von HV 1200 auf HV 1600).

#### Orowan- Stärkungsmechanismus :

Korngrenzen verbessern die Materialeigenschaften durch Fixierung von Versetzungen (ähnlich dem Orowan-Verstärkungsmechanismus).

晶界通过钉扎位错（类似Orowan强化机制）增强材料性能。位错绕过晶界的剪应力 ( $\tau$ ) 与晶界间距 ( $\lambda$ ) 相关:  $\tau \sim Gb/\lambda$ , 其中  $G$  为剪切模量,  $b$  为伯氏矢量,  $\lambda$  与晶粒尺寸  $d$  成正比 ( $\lambda \sim d$ )。晶粒尺寸越小,  $\lambda$  越小, 剪应力越高, 材料越强硬。

#### Korngrenzenmigration und -stabilität :

Die thermodynamische Stabilität der Korngrenzen hat einen wichtigen Einfluss auf die Hall-Petch-Beziehung. Die Migrationsrate der Korngrenzen (üblicherweise  $< 10^{-10} \text{ m/s}$ ) wird durch die Sintertemperatur (1400–1500  $^{\circ}\text{C}$ ) und Additive (z. B. VC 0,2–0,5 %) gesteuert. Die Migrationsbarriere beträgt 80–120 kJ/mol. Stabile Korngrenzen (niedrige Migrationsrate) tragen zur Erhaltung einer feinen Kornstruktur und damit zu einer hohen Festigkeit bei.

#### Anwendungsbereich der Hall-Petch-Beziehung

Die Hall-Petch-Beziehung funktioniert innerhalb eines bestimmten Korngrößenbereichs sehr gut, versagt jedoch in Extremfällen:

#### Anwendungsbereich (große Korngröße, $> 0,2 \mu\text{m}$ ) :

Für die meisten Hartmetalle (wie WC-Co) gilt die Hall-Petch-Beziehung, wenn die Korngröße im Bereich von 0,2  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  liegt. Wenn beispielsweise die Korngröße von WC-10Co von 2  $\mu\text{m}$  auf 0,5  $\mu\text{m}$  verringert wird, erhöht sich die Härte von HV 1200 auf HV 1600 (eine Zunahme von etwa 25–30 %), und die Streckgrenze erhöht sich um etwa 20–25 % (von 3500 MPa auf 4500 MPa). Zu diesem Zeitpunkt ist der Hauptverstärkungsmechanismus die Korngrenze, die die Versetzungsbewegung behindert.

#### Fehlerbereich (Korngröße ist zu klein, $< 0,2 \mu\text{m}$ ) :

Wenn die Korngröße auf den Nanobereich ( $< 0,2 \mu\text{m}$ , z. B.  $< 100 \text{ nm}$ ) reduziert wird, kann die Hall-Petch-Beziehung versagen und der „umgekehrte Hall-Petch-Effekt“ auftreten. Zu diesem Zeitpunkt wird das Gleiten der Korngrenzen zum Hauptverformungsmechanismus, was zu einer Abnahme der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Festigkeit und Härte führt.

Grund: Der Anteil der Korngrenzen ist zu hoch ( $> 50\%$ ), die Grenzflächenenergie dominiert die Leistung ( $> 1,5 \text{ J/m}^2$ ), das Gleiten und die Diffusion an den Korngrenzen (z. B. Coble- Kriechen) werden verstärkt und die Zähigkeit nimmt ab ( $K_{Ic}$  sinkt von  $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  auf  $< 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

Wenn beispielsweise die WC-Korngröße von  $0,5 \mu\text{m}$  auf  $0,1 \mu\text{m}$  reduziert wird, kann die Härte von HV 1600 auf HV 1400 sinken und die Zähigkeit nimmt deutlich ab ( $K_{Ic} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

### Hohe Temperaturen :

Bei hohen Temperaturen ( $> 800^\circ\text{C}$ ) erhöht sich die Migrationsrate der Korngrenzen ( $> 10^{-9} \text{ m/s}$ ), und die Körner können abnormal wachsen ( $> 2 \mu\text{m}$ ), was zu einer Abschwächung des Hall-Petch-Effekts führt. Beispielsweise kann bei  $1000^\circ\text{C}$  die Korngröße von WC-10Co von  $0,5 \mu\text{m}$  auf  $2 \mu\text{m}$  anwachsen, und die Härte nimmt um  $10\text{--}15\%$  ab (von HV 1600 auf HV 1400).

### Faktoren, die die Hall-Petch-Beziehung beeinflussen

Die Leistung der Hall-Petch-Beziehung wird von den folgenden Faktoren beeinflusst:

#### Korngröße (d) :

Die Korngröße ist die Kernvariable der Hall-Petch-Beziehung. Je kleiner das Korn, desto höher die Korngrenzendichte und desto deutlicher der Verstärkungseffekt. Reduziert man beispielsweise die WC-Korngröße von  $1 \mu\text{m}$  auf  $0,5 \mu\text{m}$ , erhöht sich die Härte um etwa  $15\text{--}20\%$ .

Allerdings führen zu kleine Körner ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) zum umgekehrten Hall-Petch-Effekt und es sind Additive (wie VC  $0,2\text{--}0,5\%$ ) erforderlich, um das Gleiten der Korngrenzen zu verhindern.

#### Materialtyp und Korngreneigenschaften :

Hall-Petch 常数  $k$  与材料类型和晶界特性密切相关。对于硬质合金 WC-Co,  $k$  值通常在  $0.5\text{--}1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  之间, 受 Co 含量和晶界强度影响。

Co 含量高 (如  $15\%$ ) 时, 晶界润湿性增强 (接触角  $< 15^\circ$ ), 晶界强度降低 ( $< 100 \text{ MPa}$ ),  $k$  值减小, 强化效果减弱; Co 含量低 (如  $6\%$ ) 时, 晶界强度高 ( $> 150 \text{ MPa}$ ),  $k$  值增大。

### 3. Zusatzstoffe :

Durch Zugabe von Korninhibitoren (z. B. VC  $0,2\text{--}0,5\%$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$   $0,1\text{--}0,3\%$ ) kann die Korngröße reduziert und der Hall-Petch-Effekt verstärkt werden. Beispielsweise kann durch Zugabe von  $0,4\%$  VC die WC-Korngröße von  $1 \mu\text{m}$  auf  $0,5 \mu\text{m}$  reduziert und die Härte um  $5\text{--}10\%$  (von HV 1500 auf HV 1600) erhöht werden.

Zu hohe Additive ( $> 0,8\%$ ) können jedoch spröde Phasen bilden (wie etwa die VCx- Phase, Anteil  $> 0,5\%$ ) und die Zähigkeit verringern ( $K_{Ic} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

### Sinterprozess :

Die Sinter Temperatur ( $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ ) und das Vakuum ( $< 10^{-2} \text{ Pa}$ ) beeinflussen die Korngröße und die Korngrenzenstabilität. Zu hohe Temperaturen ( $> 1550^\circ\text{C}$ ) führen zu Kornwachstum ( $> 2 \mu\text{m}$ ) und einem Härteabfall von  $10\text{--}15\%$ .

Wenn WC-10Co beispielsweise bei  $1450^\circ\text{C}$  gesintert wird, bleibt die Korngröße bei  $0,5 \mu\text{m}$  und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Härte erreicht HV 1600; beim Sintern bei 1600 °C wächst die Korngröße auf 2 µm und die Härte sinkt auf HV 1400.

#### **Co -Inhalt :**

Der Co-Gehalt beeinflusst die Benetzbarkeit der Korngrenzen und die plastische Verformbarkeit. Bei niedrigem Co-Gehalt (z. B. 6 %) ist die Korngrenzenverfestigung signifikant und die Härte hoch (HV > 1600); bei hohem Co-Gehalt (z. B. 15 %) erweicht die Korngrenze und die Härte nimmt ab (HV < 1200).

Beispielsweise weist WC-6Co (Korngröße 0,5 µm ) eine Härte von HV 1700 auf, während WC-15Co (gleiche Korngröße) lediglich eine Härte von HV 1200 aufweist.

#### **Mikroskopische Defekte :**

Porosität (>1 %) und Mikrorisse (Länge >0,05 mm) schwächen die korngrenzenverfestigende Wirkung und verringern Härte und Festigkeit. So reduziert beispielsweise eine Erhöhung der Porosität von 0,5 % auf 2 % die Härte um etwa 5 % (von HV 1600 auf HV 1520).

#### **Anwendung von Hartmetall**

Bei Hartmetallen (wie WC-Co) wird die Hall-Petch-Beziehung häufig verwendet, um die Korngröße zu steuern und so die Eigenschaften zu optimieren:

#### **Kornfeinung erhöht die Härte :**

Die Korngröße wurde durch Hochenergie-Kugelmahlen (300-500 U/min, 20-40 Stunden), Zugabe von Korninhibitoren (wie VC 0,2%-0,5%) und optimiertes Sinterverfahren (1400-1500°C, Vakuum <10<sup>-2</sup> Pa ) von 2 µm auf 0,5 µm reduziert .

Ergebnis: Die Härte stieg von HV 1200 auf HV 1600 und die Streckgrenze von 3500 MPa auf 4500 MPa, wodurch die Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsschneidens (> 800 m/min) erfüllt wurden.

#### **Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit :**

Zu kleine Körner (<0,2 µm ) führen zu einer verringerten Zähigkeit (  $K_{IC} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ), was für Szenarien mit hoher Aufprallkraft (wie z . B. Bohrmeißel im Bergbau) nicht geeignet ist. Daher muss die Korngröße im Bereich von 0,5 bis 1 µm kontrolliert werden , um ein Gleichgewicht zwischen Härte (HV 1600) und Zähigkeit (  $K_{IC}$  12 bis 14 MPa·m<sup>1/2</sup> ) zu erreichen .

Beispielsweise weist WC-10Co (Korngröße 0,5 µm ) eine Härte von HV 1600 und einen  $K_{IC}$  von 12 MPa·m<sup>1/2</sup> auf und eignet sich daher für Werkzeuge in der Luftfahrt.

#### **Optimierung technischer Anwendungen :**

µm durch Hall-Petch -Beziehung, Härte erreicht HV 1700 und Schnittlebensdauer >15 Stunden.

Bergbaubohrer: Korngröße 0,8 µm , Härte HV 1500,  $K_{IC}$  13 MPa·m<sup>1/2</sup> , Bohrdistanz >1200 m.

Verschleißfeste Form: Korngröße 0,5 µm , Härte HV 1600, Extrusionszeiten >10<sup>6</sup> mal.

#### **Einschränkungen und Herausforderungen**

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

Obwohl die Hall-Petch-Beziehung bei Hartmetallen weit verbreitet ist, weist sie auch die folgenden Einschränkungen und Herausforderungen auf:

#### **Umgekehrter Hall-Petch -Effekt :**

Ist die Korngröße zu klein ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ), wird die Verformung durch Korngrenzgleiten und -diffusion dominiert, und Festigkeit und Härte nehmen ab. Wird beispielsweise die WC-Korngröße von  $0,5 \mu\text{m}$  auf  $0,1 \mu\text{m}$  reduziert, kann die Härte von HV 1600 auf HV 1400 sinken.

#### **der Korngrenzenstabilität :**

Die Sinterzeit ( $> 4$  Stunden) führt zu Kornwachstum ( $> 2 \mu\text{m}$ ), wodurch der Hall-Petch-Effekt reduziert wird. Um das Kornwachstum zu hemmen, muss VC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  hinzugefügt werden.

#### **Risiken einer verringerten Belastbarkeit :**

die Kornverfeinerung die Härte erhöht, kann sie zu einer Verringerung der Zähigkeit führen ( $K_{IC} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ). Die Leistung muss durch Optimierung des Co-Gehalts (8–12 %) und der Korngröße ( $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$ ) ausgeglichen werden.

#### **Die Auswirkungen von Mikrodefekten :**

Porosität ( $> 1\%$ ) und Mikrorisse (Länge  $> 0,05 \text{ mm}$ ) können die korngrenzenverstärkende Wirkung schwächen. Beispielsweise beträgt die Härte von hochporösem WC-10Co (2 % Porosität) nur HV 1520, was deutlich niedriger ist als erwartet (HV 1600).

#### **Entwicklungstrend**

Mit der Entwicklung der Materialwissenschaft und der intelligenten Fertigung vertieft sich die Anwendung der Hall-Petch-Beziehung bei Hartmetall:

#### **Nanokristalline und ultrafeine Kristalltechnologie :**

Entwicklung von ultrafeinkörnigen ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ) und nanokristallinen ( $< 100 \text{ nm}$ ) Hartmetallen mit einer Härte von bis zu HV 2000, aber das Problem des Korngrenzgleitens muss gelöst werden (z. B. durch Zugabe von 0,2 %–0,5 % TaC zur Verbesserung der Korngrenzenfestigkeit).

#### **Design der Gradientenstruktur :**

Die Hall-Petch-Beziehung wird verwendet, um ein Hartmetall mit Gradientenstruktur mit feinen Oberflächenkörnern ( $0,2\text{--}0,5 \mu\text{m}$ , Härte HV 1700) und etwas größeren inneren Körnern ( $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ,  $K_{IC} \approx 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) zu entwerfen, wodurch eine synergetische Optimierung von Härte und Zähigkeit erreicht wird.

#### **KI-gestützte Optimierung :**

KI wird eingesetzt, um den Einfluss der Korngröße auf die Leistung vorherzusagen (Vorhersagegenauigkeit  $> 90\%$ ) und die Parameter für Kugelmahl- und Sinterprozesse zu optimieren. Beispielsweise kann maschinelles Lernen genutzt werden, um die optimale Korngröße ( $0,5 \mu\text{m}$ ) mit einer Härteabweichung von  $< 2\%$  vorherzusagen.

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



**Verbesserte Hochtemperaturleistung :**

Entwickeln Sie hochtemperaturstabile Korngrenzeninhibitoren (wie ZrC 0,1 % – 0,3 %), um die Korngröße ( $< 1 \mu\text{m}$ ) bei  $> 800^\circ\text{C}$  aufrechtzuerhalten und den Hall-Petch-Effekt aufrechtzuerhalten.

Zusammenfassend zeigt die Hall-Petch-Beziehung den Einfluss der Korngröße auf die mechanischen Eigenschaften von Hartmetall und bildet die theoretische Grundlage für Kornverfeinerung und Leistungsoptimierung. Durch gezielte Regulierung von Korngröße und Korngrenzeigenschaften lassen sich Härte und Festigkeit deutlich verbessern. Dabei ist jedoch auf die Balance zwischen Zähigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit zu achten. Mit der Einführung neuer Technologien und intelligenter Fertigung wird die Hall-Petch-Beziehung im Hartmetallbereich eine größere Rolle spielen.



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## Was ist Hartmetall mit Gradientenstruktur ?

**Hartmetall mit Gradientenstruktur** ist eine Hartmetallart (WC-Co), die so konzipiert und reguliert ist, dass ihre Mikrostruktur oder Zusammensetzung (wie Korngröße, Gehalt an Bindephasen oder Additivverteilung) innerhalb des Materials eine graduelle Veränderung entlang einer bestimmten Richtung (z. B. von der Oberfläche nach innen) aufweist. Diese Struktur vereint die Leistungsvorteile verschiedener Bereiche, wie hohe Oberflächenhärte und hohe innere Zähigkeit, um den umfassenden Leistungsanforderungen rauer Arbeitsbedingungen (wie z. B. bei Flugzeugwerkzeugen und Bergbaubohrern) gerecht zu werden. Verglichen mit herkömmlichem Hartmetall bietet Hartmetall mit Gradientenstruktur deutliche Vorteile bei der Leistungsoptimierung, stellt jedoch auch neue Herausforderungen an traditionelle Güten und Produktionsmethoden und stellt gleichzeitig höhere Anforderungen an einen KI-Agenten zur intelligenten Produktionsdesignsteuerung.

### Grundkonzepte und Prinzipien der Gradientenstruktur von Hartmetall

Hartmetall besteht üblicherweise aus einer Hartphase (z. B. WC, das eine hohe Härte, aber auch eine hohe Sprödigkeit aufweist) und einer Bindephase (z. B. Co, das eine gute Zähigkeit, aber eine geringe Härte aufweist). Herkömmliches Hartmetall (z. B. YG6, YG8 und andere Sorten) weist eine gleichmäßige Mikrostruktur auf, und der Co-Gehalt und die Korngröße sind im gesamten Material grundsätzlich einheitlich. Dadurch ist es schwierig, die Anforderungen an hohe Härte und hohe Zähigkeit gleichzeitig zu erfüllen. Beispielsweise weist YG6 (6 % Co) eine hohe Härte (HV 1600–1700), aber eine geringe Zähigkeit ( $K_{IC}$  c 8–10 MPa·m<sup>1/2</sup>) auf ; YG15 (15 %) weist eine gute Zähigkeit ( $K_{IC}$  c 14–16 MPa·m<sup>1/2</sup>) auf , aber eine geringere Härte (HV 1200–1300).

Hartmetall mit Gradientenstruktur erreicht eine synergetische Funktionsoptimierung durch die Einführung von Leistungsgradienten in verschiedenen Bereichen des Materials:

#### Oberfläche

( z. B. 4–6 %), die Korngröße ist fein (z. B. 0,2–0,5 μm ) , die Härte ist hoch (HV 1600–1800), die Verschleißfestigkeit ist stark und das Material ist geeignet, hoher Reibung und Abnutzung standzuhalten.

#### Mittlere Schicht

die Korngröße ändern sich allmählich (z. B. Co 8 %–10 %, Korn 0,5–1 μm ) , die Dicke 0,5–2 mm und die Spannungskonzentration an der Grenzfläche wird abgebaut (<80 MPa).

#### intern

Der Co-Gehalt ist relativ hoch (z. B. 12–15 %), die Korngröße ist etwas größer (z. B. 1–2 μm) , die Zähigkeit ist ausgezeichnet (  $K_{IC}$  c 14–16 MPa·m<sup>1/2</sup> ) , die Schlagzähigkeit ist stark und es kann Rissenergie absorbieren und Brüche verhindern.

Diese Gradientenverteilung wird durch die Regulierung der Co-Diffusion, des Kornwachstums und der Sinterprozesse erreicht. Die mechanischen Eigenschaften basieren auf der Verbundwerkstofftheorie (wie dem Voigt-Modell,  $E \sim V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$  ) und der Hall-

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Petch-Beziehung ( $\sigma \sim d^{-1/2}$ ), so dass das Material in unterschiedlichen Tiefen unterschiedliche Härte, Festigkeit und Zähigkeit aufweist. Die Gradientenstruktur kann zudem durch die Steuerung der Grenzflächenenergie ( $<1,5 \text{ J/m}^2$ ) und der Korngrenzendynamik (Migrationsrate  $<10^{-10} \text{ m/s}$ ) weiter optimiert werden.

#### Gradientenstruktur-Designmethode

Bei der Entwicklung von Hartmetall mit Gradientenstruktur stehen vor allem folgende Aspekte im Vordergrund:

#### Gradient des Co-Gehalts:

Der Co-Gehalt an der Oberfläche ist gering (4–6 %), in der mittleren Schicht beträgt er 8–10 % und steigt im Inneren allmählich auf 12–15 % an.

Prinzip: Bei niedrigem Co-Gehalt ist der WC-Volumenanteil hoch ( $>90\%$ ) und die Härte verbessert sich; bei hohem Co-Gehalt wird die Fähigkeit zur plastischen Deformation gesteigert (Dehnungsgeschwindigkeit  $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) und die Zähigkeit verbessert.

Umsetzungsmethode: Durch geschichtetes Pulververhältnis (Co-Pulververhältnis nimmt von außen nach innen zu) oder Steuerung der Co-Diffusionsrate beim Sintern ( $<10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ). Beispielsweise werden drei Pulverschichten übereinander gestapelt: Oberflächenschicht Co 4 %, Mittelschicht Co 8 %, Innenschicht Co 12 % und durch Flüssigphasensintern wird ein Gradient gebildet.

#### Korngrößengradient:

Die Oberflächenkörner sind fein ( $0,2\text{--}0,5 \mu\text{m}$ ), die mittlere Schicht ist  $0,5\text{--}1 \mu\text{m}$  dick und die inneren Körner sind etwas größer ( $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ).

Prinzip: Kleine Körner erhöhen Härte und Festigkeit durch den Hall-Petch-Effekt ( $HV \sim d^{-1/2}$ ); größere Körner verringern das Korngrenzengleiten (Korngrenzenfläche  $<10^{13} \text{ m}^{-2}$ ) und verbessern die Zähigkeit.

Durchführungsmethode: Korninhibitoren auf der Oberfläche hinzufügen (z. B. VC 0,2–0,5 %,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0,1–0,3 %), Inhibitoren in der Mittelschicht und im Inneren reduzieren oder die Kornwachstumsrate durch schichtweises Sintern kontrollieren (Oberfläche  $<10^{-10} \text{ m/s}$ , im Inneren etwas höher).

#### Additiver Verteilungsgradient:

Geben Sie mehr VC oder  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (0,2–0,5 %) auf die Oberfläche, um das Kornwachstum zu hemmen und die Härte zu erhöhen; geben Sie eine kleine Menge TaC (0,1–0,3 %) in die mittlere Schicht, um die Korngrenzenfestigkeit ( $>150 \text{ MPa}$ ) zu erhöhen; geben Sie im Inneren TaC (0,2–0,5 %) hinzu, um die Zähigkeit weiter zu verbessern.

Implementierungsmethode: Schichtadditivverhältnis, kombiniert mit der Kontrolle des Sinterprozesses. Fügen Sie beispielsweise der Oberflächenschicht 0,4 % VC, der Mittelschicht 0,2 % TaC und der Innenschicht 0,3 % TaC hinzu.

#### Funktionaler Gradient:

eine verschleißfeste Beschichtung (z. B. CrN oder TiN, Dicke  $2\text{--}4 \mu\text{m}$ , Härte HV 3000–3500) aufgebracht, die mittlere Schicht optimiert die Ermüdungsbeständigkeit (Risswachstumsrate  $da/dN$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<10^{-7}$  mm/Zyklus) und der innere Teil optimiert die Schlagfestigkeit (Schlagenergie  $> 18$  J).

Durchführungsmethode: Kombination aus Oberflächenmodifizierung (z. B. Aufkohlen, Ionenimplantation) und innerer Mikrostrukturoptimierung.

#### **Mehrphasengradient:**

Durch die Einführung einer mehrphasigen Struktur, beispielsweise durch das Hinzufügen einer kleinen Menge TiC (Härte  $> 2000$  HV, 5 %–10 %) auf der Oberfläche wird die Verschleißfestigkeit verbessert. Die mittlere Schicht ist eine WC-Co-Übergangsschicht und die WC-Co-Struktur bleibt im Inneren erhalten, um die Zähigkeit sicherzustellen.

Durchführung: TiC- Pulver schichtweise zugeben und durch Sintern einen Mehrphasengradienten bilden.

#### **Diversifizierung der Gradientenrichtungen:**

Neben radialen Gradienten von der Oberfläche nach innen können auch laterale Gradienten (wie z. B. hohe Härte der Werkzeugschneide und hohe Zähigkeit des Klemnteils) oder multidirektionale Gradienten (geeignet für Teile mit komplexer Geometrie) gestaltet werden.

Implementierungsmethode: Verwenden Sie 3D-Drucktechnologie (z. B. selektives Laserschmelzen SLM), um die Zusammensetzung und Struktur jedes Bereichs genau zu steuern.

#### **Herstellungstechnologie von Hartmetall mit Gradientenstruktur**

Die Herstellung von Hartmetall mit Gradientenstruktur muss durch die folgenden Prozesse erfolgen:

##### **Pulverdosierung und -formung**

Der Grünkörper wurde im Schichtpulververfahren hergestellt, wobei an der Oberfläche, in der Mitte und im Inneren WC-Co-Mischpulver mit unterschiedlichen Co-Gehalten, Korngrößen oder Additivverhältnissen verwendet wurden. Beispielsweise Oberflächenschicht (Co 4 %, WC  $0,5 \mu\text{m}$ ), Mittelschicht (Co 8 %, WC  $1 \mu\text{m}$ ), Innenschicht (Co 12 %, WC  $1,5 \mu\text{m}$ ).

Grünkörpers sicherzustellen, wird kalisostatisches Pressen (CIP, Druck 200–300 MPa) verwendet. Präzisionsanforderungen: Pulververhältnisabweichung  $<0,1$  %, Schichtdickenabweichung  $<0,02$  mm, Zwischenschicht-Bindungsfestigkeit  $>50$  MPa.

Sinterprozess:

Flüssigphasensintern ( $1400$ – $1500$  °C, 1–3 Stunden, Vakuumgradient  $<10^{-2}$  Pa), die Co-Diffusionsrate ( $<10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s) wird durch Temperaturgradient und Zeit gesteuert, um eine Gradientenverteilung zu bilden.

##### **Sintertemperaturgradient**

Die Oberflächentemperatur ist etwas niedriger ( $1400$  °C), was das Kornwachstum hemmt; die mittlere Schicht hat  $1420$  °C und der innere Teil  $1450$ – $1500$  °C, was die Co-Diffusion und ein moderates Kornwachstum fördert.

Sinteratmosphäre: Vakuum oder Argonatmosphäre (Reinheit  $> 99,99$  %), Oxidation vermeiden ( $\text{O}_2$ -Gehalt  $< 0,5$  ppm), Korngrenzedefekte reduzieren ( $< 0,2$  %).

Abkühlrate: kontrolliert auf  $3$ – $5$  °C/min, um thermische Spannungen ( $<100$  MPa) zu vermeiden;

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



bei  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ist die Mikrorissrate  $>0,5\%$ .

### Wärmebehandlung und Oberflächenmodifizierung

Durch Glühen ( $550\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1–2 Stunden) werden die inneren Spannungen der Co-Phase ( $<50\text{ MPa}$ ) reduziert und  $K_{1c}$  um etwa  $5\%$  erhöht.

Oberflächenaufkohlen ( $850\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{CH}_4$ -Atmosphäre, Kohlenstoffschichtdicke  $10\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ ) oder Ionenimplantation ( $\text{N}^+$ , Dosis  $10^{16}\text{--}10^{17}\text{ cm}^{-2}$ , Energie  $80\text{--}120\text{ keV}$ ) zur Bildung einer Schicht mit hoher Härte (HV  $1800\text{--}2000$ ).

Durch Laserauftragschweißen (Leistung  $1,5\text{--}2,5\text{ kW}$ , Dicke  $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ ) wird eine Schicht mit ultrahoher Härte (HV  $>2500$ ) gebildet.

Durch plasmaunterstützte Ionenimplantation (PIII, Dosis  $10^{17}\text{--}10^{18}\text{ cm}^{-2}$ ) wird die Beständigkeit gegen Tiefenverschleiß (Tiefe  $>0,5\text{ }\mu\text{m}$ ) verbessert.

### Online-Überwachung und -Steuerung

Die Partikelgrößenverteilung wurde mit einem Laser-Partikelgrößenanalysator (Abweichung  $<0,02\text{ }\mu\text{m}$ ) bestimmt und die Korngrenzenspannung ( $<100\text{ MPa}$ ) mittels Röntgenbeugung (XRD, Peakbreitenabweichung  $<0,2^{\circ}$ ) ermittelt.

Der Sinterprozess wurde in Echtzeit mit einem Temperatursensor (Genauigkeit  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), einem Drucksensor (Genauigkeit  $\pm 10^{-3}\text{ Pa}$ ) und einem Online-Mikroskop (Auflösung  $<0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) überwacht, um die Konsistenz der Gradientenstruktur (Abweichung  $<0,5\%$ ) sicherzustellen.

Zur Erkennung von Mikrorissen (Länge  $>0,05\text{ mm}$ ) während des Sinterprozesses wurde die Schallemissionstechnologie (Frequenzbereich  $20\text{ kHz--}500\text{ kHz}$ ) eingesetzt.

### Leistungsmerkmale und Vorteile von Hartmetall mit Gradientenstruktur

Durch die abgestimmte Leistungsoptimierung weist Hartmetall mit Gradientenstruktur folgende Eigenschaften auf:

#### Balance aus Härte und Zähigkeit

Hohe Oberflächenhärte (HV  $1600\text{--}1800$ ) und hervorragende innere Zähigkeit ( $K_{1c}$   $14\text{--}16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), wodurch der Widerspruch zwischen Härte und Zähigkeit von herkömmlichem Hartmetall überwunden wird.

Beispielsweise weist der Gradient WC-10Co mit  $4\%$  Co auf der Oberfläche und  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  Körnung eine Härte von HV  $1700$ ,  $12\%$  Co im Inneren und  $K_{1c}$   $14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  auf und seine Gesamtleistung ist besser als die des herkömmlichen YG8 (Co  $8\%$ , HV  $1500$ ,  $K_{1c}$   $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

#### Synergistische Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Schlagfestigkeit

Hohe Oberflächenhärte und niedriger Co-Gehalt verringern die Verschleißrate ( $<0,08\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ); hoher Co-Gehalt im Inneren erhöht die Aufprallenergie ( $18\text{--}20\text{ J}$ ).

Geeignet für Szenarien mit hoher Reibung und Aufprall, wie z. B. Bergbaubohrer mit einer Lebensdauer von  $>1500\text{ m}$  beim Bohren in hartem Gestein, die  $50\%$  höher ist als bei herkömmlichem YG6.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Hervorragende Anti-Ermüdungsleistung**

verbessert die Ermüdungslebensdauer ( $>10^5$ -fach) durch Verringerung der Oberflächenrissbildung (Risslänge  $<0,05$  mm) und der inneren Risswachstumsrate ( $da/dN < 10^{-7}$  mm/Zyklus).

Beispielsweise ist die Lebensdauer von Gradient-WC-10Co unter zyklischer Belastung (Spannungsverhältnis  $R = 0,1$ , Frequenz 5–15 Hz) 20–30 % höher als die von herkömmlichem YG10 (Co 10 %).

### **Thermoschockbeständigkeit**

Die Gradientenstruktur verringert die thermische Spannungskonzentration ( $<80$  MPa) und verbessert die Thermoschockbeständigkeit unter Hochtemperaturbedingungen ( $>800$  °C) um 15–20 %, sodass sie für Luftfahrtwerkzeuge (Schneidtemperatur  $>800$  °C) geeignet ist.

### **Korrosionsbeständigkeit**

Der niedrige Co-Gehalt an der Oberfläche verringert die Korrosionsempfindlichkeit (Auflösungsrate  $<10^{-10}$  g/cm<sup>2</sup> · s) und verbessert die Korrosionsbeständigkeit in sauren Umgebungen (pH  $<5$ ) um 10–15 %, wodurch es für Anwendungen im Schiffsbau geeignet ist.

### **Passen Sie sich rauen Arbeitsbedingungen an**

Bei hohen Temperaturen ( $>800$  °C), starken Stößen ( $>500$  Hz), hoher Belastung ( $>80$  MPa) und korrosiven Umgebungen (NaCl-Konzentration 3,5 %) kann die Gradientenstruktur die Lebensdauer effektiv verlängern. Beispielsweise erhöht sich die Lebensdauer von Tiefseebohrern um 50 % und die Lebensdauer von Bremsbelagformen für Hochgeschwindigkeitszüge um 60 %.

### **Herausforderungen von Hartmetall mit Gradientenstruktur im Vergleich zu herkömmlichen Hartmetallsorten**

Die Einführung von Hartmetall mit Gradientenstruktur hat für herkömmliche Hartmetallsorten (wie die Serien YG und YT) viele Herausforderungen mit sich gebracht:

#### **Leistungseinschränkungen aufgedeckt**

Herkömmliche Güten haben eine einheitliche Struktur und erfüllen die Anforderungen komplexer Arbeitsbedingungen nur schwer. Beispielsweise weist YG6 (Co 6 %) eine hohe Härte (HV 1600) auf, bricht aber unter Belastungen (z. B. im Bergbau) leicht ( $K_{IC} < 10$  MPa·m<sup>1/2</sup>); YG15 (Co 15 %) weist eine gute Zähigkeit ( $K_{IC} 14–16$  MPa·m<sup>1/2</sup>) auf, weist aber eine unzureichende Härte (HV  $<1300$ ) und geringe Verschleißfestigkeit auf.

Hartmetall mit Gradientenstruktur übertrifft die Leistungsgrenzen herkömmlicher Sorten durch die Kombination aus hoher Oberflächenhärte (HV 1700) und hoher innerer Zähigkeit ( $K_{IC} > 14$  MPa·m<sup>1/2</sup>). Beispielsweise ist die Standzeit ( $>15$  Stunden) von WC-10Co mit Gradientenstruktur in Luftfahrtwerkzeugen um 25 % höher als die von YG8.

### **Wettbewerb in Anwendungsbereichen**

Traditionelle Sorten bieten in bestimmten Bereichen (z. B. bei geringer Stoß- und

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

Reibungsbelastung) weiterhin Vorteile, wie z. B. YG3 (Co 3 %) beim Schneiden mit geringer Belastung. Gradienten-Hartmetall ist jedoch in hochbelasteten und multifunktionalen Szenarien (z. B. in der Luftfahrt und in der Tiefsee) wettbewerbsfähiger. Beispielsweise übertrifft die Bohrdistanz von Gradienten-WC-10Co in Tiefseeborenm ( $> 1500$  m) die von YG8 ( $< 1000$  m) bei weitem.

Traditionelle Marken müssen ihre Formeln verbessern oder abgestufte Strukturen einführen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit auf dem Markt zu erhalten. Andernfalls besteht die Gefahr, dass sie nach und nach aus dem High-End-Markt verschwinden.

### **Komplexität des Produktionsprozesses**

Der Produktionsprozess traditioneller Sorten ist einfach (gleichmäßiges Pulververhältnis + einmaliges Sintern) und kostengünstig (ca. 50–60 Yuan/kg). Hartmetall mit Gradientenstruktur erfordert schichtweises Pulvermischen, Gradientensintern und Online-Überwachung, was komplex ist und die Kosten um 15–20 % (ca. 60–70 Yuan/kg) erhöht.

Herkömmliche Produktionsanlagen (wie etwa gewöhnliche Sinteröfen) können die Präzisionsanforderungen von Gradientenstrukturen (wie etwa eine Abweichung der Co-Verteilung  $< 0,5$  %) kaum erfüllen und müssen auf hochpräzise Anlagen (wie etwa Gradientensinteröfen mit einer Temperaturgradienten-Regelgenauigkeit von  $\pm 2$  °C/cm) aufgerüstet werden.

### **Die Herausforderung der Standardisierung**

Traditionelle Güten verfügen über ausgereifte Normen (wie ISO K10, K20, P10), klare Leistungsparameter und lassen sich problemlos in Massenproduktion und -anwendung herstellen. Die Leistung von Hartmetall mit Gradientenstruktur ändert sich mit der Tiefe und lässt sich nur schwer mit einer einzigen Norm definieren. Daher muss ein neues System zur Leistungsbewertung eingeführt werden (z. B. schichtweise Prüfung von Härte und Zähigkeit).

$K_{10} < 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) von Gradient WC-10Co kann nicht direkt mit der herkömmlichen ISO-Norm abgeglichen werden, was bei der Werkstoffauswahl für den Anwender zu Verwirrung führen kann.

### **Marktakzeptanz und Förderung**

Traditionelle Sorten haben eine lange Geschichte und hohe Marktbekanntheit, und die Anwender sind mit ihrer Leistung und ihrem Anwendungsbereich vertraut. Als aufstrebende Technologie muss Hartmetall mit Gradientenstruktur durch langfristige Anwendungsüberprüfungen (z. B. durch Lebensdauertests von Werkzeugen in der Luftfahrt) Vertrauen gewinnen.

In der Anfangsphase der Vermarktung müssen die Bedenken der Benutzer hinsichtlich der Kosten und der Leistungsstabilität berücksichtigt werden, indem beispielsweise die Vorteile durch Demonstrationsprojekte aufgezeigt werden (wie etwa die Verlängerung der Lebensdauer von Bergbauborenm um 50 %).

### **Anpassungsfähigkeit der Lieferkette und Materialauswahl**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Lieferkette für traditionelle Güten ist ausgereift, die Rohstoffe (wie WC-Pulver, Co-Pulver) weisen einheitliche Spezifikationen auf und die Beschaffungskosten sind niedrig. Hartmetall mit Gradientenstruktur erfordert Pulver unterschiedlicher Spezifikationen (wie WC mit unterschiedlichen Partikelgrößen und unterschiedlichem Co-Gehalt), was die Komplexität und die Kosten der Lieferkette erhöht.

Anwender müssen ihre Materialauswahlstrategien überdenken. Die traditionelle, einfache Auswahlmethode für Güteklassen (z. B. basierend auf Härte oder Co-Gehalt) ist nicht mehr anwendbar. Stattdessen müssen mehrschichtige Leistungstests und Simulationsanalysen eingeführt werden.

### **Anforderungen an einen KI-Agenten zur intelligenten Produktionsdesignsteuerung**

Die Herstellung von Hartmetall mit Gradientenstruktur stellt höhere Anforderungen an die intelligente Fertigung. Der KI-Agent zur intelligenten Produktionsdesignsteuerung muss über die folgenden Fähigkeiten verfügen, um eine effiziente, präzise und stabile Produktion zu gewährleisten:

#### **Mikrostrukturvorhersage und -optimierung**

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss die Auswirkungen des Co-Gehalts, der Korngröße und des Additivverhältnisses auf die Leistung durch Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) und des Deep Learnings (DL) (wie Support Vector Machine SVM, Deep Neural Network DNN) vorhersagen können (Vorhersagegenauigkeit > 90 %).

#### **Spezifische Funktionen**

Basierend auf historischen Daten und physikalischen Modellen (wie Hall-Petch-Beziehung, Voigt-Modell) wird der optimale Co-Gehaltsgradient vorhergesagt (z. B. 4 % an der Oberfläche, 8 % in der mittleren Schicht und 12 % im Inneren, mit einer Abweichung von <0,2 %).

Eine optimierte Korngrößenverteilung (0,5  $\mu\text{m}$  an der Oberfläche, 1  $\mu\text{m}$  in der Mittelschicht, 1,5  $\mu\text{m}$  im Inneren, mit einer Abweichung von <0,02  $\mu\text{m}$ ) sorgt für eine synergistische Verbesserung der Härte (HV 1700) und Zähigkeit ( $K_{IC}$  c 14  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

Empfohlenes Additivverhältnis (z. B. VC 0,4 %, TaC 0,2 %,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0,1 %, Verhältnisabweichung <0,05 %) zur Verbesserung der Leistungskonsistenz (Abweichung <0,5 %).

Simulieren Sie die geschichtete Leistung von Gradientenstrukturen (wie Oberflächenverschleißfestigkeit und innere Schlagfestigkeit), um Designlösungen zu optimieren.

#### **Überwachung und Steuerung von Prozessparametern in Echtzeit**

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss die Technologie des industriellen Internets der Dinge (IIoT) kombinieren, um Produktionsparameter in Echtzeit (Abweichung < 1 %) durch eingebettete Sensoren und Edge-Computing zu überwachen und zu steuern.

#### **Spezifische Funktionen**

Überwachen Sie das Pulververhältnis (Genauigkeit des Co-Gehalts  $\pm 0,05$  %), die Korngröße (Genauigkeit  $\pm 0,005$   $\mu\text{m}$ ) und die Additivverteilung (Abweichung <0,1 %).

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



Echtzeitanpassung der Sinterparameter: Temperatur (1400–1500 °C, Genauigkeit  $\pm 2$  °C), Vakuumgrad ( $<10^{-2}$  Pa, Genauigkeit  $\pm 10^{-3}$  Pa), Co-Diffusionsrate ( $<10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s, Abweichung  $< 5$  %).

Kontrollieren Sie die Abkühlrate (3–5 °C/min, Abweichung  $< 0,2$  °C/min), um thermische Spannungen ( $< 100$  MPa) und Mikrorisse (Rate  $< 0,5$  %) zu vermeiden.

Überwachen Sie die Haftfestigkeit zwischen den Schichten ( $> 50$  MPa) und vermeiden Sie Delaminationsdefekte (Risslänge  $> 0,05$  mm).

### Fehlervorhersage und Qualitätskontrolle

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss potenzielle Fehlerrisiken im Produktionsprozess (wie etwa Co-Segregation, abnormales Kornwachstum) durch neuronale Netzwerke (wie etwa RNN, LSTM) vorhersagen und im Voraus eingreifen können (Vorhersagezeit  $> 10^3$ -mal).

#### Spezifische Funktionen

$\mu\text{m}$ ) aufgrund der Co-Verteilungsabweichung ( $>1\%$ ) wurde vorhergesagt und die Sinterzeit im Voraus angepasst (1–3 Stunden, Abweichung  $<0,1$  Stunde).

ein abnormales Kornwachstum ( $> 2\text{ }\mu\text{m}$ ) festgestellt und das Wachstum durch Anpassung der VC-Zugabemenge (0,2 % - 0,5 %) gehemmt.

Durch die Kombination von Körperschallsensoren (Frequenzgenauigkeit  $\pm 2$  kHz) und CT-Scans (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm) können Mikrorisse (Länge  $> 0,05$  mm) in Echtzeit erkannt und die Ausfallrate ( $<0,1$  %) gesenkt werden.

Erkennen Sie interlaminaire Spannungskonzentrationen ( $K_t > 1,5$ ) und vermeiden Sie ein Ablösen der Grenzfläche (Tiefe  $> 5\text{ }\mu\text{m}$ ).

### Prozessoptimierung und intelligente Entscheidungsfindung

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss die Parameter des Produktionsprozesses durch genetische Algorithmen (GA) oder bestärkendes Lernen (RL) optimieren, um die Produktionseffizienz (Steigerung um 15–20 %) und die Leistungskonsistenz (Abweichung  $< 2$  %) zu verbessern.

#### Spezifische Funktionen

Das geschichtete Pulververhältnis wurde optimiert (Oberflächen-Co 4 %, Mittelschicht 8 %, Innenschicht 12 %, Abweichung  $<0,1$  %), um die Gleichmäßigkeit der Gradientenstruktur sicherzustellen.

Der Sintertemperaturgradient wurde angepasst (1400 °C für die Oberfläche, 1420 °C für die mittlere Schicht und 1450 °C für die innere Schicht, mit einer Abweichung von  $\pm 2$  °C/cm), um die Co-Diffusion und das Kornwachstum zu kontrollieren.

Optimieren Sie das Additivverhältnis ( $\text{VC} : \text{TaC} : \text{Cr}_3\text{C}_2 = 2 : 1 : 0,5$ , Abweichung  $<0,05$  %), um Härte und Zähigkeit ( $\text{HV } 1700$ ,  $K_{IC} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) zu verbessern.

Durch Prozessdatenanalyse werden die Kugelmahlzeit (20–40 Stunden, Genauigkeit  $\pm 0,5$  Stunden) und die Rotationsgeschwindigkeit (300–500 U/min, Genauigkeit  $\pm 5$  U/min) automatisch angepasst, um die Produktionseffizienz zu verbessern.

### Datenintegration und Zusammenarbeit mehrerer Quellen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss Daten aus mehreren Quellen (Pulvereigenschaften, Sinterparameter, Leistungstestergebnisse) integrieren und eine Zusammenarbeit mehrerer Geräte über ein 5G-Netzwerk und eine Cloud-Plattform erreichen (Verzögerung < 10 ms) .

### Spezifische Funktionen

Sie Daten zur Pulverpartikelgröße (Laserpartikelgrößenanalyse, Abweichung < 0,02  $\mu\text{m}$  ) , Daten zur Sinter Temperatur (Sensorgenauigkeit  $\pm 2^\circ\text{C}$ ) und Leistungstestdaten (Härteabweichung < 2 %). Datenanalyse zur Optimierung der Produktionsparameter (z. B. wird die Co-Diffusionsrate auf  $< 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  geregelt).

Koordinierte Steuerung von Kugelmühle (Geschwindigkeitsgenauigkeit  $\pm 5 \text{ U/min}$ ), Sinterofen (Temperaturabweichung  $< \pm 2^\circ\text{C}$ ) und Detektionsausrüstung (XRD-Spitzenbreitenabweichung < 0,2°).

Erreichen Sie eine linienübergreifende Zusammenarbeit, beispielsweise durch die synchrone Anpassung der Temperaturgradienten mehrerer Sinteröfen (Abweichung  $< \pm 1^\circ\text{C/cm}$ ).

### Intelligente Wartung und adaptive Anpassung

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss die Ausfallzeit von Geräten und Produkten anhand von Daten zum Risswachstum vorhersagen (Fehler < 5 Stunden) und Wartungsstrategien optimieren (Reduzierung der Ausfallzeit um 30–35 %).

### Spezifische Funktionen

Sagen Sie die durch eine Temperaturabweichung im Sinterofen ( $> \pm 10^\circ\text{C}$ ) verursachte Co-Seigerung (Abweichung > 1 %) voraus und passen Sie die Parameter im Voraus an.

Durch die Kombination von Schallemissions- und CT-Daten wird das Ermüdungsversagen von Hartmetall mit Gradientenstruktur im Betrieb vorhergesagt ( $> 10^4$  Mal im Voraus) und der Wartungszyklus optimiert.

Passen Sie Produktionsparameter adaptiv an, z. B. durch Anpassen der VC-Zugabe (Erhöhung um 0,1 %–0,2 %) basierend auf Echtzeit-Härte Daten (HV-Abweichung > 2 %).

Sagen Sie den Geräteverschleiß voraus (z. B. Lebensdauer der Kugelmühlennager, Fehler < 10 Stunden), ersetzen Sie Teile im Voraus und reduzieren Sie Ausfallzeiten.

### Anpassung der Benutzeranforderungen und Feedback-Lernen

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss das Design der Gradientenstruktur entsprechend den Benutzeranforderungen anpassen (z. B. hohe Härte von Schneidwerkzeugen für die Luftfahrt und hohe Zähigkeit von Bohrern für den Bergbau) und durch Feedback-Lernen kontinuierlich optimieren (Leistungsverbesserung von 5 %–10 %).

### Spezifische Funktionen

Entsprechend den Anforderungen an Luftfahrtwerkzeuge (Härte HV > 1700) wurde eine Gradientenstruktur mit 4 % Co an der Oberfläche und einer Korngröße von 0,5  $\mu\text{m}$  entwickelt.

Entsprechend den Anforderungen von Bergbaubohrern ( $K_{1c} > 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) ist die innere Struktur mit 12 % Co und einer Korngröße von 1,5  $\mu\text{m}$  ausgelegt.

Sammeln Sie Anwendungsfeedbackdaten (wie etwa Standzeit, Bohrerverschleißrate) und optimieren Sie den Co-Gehalt und die Kornverteilung durch bestärkendes Lernen (Fehler < 0,1 %).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Je nach Arbeitsbedingungen des Benutzers (z. B. hohe Temperaturen  $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wird eine Oberflächenbeschichtungslösung (z. B. CrN, Dicke  $3\text{ }\mu\text{m}$ ) empfohlen.

### Umweltanpassung und Optimierung des Energieverbrauchs

Fähigkeitsanforderungen: Der KI-Agent muss die Prozessparameter optimieren und den Energieverbrauch (um 10–15 %) basierend auf der Produktionsumgebung (wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit) und den Anforderungen an den Energieverbrauch senken.

### Spezifische Funktionen

Überwachen Sie die Umgebungsfeuchtigkeit ( $< 50\%$ ), um korrosive Effekte zu vermeiden ( $< 5\%$  Anstieg der Verschleißrate).

Optimieren Sie den Energieverbrauch des Sinterofens (Temperaturregelgenauigkeit  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und reduzieren Sie ineffektive Heizzeiten (Einsparung von 5–10 %).

Passen Sie die Betriebsleistung der Geräte entsprechend der Produktionschargengröße an (reduzieren Sie beispielsweise die Kugelmühlengeschwindigkeit für die Produktion kleiner Chargen auf 300 U/min).

### Einflussfaktoren der Gradientenstruktur von Hartmetall

Die Leistung und Herstellung von Gradientenstrukturen werden von folgenden Faktoren beeinflusst:

#### Co-Inhaltsverteilung

Der Co-Gehalt muss in einem angemessenen Bereich gehalten werden (4–6 % an der Oberfläche, 8–10 % in der Mittelschicht und 12–15 % im Inneren). Wenn der Co-Gehalt an der Oberfläche  $< 4\%$  beträgt, ist  $K_{1c} < 8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ; wenn der Co-Gehalt im Inneren  $> 15\%$  beträgt, ist die Härte  $< 1200$ .

#### Korngrößenverteilung

Die Oberflächenkorngröße beträgt  $< 0,5\text{ }\mu\text{m}$ , die mittlere Schicht  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$  und die innere Schicht  $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ . Bei einer Oberflächenkorngröße  $> 1\text{ }\mu\text{m}$  beträgt die Härte  $< 1500$ . Bei einer inneren Korngröße  $< 0,5\text{ }\mu\text{m}$   $K_{1c} < 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

### Sinterprozess

Temperaturabweichungen ( $> \pm 10^{\circ}\text{C}$ ) oder unzureichendes Vakuum ( $> 10^{-2}\text{ Pa}$ ) können zu einer ungleichmäßigen Co-Verteilung (Abweichung  $> 1\%$ ), zur Bildung von Co-Pools (Größe  $> 5\text{ }\mu\text{m}$ ) und zu einer Verringerung der Zähigkeit um 10–15 % führen.

### Zusatzstoff

Zu viel VC ( $> 0,8\%$ ) führt zu einem Sprödphasenanteil von  $> 0,5\%$ , wodurch  $K_{1c}$  reduziert wird; zu wenig TaC ( $< 0,1\%$ ) führt zu einer geringen Korngrenzenfestigkeit ( $< 100\text{ MPa}$ ).

### Gerätegenauigkeit

Eine unzureichende Genauigkeit der Kugelmühlendrehzahl ( $< \pm 5\text{ U/min}$ ) und der Sinterofentemperatur ( $< \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kann zu Korngrößenabweichungen ( $> 0,02\text{ }\mu\text{m}$ ) und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ungleichmäßiger Co-Verteilung (Abweichung >0,5 %) führen.

### Umweltfaktoren

Die Luftfeuchtigkeit der Produktionsumgebung (>80%) kann zu einer Oxidation des Pulvers (O<sub>2</sub>-Gehalt >0,5 ppm) führen und die Stabilität der Gradientenstruktur beeinträchtigen (Härteabweichung >2%).

### Technische Anwendung von Hartmetall mit Gradientenstruktur

Hartmetall mit Gradientenstruktur eignet sich gut für eine Vielzahl anspruchsvoller Szenarien:

Luftfahrtwerkzeuge

Oberflächen-Co 4 %, Härte HV 1700, Innen-Co 12 %, K<sub>1c</sub> 14 MPa·m<sup>1/2</sup>, beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (>800 m/min), Lebensdauer >15 Stunden, eine Steigerung von 25 %, besser als herkömmliches YG8.

Bergbaubohrer

Die Oberflächenkorngröße beträgt 0,5 µm, der innere Co-Gehalt beträgt 12 % und die Lebensdauer beim Bohren in hartem Gestein beträgt >1500 m, eine Steigerung von 50 %, und übertrifft damit herkömmliches YG6.

Tiefseebohrung

Gradientenstruktur (Oberflächen-Co 4 %, mittlere Schicht 8 %, innere Schicht 12 %), bei Tiefsee-Impakt (> 500 Hz, Druck > 80 MPa), K<sub>1c</sub> erreicht 14 MPa·m<sup>1/2</sup>, Bohrtiefe > 1500 m.

Bremsbelagform für Hochgeschwindigkeitszüge

Oberflächenhärte HV 1700, innerer K<sub>1c</sub> 14 MPa·m<sup>1/2</sup>, Lebensdauer >4× 10<sup>5</sup> mal bei Hochtemperaturreibung (>600°C), eine Steigerung von 60 %.

Neuer Energie -Elektrolyseur

Oberflächenzusatz von TiC 5 %, Härte HV 1800, innerer Co 12 %, K<sub>1c</sub> 13 MPa·m<sup>1/2</sup>, bei elektrochemischem Schock (>10<sup>3</sup>-fach), Lebensdauer >10<sup>3</sup> Stunden, eine Steigerung von 40 %.

Form für Windturbinenblätter

Oberfläche Co 4 %, CrN-Beschichtung 3 µm, innen Co 12 %, bei Schlagbelastung bei niedrigen Temperaturen (-60°C, Dehnungsrate > 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>), Schlagenergie > 12 J, Lebensdauer > 10<sup>6</sup>-fach, eine Steigerung von 40 %.

### Vor- und Nachteile von Hartmetall mit Gradientenstruktur

Vorteile:

Härte und Zähigkeit werden synergetisch optimiert, mit einer hervorragenden Gesamtleistung, die herkömmliche Qualitäten übertrifft.

Passen Sie sich an eine Vielzahl rauer Arbeitsbedingungen an und verlängern Sie die Lebensdauer. Intelligente Produktion verbessert Konsistenz und Effizienz.

Nachteile:

Der Herstellungsprozess ist komplex und erfordert hochpräzise Geräte (wie beispielsweise einen Gradientensinterofen mit einer Temperaturgradienten-Regelgenauigkeit von ±2 °C/cm).

Höhere Kosten (15–20 % höher als herkömmliche Sorten).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Der KI-Agent stellt hohe Anforderungen an die Intelligenz und benötigt eine große Menge an Datenunterstützung.

### **Entwicklungstrend von Hartmetall mit Gradientenstruktur**

Mit der eingehenden Entwicklung der intelligenten Fertigung werden die Produktion und Anwendung von Hartmetall mit Gradientenstruktur intelligenter:

### **Tiefe Integration von KI+IIoT**

Durch bestärkendes Lernen und Big-Data-Analyse optimiert AI Agent das Design der Gradientenstruktur (Co-Verteilungsfehler < 0,1 %) und verbessert die Leistungskonsistenz (Abweichung < 0,5 %).

IIoT nutzt 5G-Netzwerke und Cloud-Plattformen, um die Zusammenarbeit mehrerer Geräte zu erreichen (Verzögerung < 10 ms ) und die Produktionseffizienz zu verbessern (> 20 %).

### **Anwendung der 3D-Drucktechnologie**

Mithilfe der 3D-Drucktechnologie (z. B. selektives Laserschmelzen SLM) werden komplexere Gradientenstrukturen (z. B. mehrschichtige, mehrphasige Gradienten) mit Korngrößenabweichungen <0,01 µm und Co-Verteilungsabweichungen <0,1 % erreicht.

### **Neue Gradientenstruktur**

Entwickeln Sie Mehrphasengradienten (wie WC- TiC -Co-Verbundgradienten) und multifunktionale Gradienten (wie Oberflächenkorrosionsbeständigkeit und hohe innere Zähigkeit), um die vielfältigen Anforderungen der Luftfahrt, der Tiefsee, der neuen Energie und anderer Bereiche zu erfüllen.

### **Standardisierung und Förderung**

Legen Sie Leistungsbewertungsstandards für Hartmetall mit Gradientenstruktur fest (z. B. schichtweise Härte- und Zähigkeitsprüfung), um seine breite Anwendung auf dem Weltmarkt zu fördern.

### **Grüne Fertigung**

Nutzen Sie KI, um den Energieverbrauch zu optimieren (um 10–15 % zu senken) und entwickeln Sie recycelbares Hartmetall mit Gradientenstruktur (z. B. geschichtetes Recycling mit Co-Gehalt), um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Hartmetall mit Gradientenstruktur durch die Gradientengestaltung der Mikrostruktur eine synergetische Verbesserung von Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit erzielt und damit die Leistungsgrenzen herkömmlicher Hartmetallsorten überschreitet. Die Einführung des intelligenten Produktionsdesign-Kontrollsystems AI Agent verbessert die Produktionsgenauigkeit und -effizienz weiter, fördert die Entwicklung von Hartmetall hin zu hoher Leistung und Intelligenz und bietet effizientere und zuverlässigere Lösungen für die Luftfahrt, den Bergbau, die erneuerbare Energie und andere Bereiche.

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

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Anhang:

### Verschiedene Konzepte und Funktionen der Hartmetallaufkohlung

Die Aufkohlungstechnologie für Hartmetall (WC-Co) ist ein Verfahren, bei dem Kohlenstoffelemente durch thermochemische Hochtemperaturbehandlung in die Materialoberfläche eingebracht werden, um die Oberflächeneigenschaften zu verbessern. Die Aufkohlungsanwendung bei Hartmetall konzentriert sich hauptsächlich auf die Verbesserung von Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsbeständigkeit bei gleichzeitiger Erhaltung der inneren Zähigkeit. Dieser Artikel erläutert die Natur der Aufkohlung, die Verfahrensform, den Wirkmechanismus, die wichtigsten Einflussfaktoren und die tatsächlichen Anwendungseffekte und zeigt den einzigartigen Nutzen der Aufkohlung für die Optimierung der Hartmetallleistung auf.

#### Das Wesentliche beim Aufkohlen: Oberflächendiffusion und Reaktion von Kohlenstoff

Der Kern der Aufkohlung liegt in der Diffusion und Reaktion von Kohlenstoffatomen bei hohen Temperaturen. Hartmetall besteht aus einer harten Phase aus Wolframkarbid (WC) und einer Bindephase aus Kobalt (Co). Die Co-Phase hat eine hohe Kohlenstofflöslichkeit (etwa 0,2–0,3 Gew.-% bei 900 °C), die zum Hauptkanal für die Kohlenstoffdiffusion wird. Während des Aufkohlungsprozesses werden Kohlenstoffatome aus externen Kohlenstoffquellen (wie  $\text{CH}_4$ , CO oder festem Kohlenstoffpulver) zersetzt, diffundieren durch das Gitter der Co-Phase an die Oberfläche und reagieren dann mit WC, um eine dichtere Karbidstruktur zu bilden oder vorhandene WC-Partikel zu verdicken. Dieser Diffusions-Reaktionsmechanismus bildet einen kohlenstoffreichen Bereich auf der Oberfläche, der sich normalerweise als 10–50 µm dicke WC-reiche Schicht manifestiert.

Die Aufkohlungstemperatur liegt üblicherweise im Bereich von 850–950 °C und damit unter der Sintertemperatur von Hartmetall (1400–1500 °C), um eine Kornvergrößerung oder eine Verschlechterung der Matrixleistung zu vermeiden. Die Kohlenstoffdiffusionsrate ( $\sim 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) bestimmt die Dicke und Qualität der aufgekohlten Schicht und muss durch Temperatur, Kohlenstoffpotenzial und Zeit präzise gesteuert werden.

#### Aufkohlungsprozess: von traditionell bis modern

Der Aufkohlungsprozess kann je nach Kohlenstoffquelle und Energiezufuhrmethode verschiedene Formen annehmen. Jede Form hat unterschiedliche Anwendungsszenarien und Auswirkungen auf Hartmetall:

#### Gasaufkohlen:

Unter Verwendung von Kohlenwasserstoffen (wie  $\text{CH}_4$ ) oder Kohlenmonoxid (CO) als Kohlenstoffquelle wird es in einer kontrollierten Atmosphäre bei 850–950 °C durchgeführt.  $\text{CH}_4$  zersetzt sich in aktive Kohlenstoffatome (C) und  $\text{H}_2$ , und die Kohlenstoffatome diffundieren an die Oberfläche:  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ . Das Gasaufkohlen ist für die Massenproduktion geeignet, mit gleichmäßiger Dicke der aufgekohlten Schicht (10–30 µm) und Härten bis zu HV 2000–2200, aber das Kohlenstoffpotenzial (0,8–1,2 Gew.-%) muss genau

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kontrolliert werden, um eine Über- oder Entkohlung zu vermeiden.

#### **Festkörperaufkohlung:**

Die Hartmetallprobe wird in Kohlenstoffpulver (z. B. Graphit) eingebettet und auf 900–950 °C erhitzt. Durch direkten Kontakt diffundiert der Kohlenstoff. Die Anlage zur Festkörperaufkohlung ist einfach und für Experimente im kleinen Maßstab geeignet. Allerdings ist die Gleichmäßigkeit der aufgekohlten Schicht unzureichend (Dickenabweichung  $\pm 5 \mu\text{m}$ ) und die Effizienz gering.

#### **Plasmaaufkohlen:**

In einer Plasmaumgebung bei 700–900 °C wird ein elektrisches Feld genutzt, um eine Kohlenstoffquelle (z. B.  $\text{CH}_4$ ) zu aktivieren und hochaktive Kohlenstoffionen zu erzeugen. Plasma beschleunigt die Kohlenstoffdiffusion (erhöht auf ca.  $10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ ) und bildet bei niedrigerer Temperatur eine 20–40  $\mu\text{m}$  dicke aufgekohlte Schicht mit einer Härte von HV 2200–2500. Gleichzeitig wird der Energieverbrauch um ca. 20–30 % reduziert.

#### **Laserunterstütztes Aufkohlen:**

Mit einem Laser (Leistung 1–2 kW) wird die Oberfläche lokal erhitzt. In Kombination mit einer Kohlenstoffquelle (z. B. Kohlenstoffpulverbeschichtung) wird eine Aufkohlung erreicht. Das Laseraufkohlen ist schnell (<1 Stunde), die Dicke der aufgekohlten Schicht ist kontrollierbar (5–20  $\mu\text{m}$ ) und eignet sich für Teile mit komplexer Geometrie. Allerdings können in der Wärmeeinflusszone Mikrorisse entstehen.

Diese Verfahrensformen haben jeweils eigene Schwerpunkte. Das Gasaufkohlen eignet sich für die industrielle Produktion, das Plasmaaufkohlen legt Wert auf hohe Effizienz und geringen Verbrauch und das Laseraufkohlen eignet sich für die hochpräzise lokale Verfestigung.

### **Die Rolle des Aufkohlens: Mehrdimensionale Leistungsverbesserung**

Der Einfluss der Aufkohlung auf die Leistungsfähigkeit von Hartmetall ist vielfältig und spiegelt sich hauptsächlich in den folgenden Schlüsseffekten wider:

#### **Verbesserte Härte und Verschleißfestigkeit:**

Die durch Aufkohlung gebildete WC-reiche Schicht (Dicke 10–30  $\mu\text{m}$ ) erhöht die Oberflächenhärte (HV 2000–2500) deutlich und ist damit deutlich höher als die der Matrix (HV 1500–1800). Die hochharte Hartmetallschicht erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen abrasiven Verschleiß und Gleitverschleiß, und die Verschleißrate kann auf  $<0,08 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  reduziert werden. Beispielsweise können aufgekohlte Hartmetallwerkzeuge bei Schneidwerkzeugen höhere Schnittgeschwindigkeiten ( $> 1000 \text{m/min}$ ) aushalten und ihre Lebensdauer um 20–30 % erhöhen.

#### **Verbesserte Korrosionsbeständigkeit:**

Die WC-reiche Schicht reduziert die Freilegung der Co-Phase und verbessert die Oberflächenstabilität in sauren ( $\text{pH} < 5$ ) oder oxidierenden Umgebungen ( $> 600^\circ\text{C}$ ). Nach dem Aufkohlen kann sich auf der Oberfläche der Co-Phase eine dünne Schicht aus  $\text{Co}_3\text{C}$  oder  $\text{Co}_2\text{C}$  bilden, die die Korrosionsreaktion zusätzlich hemmt und die Lebensdauer des Materials unter korrosiven Bedingungen (z. B. Tiefseeventilen) verlängert.

#### **Verbesserte Ermüdungsbeständigkeit:**

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



Die durch das Aufkohlen eingebrachte Druckeigenspannung ( $> 400 \text{ MPa}$ ) entsteht durch Volumenausdehnung. Dies hemmt wirksam die Entstehung und Ausbreitung von Oberflächenrissen und erhöht die Lebensdauer um das Zehnfache. Insbesondere bei hohen Lastzyklen (z. B. bei Flugzeugwerkzeugen) verbessert die aufgekohlte Schicht die Zuverlässigkeit deutlich.

#### **Optimierung der Mikrostruktur:**

Beim Aufkohlen werden Kohlenstoffatome in das WC-Gitter oder in verdickte Carbidpartikel eingebettet, die Bindungsfestigkeit an den Korngrenzen erhöht ( $> 150 \text{ MPa}$ ) und die Neigung zu intergranularen Brüchen verringert. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Bruchoberfläche nach dem Aufkohlen hauptsächlich aus kleinen Grübchen ( $< 1 \mu\text{m}$ ) besteht, was darauf hindeutet, dass der Anteil plastischer Brüche zugenommen hat.

#### **Verbesserte thermische Stabilität: Die**

aufgekohlte Schicht verbessert die Beständigkeit der Oberfläche gegenüber Erweichung bei hohen Temperaturen und kann bei  $600\text{--}800^\circ\text{C}$  eine hohe Härte ( $> 1800 \text{ HV}$ ) beibehalten, wodurch sie für Schneid- oder Stanzwerkzeuganwendungen bei hohen Temperaturen geeignet ist.

Es ist zu beachten, dass sich das Aufkohlen nicht auf alle Eigenschaften positiv auswirkt. Eine zu dicke Aufkohlungsschicht ( $> 50 \mu\text{m}$ ) kann die Oberflächensprödigkeit erhöhen und die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) um  $5\text{--}10\%$  verringern. Um Härte und Zähigkeit in Einklang zu bringen, ist eine Prozessoptimierung erforderlich.

#### **Wichtige Einflussfaktoren: zentrale Kontrollpunkte zur Leistungsoptimierung**

Der Aufkohlungseffekt wird durch das Zusammenspiel von Prozessparametern, Werkstoffeigenschaften und äußeren Bedingungen beeinflusst. Die wichtigsten Faktoren sind:

##### **Temperatur und Zeit:**

Die optimale Temperatur liegt bei  $850\text{--}950^\circ\text{C}$ . Die Dicke der aufgekohlten Schicht nimmt linear mit der Zeit ( $2\text{--}10$  Stunden) zu (Dicke  $10\text{--}50 \mu\text{m}$ ). Zu hohe Temperaturen ( $> 1000^\circ\text{C}$ ) führen zur Erweichung der Co-Phase oder zur Vergrößerung der Körner ( $> 2 \mu\text{m}$ ), wodurch die Härte um  $15\text{--}20\%$  sinkt. Zu lange Temperaturen ( $> 12$  Stunden) können zu innerer Entkohlung führen und die Matrixleistung beeinträchtigen.

##### **Kontrolle des Kohlenstoffpotenzials:**

Das Kohlenstoffpotenzial (Kohlenstoffgehalt) muss bei  $0,8\text{--}1,2 \text{ Gew.}\%$  gehalten werden. Ist es zu niedrig ( $< 0,6 \text{ Gew.}\%$ ), ist die Aufkohlungsschicht unvollständig und die Härte unzureichend. Ist es zu hoch ( $> 1,5 \text{ Gew.}\%$ ), bildet sich eine Überkohlungsschicht (z. B. freier Kohlenstoff), die die Sprödigkeit erhöht.

##### **Mikrostruktur des Materials:**

Co-Gehalt: Ein Co-Gehalt von  $8\text{--}12\%$  bietet den besten Kohlenstoffdiffusionskanal. Ein zu niedriger Co-Gehalt ( $< 6\%$ ) begrenzt die Kohlenstoffdiffusion, ein zu hoher Co-Gehalt ( $> 15\%$ ) führt zu einer Erweichung der Oberfläche.

WC-Korngröße: Wenn die Korngröße  $< 0,5 \mu\text{m}$  ist, ist die Bindungsstärke der aufgekohlten Schicht stark und die Härte nimmt deutlich zu; wenn die Korngröße  $> 2 \mu\text{m}$  ist, ist die Kohlenstoffdiffusion ungleichmäßig und die Härte nimmt um  $< 10\%$  zu.

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

### **Oberflächenbeschaffenheit:**

Eine anfängliche Rauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  gewährleistet eine feste Haftung der aufgekohlten Schicht; bei einer Rauheit  $> 0,2 \mu\text{m}$  können Defekte in der aufgekohlten Schicht auftreten und die Verschleißrate steigt um 15–20 %.

### **Nachbehandlungsbedingungen:**

Durch Anlassen bei niedriger Temperatur (200–400 °C, 1–2 Stunden) nach dem Aufkohlen können Restspannungen ( $< 100 \text{ MPa}$ ) freigesetzt werden. Wenn die Temperatur jedoch zu hoch ist ( $> 500 \text{ °C}$ ), nimmt die Härte der aufgekohlten Schicht ab.

### **Praktische Anwendungseffekte: Vom Labor in die Ingenieurpraxis**

Die Anwendung der Aufkohlungstechnologie im Bereich Hartmetall ist relativ ausgereift und ihre tatsächliche Wirkung wurde in vielen technischen Szenarien nachgewiesen:

Schneidwerkzeuge:

WC-10Co-Werkzeuge sind aufgekohlt (Aufkohlungsschicht  $20 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000). Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden ( $> 1000 \text{ m/min}$ ) erhöht sich die Standzeit um 25 % und die Schneidleistung um 20 %. Geeignet für die Bearbeitung von Aluminiumlegierungen in der Luftfahrt.

Bergbau-Bohrer: Nach dem Aufkohlen des

WC-8Co-Bohrers ( $15 \mu\text{m}$  Aufkohlungsschicht) wird die Verschleißrate auf  $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  reduziert, die Bohrdistanz auf  $> 1500 \text{ m}$  verlängert, die Effizienz um 50 % erhöht und die Bergbaukosten erheblich gesenkt.

Stanzform:

WC-12Co-Matrizenaufkohlung (Aufkohlungsschicht  $30 \mu\text{m}$ , Härte  $> 2200$ ), Extrusionszeiten  $> 10^6$ -mal, um 25 % erhöht, um den Hochfrequenz-Stanzanforderungen gerecht zu werden.

Tiefseeausrüstung: Die Lebensdauer von

WC-10Co-Tiefseeventilen ( $25 \mu\text{m}$  Permeationsschicht) wird bei hohem Druck ( $> 80 \text{ MPa}$ ) und korrosiver Umgebung ( $\text{pH} < 5$ ) auf  $> 4$  Jahre verlängert, eine Steigerung von 40 %, was eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit zeigt.

### **Grenzen und Verbesserungsrichtungen der Aufkohlungstechnologie**

Obwohl die Aufkohlungstechnologie die Leistung von Hartmetall deutlich verbessert hat, bestehen weiterhin folgende Einschränkungen:

Sprödigkeitsrisiko: Eine zu dicke aufgekohlte Schicht ( $> 50 \mu\text{m}$ ) kann zu einer Versprödung der Oberfläche führen, wodurch  $K_{1c}$  um 5–10 % reduziert wird und Anwendungen mit dynamischer Belastung eingeschränkt werden.

Prozesskomplexität: Die Kontrolle des Kohlenstoffpotenzials ist schwierig und erfordert hochpräzise Geräte (Temperaturabweichung  $\pm 5 \text{ °C}$ ), was die Produktionskosten erhöht (ca. 15–20 %).

Tiefenbegrenzung: Die Aufkohlungstiefe beträgt üblicherweise  $< 50 \mu\text{m}$ , was den Anforderungen einer Tiefenverstärkung nicht gerecht wird.

Zu den Verbesserungen gehören:

Verbundverstärkung: Kombination von Aufkohlungs- und Beschichtungstechnologie (z. B. TiN-

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

Beschichtung) zur Bildung einer Gradientenstruktur und Verbesserung der Leistung tiefer Schichten.  
Intelligente Steuerung: Entwickeln Sie ein intelligentes Aufkohlungssystem, um das Kohlenstoffpotenzial und die Dicke der Aufkohlungsschicht in Echtzeit über Sensoren zu überwachen und so die Prozessstabilität zu verbessern.

Kostengünstige Kohlenstoffquellen: Erkunden Sie Biokohle oder Kohlenstoffquellen aus der Abgasrückgewinnung, um Kosten zu senken und die Nachhaltigkeit zu verbessern.

Durch Oberflächendiffusion und Reaktion von Kohlenstoffelementen bildet die Hartmetall-Aufkohlungstechnologie eine hochharte, WC-angereicherte Schicht, die Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsbeständigkeit deutlich verbessert. Verschiedene Verfahrensformen (wie Gasaufkohlung und Plasmaaufkohlung) bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, deren Wirkung durch die Regulierung von Temperatur, Kohlenstoffpotenzial und Mikrostruktur optimiert wird. Trotz der Herausforderungen hinsichtlich Sprödigkeit und Kosten hat die Aufkohlungstechnologie großes Potenzial für Schneidwerkzeuge, Bergbau und Tiefseeausrüstung gezeigt und wird voraussichtlich durch Verbundverstärkung und intelligente Entwicklung künftig weitere Einschränkungen überwinden.

**Vergleichstabelle verschiedener Konzepte und Funktionen der Hartmetallaufkohlung**

| Projekt                                 | Unbeabsichtigte Aufkohlung (schlechte Kohlenstoffkontrolle während der Produktion)                                                                                                                                                                                             | Prozessaufkohlung (Prozess zur Leistungsverbesserung von Hartlegierungen)                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Definition und Essenz                   | Aufgrund eines unkontrollierten Kohlenstoffpotenzials oder von Schwankungen im Kohlenstoffgehalt der Rohstoffe während des Produktionsprozesses (z. B. Sintern) diffundieren Kohlenstoffatome versehentlich an die Oberfläche und bilden eine unerwartete aufgekohlte Schicht. | Bei einem thermochemischen Behandlungsverfahren bei hohen Temperaturen werden Kohlenstoffelemente in die Oberfläche des Hartmetalls eingebracht, um durch die präzise Steuerung der Kohlenstoffquelle, der Temperatur und der Zeit die Leistung zu optimieren.  |
| Prozessformular                         | – Tritt bei Produktionsvorgängen wie Sintern ohne spezielle Prozesskontrolle auf.<br>– Kohlenstoffquelle : Überschüssiger Kohlenstoff in der Atmosphäre (z. B. $\text{CH}_4$ -Zersetzung) .<br>– Temperatur: Sintertemperatur (1300–1500 °C).                                  | – Gasaufkohlen: $\text{CH}_4$ oder $\text{CO}$ , 850–950 °C. – Feststoffaufkohlen: Kontakt mit Kohlenstoffpulver, 900–950 °C. – Plasmaaufkohlen: $\text{CH}_4$ -Plasmaaktivierung, 700–900 °C. – Laserunterstütztes Aufkohlen: Lasererwärmung, Leistung 1–2 kW. |
| Eigenschaften der durchlässigen Schicht | – Dicke: 5–60 $\mu\text{m}$ , ungleichmäßig. – Härte: HV 1800–2200, große Schwankungen (Abweichung $\pm 200$ HV). – Kann mit freiem Kohlenstoff oder Entkohlung einhergehen.                                                                                                   | – Dicke: 10–30 $\mu\text{m}$ , gleichmäßig. – Härte: HV 2000–2500, stabil (Abweichung $< \pm 50$ HV). – WC-reiche Schicht ist dicht.                                                                                                                            |
| Härte und Verschleißfestigkeit          | - Härte auf HV 1800-2200 erhöht, aber ungleichmäßige Verteilung. - Verschleißfestigkeit verbessert, Verschleißrate $< 0,1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ , aber lokale Überkarbonisierung mindert den Effekt.                                                           | - Härte auf HV 2000–2500 erhöht, gleichmäßig. - Verschleißfestigkeit deutlich verbessert, Verschleißrate $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ , geeignet für hochbelastete Reibungsszenarien.                                                          |
| Korrosionsbeständigkeit                 | - Die aufgekohlte Schicht ist ungleichmäßig, durch                                                                                                                                                                                                                             | - Die WC-reiche Schicht verringert die Freilegung der Co-                                                                                                                                                                                                       |

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

|                                   |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projekt                           | Unbeabsichtigte Aufkohlung (schlechte Kohlenstoffkontrolle während der Produktion)                                                                                                                       | Prozessaufkohlung (Prozess zur Leistungsverbesserung von Hartlegierungen)                                                                                                                   |
|                                   | lokale Überaufkohlung entsteht freier Kohlenstoff, der leicht löslich ist, die Co-Phase ist stärker freigelegt und die Korrosionsbeständigkeit nimmt ab (z. B. in einer Umgebung mit einem pH-Wert < 5). | Phase, verbessert die Korrosionsbeständigkeit und ist für saure (pH-Wert < 5) oder oxidative Hochtemperaturumgebungen (> 600 °C) geeignet.                                                  |
| Anti-Ermüdungsleistung            | - Ungleichmäßige Eigenspannungen (lokal <200 MPa) können zu Mikrorissen führen und die Lebensdauer verkürzen (<10 <sup>4</sup> -mal).                                                                    | - Druckeigenspannung >400 MPa, Lebensdauer auf >10 <sup>5</sup> -fach erhöht, geeignet für Belastungsszenarien mit hoher Zyklenzahl.                                                        |
| Mikrostruktur                     | - Die Korngrenzenbindungsfestigkeit ist ungleichmäßig (lokal <100 MPa), der Anteil intergranularer Brüche ist hoch (>50%) und die strukturelle Stabilität ist schlecht.                                  | - Die Korngrenzenbindungsfestigkeit ist erhöht (> 150 MPa), der Bruch besteht hauptsächlich aus Grübchen (< 1 μm), Plastizität und Sprödigkeit sind ausgewogen und die Struktur ist stabil. |
| Thermische Stabilität             | - Lokale Überkarbonisierung führt zu einer ungleichmäßigen thermischen Stabilität und einem deutlichen Härteabfall (<1500 HV) bei hohen Temperaturen (>600°C).                                           | - Die aufgekohlte Schicht behält eine Härte von >1800 HV bei 600–800 °C und ist für Schneid- oder Stanzwerkzeuganwendungen bei hohen Temperaturen geeignet.                                 |
| Bruchzähigkeit (K <sub>IC</sub> ) | - Eine zu dicke (> 50 μm) oder zu große aufgekohlte Schicht führt zu erhöhter Sprödigkeit und einer Verringerung des K <sub>IC</sub> -Wertes um 10–20 % (< 10 MPa·m <sup>1/2</sup> ).                    | - Mäßig aufgekohlte Schichten (<30 μm) sind durch die Co-Phase mit Kohlenstoff gesättigt, wodurch K <sub>IC</sub> um 5–10 % (10–14 MPa·m <sup>1/2</sup> ) ansteigt.                         |
| Temperatur und Zeit               | - Temperatur: 1300–1500 °C (Sintertemperatur), die Zeit ist nicht kontrollierbar und kann zu lang sein (> 10 Stunden), was zu einer Überkohlung oder Entkohlung führt.                                   | - Temperatur: 850-950°C, Zeit 2-10 Stunden, Dicke der Diffusionsschicht 10-50 μm, präzise Steuerung.                                                                                        |
| Kohlenstoffpotenzial              | - Unkontrolliertes Kohlenstoffpotenzial (>1,5 Gew.-% oder <0,6 Gew.-%), was zu unvollständigen oder überkohlten Fällen führt.                                                                            | - Kohlenstoffpotenzial 0,8–1,2 Gew.-%, präzise geregelt durch Massendurchflussregler, um eine gleichmäßige Aufkohlungsschicht zu gewährleisten.                                             |
| Co-Inhalt                         | - Schwankungen im Co-Gehalt beeinflussen die Kohlenstoffdiffusion, <6 % führen zu eingeschränkter Diffusion, >15 % führen zur Erweichung.                                                                | - 8 %–12 % bieten den besten Diffusionskanal mit einem Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Härte.                                                                                          |
| WC-Korngröße                      | einer Korngröße >2 μm ist die Kohlenstoffdiffusion ungleichmäßig und die Leistung schwankt stark.                                                                                                        | einer Korngröße <0,5 μm ist die Bindungsstärke der aufgekohlten Schicht hoch und die Härte steigt deutlich an (>10 %).                                                                      |
| Oberflächenzustand                | - Der Oberflächenzustand wird nicht kontrolliert, Ra schwankt stark, was die Haftung der aufgekohlten Schicht beeinträchtigen kann.                                                                      | - Das Polieren auf Ra <0,1 μm gewährleistet eine feste Haftung der aufgekohlten Schicht und reduziert die Verschleißrate um 15–20 %.                                                        |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Projekt                                 | Unbeabsichtigte Aufkohlung (schlechte Kohlenstoffkontrolle während der Produktion)                                                                                                                                                                 | Prozessaufkohlung (Prozess zur Leistungsverbesserung von Hartlegierungen)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Kontrollierbarkeit und Wiederholbarkeit | - Unkontrollierbare, große Leistungsunterschiede zwischen den Chargen (Abweichung > 20%).                                                                                                                                                          | - Steuerbar, Chargenabweichung <5 %, stabile Leistung.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Positiver Fall                          | - Nicht zutreffend, wird normalerweise als Herstellungsfehler angesehen.                                                                                                                                                                           | <p>µm Infiltrationsschicht , HV 2000), Lebenserwartung um 25 % erhöht. - Bergbaubohrer: WC-8Co (15 µm Infiltrationsschicht), Bohrdistanz &gt; 1500 m, um 50 % erhöht.</p> <p>- Stanzmatrizen: WC-12Co (30 µm Infiltrationsschicht) , Extrusionszeiten &gt; 10<sup>6</sup>-fach, um 25 % erhöht. - Tiefseeausrüstung: WC-10Co (25 µm Infiltrationsschicht) , Lebenserwartung &gt; 4 Jahre, um 40 % erhöht.</p> |
| Negative Fälle                          | - Eine Charge von WC-10Co-Bohren hatte ein hohes Kohlenstoffpotenzial (>1,5 Gew.- %), eine aufgekohlte Schicht von 60 µm , einen $K_{IC} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ und einen vorzeitigen Bruch (Lebensdauer < 10 <sup>4</sup> -mal) . | - Nicht zutreffend. Durch Prozessaufkohlen kann dieses Problem vermieden werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Verbesserungsrichtung                   | - Den Kohlenstoffgehalt der Rohstoffe optimieren (Abweichung < 0,1 Gew.- %), die Atmosphärenkontrolle verbessern und eine unbeabsichtigte Aufkohlung verringern.                                                                                   | -Das intelligente Aufkohlungssystem überwacht das Kohlenstoffpotenzial in Echtzeit und kombiniert Beschichtungstechnologie, um eine Gradientenstruktur zu bilden und so die Leistung tiefer Schichten 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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Anhang:**

**Aufkohlen und Entkohlen von Hartmetall**

Hartmetall (hauptsächlich bestehend aus Wolframkarbid (WC) und Bindephasen wie Co und Ni, mit einem WC-Gehalt von 8594 Gewichtsprozent und einer Bindephase von 615 Gewichtsprozent) wird aufgrund seiner hohen Härte (1400–2200 HV), hohen Festigkeit (1,82,8 GPa) und ausgezeichneten Verschleißfestigkeit häufig in Spitzhacken, Werkzeugen, Dichtungen und Formen für den Bergbau verwendet. Aufkohlen und Entkohlen sind zwei Schlüsselprozesse zur Regulierung des Kohlenstoffgehalts bei der Herstellung und Verwendung von Hartmetall, die sich direkt auf die Mikrostruktur, Leistung und Lebensdauer des Materials auswirken. Durch Aufkohlen wird Kohlenstoff in die Oberfläche des Hartmetalls eingebracht, um die Oberflächenhärte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu verbessern; Entkohlen führt zu Leistungseinbußen durch Kohlenstoffverlust und wird häufig vermieden.

Dieser Artikel kombiniert nationale Standards (wie GB/T 183762014, GB/T 51692013) mit Branchenpraktiken, geht ausführlich auf den Aufkohlungs- und Entkohlungsmechanismus, den Prozess, den Einfluss und die Kontrollmaßnahmen von Hartmetall ein und empfiehlt maßvoll die Fähigkeiten der CTIA GROUP LTD zur Optimierung des Aufkohlungsprozesses und zur Entkohlungskontrolle.

**1. Aufkohlen von Hartmetall**

**1.1 Definition und Mechanismus der Aufkohlung**

Beim Aufkohlen handelt es sich um den Vorgang, bei dem Kohlenstoffatome durch eine Hochtemperaturatmosphäre (wie C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) oder eine feste Kohlenstoffquelle (wie Graphit) auf der Oberfläche oder im oberflächennahen Bereich von Hartmetall in das Material diffundieren, um eine kohlenstoffreiche Phase (wie WC oder  $\eta$ -Phase) zu bilden und dadurch die Oberflächenhärte (Erhöhung um 1020 %), die Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust um 2030 % reduziert) und die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr) zu verbessern.

**Aufkohlungsmechanismus:**

Kohlenstoffdiffusion: Kohlenstoffatome diffundieren bei hohen Temperaturen (1000–1200 °C) mit einem Diffusionskoeffizienten  $D \approx 10^{-12} \text{ } 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  durch WC-Korngrenzen und die Co-Phase.

**Bildung einer aufgekohlten Phase:**

Bereich mit niedrigem Kohlenstoffgehalt: Kohlenstoff reagiert mit W zu WC (Härte 2000–2200 HV), wodurch die Verschleißfestigkeit erhöht wird.

Bereich mit hohem Kohlenstoffgehalt: Überschüssiger Kohlenstoff kann die  $\eta$ -Phase bilden (wie Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C, Härte >2500 HV, hohe Sprödigkeit).

Oberflächenmodifizierung: Die aufgekohlte Schicht (0,11 mm) bildet eine Gradientenstruktur mit einer Härte, die von der Oberfläche (2000–2200 HV) bis zum Kern (1400–1600 HV) variiert.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### **Aufkohlungszweck:**

Verbessert die Oberflächenhärte (bis zu 1015 %) und die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h, ASTM G65).

Verbesserte Korrosionsbeständigkeit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>S <0,01 mm/Jahr, NACE MR0175).

Formgradientenleistung, Ausgleich von Oberflächenverschleißfestigkeit und Kernzähigkeit (KIC 1215 MPa·m<sup>1/2</sup>).

## **1.2 Aufkohlungsprozess**

### **Dampfaufkohlen:**

Führen Sie ein Kohlenstoffquellengas (wie C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) in einen Vakuumofen oder Atmosphärenofen ein.

Ausstattung: Vakuum-Sinterofen (10<sup>-2</sup>–10<sup>-3</sup> Pa, Molybdän-Heizelemente).

Parameter:

Temperatur: 1000–1200 °C (WC-Körner sind stabil und die Co-Phase verflüssigt sich nicht).

Gas: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Reinheit > 99,9 %), Durchflussrate 510 l/min, Druck 10<sup>2</sup>–10<sup>3</sup> Pa.

Zeit: 13 Stunden (aufgekohlte Schicht 0,10,5 mm).

Atmosphäre: H<sub>2</sub> (510 l/min, um Oxidation zu verhindern), O<sub>2</sub> <5 ppm.

Ergebnis:

Dicke der aufgekohlten Schicht: 0,2–0,5 mm, Härte 2000–2200 HV.

Kohlenstoffgehalt: Oberflächenzunahme 0,51 Gew.-%, Korngröße 0,52 µm.

Porosität: <0,01 % (GB/T 51692013).

Anwendung: Bergbau-Meißel (Oberflächenverschleißfestigkeit um 20 % erhöht), Schneidwerkzeuge (Schnittlebensdauer um 30 % erhöht).

### **Festphasenaufkohlen:**

Methode: Legen Sie das Hartmetall in Graphitpulver oder Ruß und erhitzen Sie es bei hoher Temperatur.

Ausrüstung: Hochtemperaturofen (Ar-Schutz, 10<sup>-2</sup> Pa).

Parameter:

Temperatur: 1100–1300 °C.

Kohlenstoffquelle: Graphitpulver (D50 15 µm, Reinheit > 99,9 %), Füllgrad 80–90 %.

Zeit: 24 Stunden (aufgekohlte Schicht 0,51 mm).

Atmosphäre: Argon (Flussrate 5 l/min, O<sub>2</sub> <10 ppm).

Ergebnis:

Dicke der aufgekohlten Schicht: 0,51 mm, Härte 1900–2100 HV.

Kohlenstoffgehalt: Oberflächenzunahme 0,81,5 Gew.-%, η-Phase kann auftreten.

Haftung: >80 N (Kratztest).

Anwendungen: Formen (Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht), Dichtungen (Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht).

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

### Plasmaaufkohlen:

Methode: Plasmaentladung erhöht die Aktivität von Kohlenstoffatomen und beschleunigt ihre Diffusion.

Ausrüstung: Plasmaaufkohlungs-ofen (Glimmentladung,  $10^{-1}$ – $10^0$  Pa).

Parameter:

Temperatur: 800–1000 °C (niedrige Temperatur, schützt das Substrat).

Gas: CH<sub>4</sub> (50 %) + H<sub>2</sub> (50 %), Durchflussrate 1020 sccm.

Spannung: 500–800 V, Stromdichte 12 mA/cm<sup>2</sup>.

Zeit: 12 Stunden (aufgekohlte Schicht 0,10,3 mm).

Ergebnis:

Dicke der aufgekohlten Schicht: 0,10,3 mm, Härte 2100–2300 HV.

Kohlenstoffgehalt: Oberflächenzunahme von 0,30,8 Gew.-%, Kornstabilität.

Porosität: <0,001 % (hohe Dichte).

Anwendungen: Präzisionswerkzeuge (um 10 % erhöhte Schnittgenauigkeit), Tiefseedichtungen (H<sub>2</sub>S-Beständigkeit <0,005 mm/Jahr).

### 1.3 Wirkung der Aufkohlung

#### Vorteile des Aufkohlens:

Verbesserte Härte: Oberflächenhärte um 1015 % erhöht (2000–2200 HV), Verschleißfestigkeit um 2030 % erhöht (Verschleißverlust < 0,05 mm<sup>3</sup>/h).

Verbesserte Korrosionsbeständigkeit: Die aufgekohlte Schicht ist dicht und die Korrosionsrate von H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>S beträgt <0,01 mm/Jahr.

Längere Lebensdauer: Die Lebensdauer der Spitzmeißel erhöht sich um 3050 % (1000–1500 Stunden) und die Schnittlebensdauer des Werkzeugs erhöht sich um 2030 %.

#### Nachteile des Aufkohlens:

η-Phasenrisiko: Überschüssiger Kohlenstoff bildet Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C (Härte > 2500 HV, KIC <8 MPa·m<sup>1/2</sup>), wodurch die Sprödigkeit zunimmt und die Bruchwahrscheinlichkeit um 1020 % steigt.

Schwierigkeiten bei der Prozesskontrolle: Eine Abweichung des Kohlenstoffgehalts von > ±0,2 Gew.-% kann zu ungleichmäßiger Leistung führen.

Kostensteigerung: Aufkohlungs-ausrüstung (501 Millionen Yuan/Einheit) und Gaskosten (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 1020 Yuan/m<sup>3</sup>).

### 1.4 Aufkohlungsfall

Bergbaumeißel: WC+8%Co (Ø 20 mm), Dampfaufkohlen (1100 °C, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 5 L/min, 2 Stunden), Oberflächenhärte 2100 HV, Verschleiß <0,05 mm<sup>3</sup>/h, Lebensdauer 1200 Stunden (600 Stunden für gewöhnliche Meißel).

Schneidwerkzeug: WC+6%Co (Ø 12 mm), Plasmaaufkohlen (900°C, CH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>, 1,5 Stunden), aufgekohlte Schicht 0,2 mm, Härte 2200 HV, Schnittlebensdauer der Ti-Legierung um 30 % erhöht.

Dichtung: YN10 (WC+10 % Ni, Ø 50 mm), Festphasenaufkohlung (1200 °C, Graphitpulver, 3

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Stunden), H<sub>2</sub>S-Korrosionsbeständigkeitsrate <0,005 mm/Jahr, Lebensdauer >1000 Verbindungen.

## 2. Entkohlung von Hartmetall

### 2.1 Definition und Mechanismus der Dekarbonisierung

Entkohlung ist der Prozess des Sinterns, der Wärmebehandlung oder der Verwendung von Hartmetall bei hohen Temperaturen, bei dem der Kohlenstoffgehalt auf der Oberfläche oder im Ganzen aufgrund von Kohlenstoffverlust (Reaktion mit O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> oder Verflüchtigung) reduziert wird und eine kohlenstoffarme Phase (wie W<sub>2</sub>C, Anreicherung der Co-Phase) entsteht, wodurch die Härte (Reduktion um 1020 %), die Verschleißfestigkeit und die Festigkeit reduziert werden.

#### Dekarbonisierungsmechanismus:

Kohlenstoffoxidation: Bei hohen Temperaturen (> 800 °C) reagiert Kohlenstoff mit O<sub>2</sub> zu CO/CO<sub>2</sub> und WC zersetzt sich zu W<sub>2</sub>C (Härte 1600–1800 HV, geringe Verschleißfestigkeit).

Reaktion:  $2WC + O_2 \rightarrow W_2C + CO_2$ .

Kohlenstoffverflüchtigung: Beim Vakuumsintern ( $10^{-4}$  Pa, >1400°C) geht Kohlenstoff in gasförmiger Form (C, CO) verloren.

Co-Phasenanreicherung: Nach dem Kohlenstoffverlust erhöht sich der Anteil der Co-Phase (>20 Gew.-%) und es bildet sich eine Erweichungsschicht (Härte <1000 HV).

Niedrigkohlenstoffphase: W<sub>2</sub>C (hohe Sprödigkeit, KIC <8 MPa·m<sup>1/2</sup>) oder freies W (Härte <1200 HV), verringert die Verschleißfestigkeit.

Was geschieht:

Sintern: Unzureichende Entwachsung (O<sub>2</sub> >10 ppm), Hochtemperaturoxidation.

Wärmebehandlung: Unsachgemäße Atmosphärenkontrolle (überschüssiger H<sub>2</sub>-Gehalt, O<sub>2</sub>-Leckage).

Verwendung: Schneiden bei hohen Temperaturen (> 1000 °C, Lufteinwirkung) oder in korrosiver Umgebung (durch H<sub>2</sub>S verursachter Kohlenstoffverlust).

### 2.2 Dekarbonisierung (unbeabsichtigt)

Zustand:

Temperatur: >800°C (Sintern 1350–1450°C, Wärmebehandlung 1000–1200°C).

Atmosphäre: O<sub>2</sub> (>10 ppm), H<sub>2</sub> (Flussrate >20 l/min, um die C-Verflüchtigung herbeizuführen).

Vakuumgrad: > $10^{-2}$  Pa (Kohlenstoffgasverlust).

Zeit: >1 Stunde (entkohlte Schicht 0,10,5 mm).

Ergebnis:

Entkohlte Schichtdicke: 0,11 mm, Härte sinkt auf 1000–1600 HV.

Kohlenstoffgehalt: Oberfläche um 0,52 Gew.-% verringert, W<sub>2</sub>C-Verhältnis um 1030 % erhöht.

Porosität: um 0,010,05 % erhöht (Mikrorisse).

Leistung: Verschleißfestigkeit um 2050 % verringert (Verschleißrate > 0,1 mm<sup>3</sup>/h),

Bruchwahrscheinlichkeit um 2030 % erhöht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.3 Auswirkungen der Dekarbonisierung

### Nachteile der Dekarbonisierung:

Härtereduzierung: Die Oberflächenhärte verringert sich um 1020 % (1000–1600 HV), die Verschleißfestigkeit verringert sich um 2050 %.

Reduzierte Festigkeit: W2C ist hochgradig spröde, mit einer um 1015 % verringerten Biegefestigkeit (<2 GPa) und einer um 2030 % erhöhten Bruchwahrscheinlichkeit.

Verschlechterung der Korrosionsbeständigkeit: Die Entkohlungsschicht ist lose und die Korrosionsrate erhöht sich um 50–100 % ( $\text{H}_2\text{SO}_4 > 0,05 \text{ mm/Jahr}$ ).

Verkürzte Lebensdauer: Die Lebensdauer der Spitzhacke verringert sich um 3050 % (<500 Stunden) und die Schneidleistung des Werkzeugs verringert sich um 20 %.

### Fall der Dekarbonisierung:

Meißelversagen: WC+10%Co ( $\varnothing 20 \text{ mm}$ ), gesintert (1450°C, O<sub>2</sub> 20 ppm), Randentkohlungsschicht 0,3 mm, Härte 1400 HV, Verschleiß 0,15 mm<sup>3</sup> / h, Lebensdauer 400 Stunden (normal 800 Stunden).

Werkzeugverschleiß: WC+6%Co ( $\varnothing 12 \text{ mm}$ ), Hochtemperaturschneiden (1000 °C, Luft), Entkohlungsschicht 0,2 mm, W2C-Verhältnis 20 %, Schnittlebensdauer um 30 % reduziert.

## 2.4 Dekarbonisierungskontrolle

### Atmosphärenoptimierung:

H<sub>2</sub>-Kontrolle: Durchflussrate 515 l/min (Entwachsen/Sintern), O<sub>2</sub> <5 ppm, um eine C-Verflüchtigung zu verhindern.

Ar-Schutz: Während des Sinterns/der Wärmebehandlung beträgt die Ar-Flussrate 510 l/min, O<sub>2</sub> <10 ppm.

Vakuumgrad:  $10^{-4} \text{ } 10^{-5} \text{ Pa}$ , um den Kohlendioxidverlust zu verringern.

### Entparaffinierungsoptimierung:

Temperatur: 200–600 °C, Heizrate 3 °C/min, H<sub>2</sub> 10 l/min.

Ergebnisse: Restkohlenstoff <0,05 %, O<sub>2</sub> <5 ppm, entkohlte Schicht <0,01 mm.

### Sinteroptimierung:

Temperatur: 1350–1450 °C, Temperaturregelung  $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ , Überbrennen vermeiden.

HIP: 1350 °C, 120 MPa (Ar), Porosität <0,001 %, unterdrücktes W2C.

### Erkennung und Reparatur:

Prüfung: SEM (W2C-Verhältnis <5 %), XPS (Abweichung des Kohlenstoffgehalts  $\leq \pm 0,1 \text{ Gew. } \%$ ).

Reparatur: Aufkohlen (1100 °C, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 5 L/min, 1 Stunde), wiederhergestellte Härte 2000 HV.

Beispiel: WC+8%Co-Pick ( $\varnothing 20 \text{ mm}$ ), optimiertes Sintern (1350°C,  $10^{-5} \text{ Pa}$ , H<sub>2</sub> 10 L/min), keine entkohlte Schicht, Härte 2000 HV, Lebensdauer 1000 Stunden.

## 3. Vergleich zwischen Aufkohlen und Entkohlen

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Merkmal                 | Aufkohlung                                                                              | Dekarbonisierung                                                              |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Definition              | Kohlenstoffatome diffundieren in die Oberfläche und bilden eine kohlenstoffreiche Phase | Kohlenstoffverlust, Bildung einer kohlenstoffarmen Phase                      |
| Mechanismus             | Kohlenstoffdiffusion erzeugt WC/ $\eta$ -Phase                                          | Kohlenstoffoxidation/-verflüchtigung erzeugt W <sub>2</sub> C/Co-Anreicherung |
| Temperatur              | 1000-1200 °C                                                                            | >800 °C                                                                       |
| Atmosphäre              | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , Ar                    | O <sub>2</sub> (>10 ppm), H <sub>2</sub> -Überschuss                          |
| Schichtdicke            | 0,11 mm                                                                                 | 0,11 mm                                                                       |
| Härte                   | Erhöht um 1015 % (2000-2200 HV)                                                         | 1020 % Reduzierung (1000-1600 HV)                                             |
| Verschleißfestigkeit    | Erhöhung 2030% (<0,05 mm <sup>3</sup> /h)                                               | Reduzierung 2050% (>0,1 mm <sup>3</sup> /h)                                   |
| Korrosionsbeständigkeit | Zunahme 2050 % (<0,01 mm/Jahr)                                                          | Abfall 50100 % (>0,05 mm/Jahr)                                                |
| Zähigkeit               | $\eta$ -Phase ist zu niedrig (KIC <8 MPa·m <sup>1/2</sup> )                             | W <sub>2</sub> C steigt und fällt (KIC <8 MPa·m <sup>1/2</sup> )              |
| Anwendung               | Picks, Cutter, Siegel                                                                   | Vermeiden, nach der Reparatur verwenden                                       |
| Kontrolle               | Kohlenstoffquellenkonzentration, Zeit                                                   | Atmosphäre (O <sub>2</sub> <5 ppm), Vakuum                                    |

#### 4. Optimierungsvorschläge

##### Aufkohlungsoptimierung:

Kohlenstoffquelle: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (510 l/min), CH<sub>4</sub> (1020 sccm), Reinheit >99,9 %.  
 Temperatur: 1000–1100 °C (Gasphase/Plasma),  $\eta$ -Phase (<5 Vol.-%) vermeiden.  
 Zeit: 12 Stunden, aufgekohlte Schicht 0,20,5 mm, Härteabweichung <±50 HV.  
 Untersuchung: SEM (WC-Korn 0,52  $\mu$ m), XPS (Kohlenstoffgehalt ±0,1 Gew. %).  
 Nachbehandlung: Polieren (Ra <0,2  $\mu$ m), PVD CrN (2  $\mu$ m), Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht.

##### Dekarbonisierungskontrolle:

Atmosphäre: H<sub>2</sub> 10 l/min, O<sub>2</sub> <5 ppm, Ar 5 l/min.  
 Vakuum: 10<sup>-5</sup> Pa, der Kohlenstoffverlust während des Sinterns/der Wärmebehandlung wird um 90 % reduziert.  
 Entparaffinierung: 200–600 °C, Restkohlenstoff <0,05 %, O<sub>2</sub> <5 ppm.  
 HIP: 1350 °C, 120 MPa, Porosität <0,001 %, W<sub>2</sub>C <5 %.  
 Überwachung: Online-Spektroskopie (O<sub>2</sub>/CO-Konzentration), Abweichung des Kohlenstoffgehalts <±0,1 Gew.-%.

##### Geräteoptimierung:

Sinterofen: Temperaturregelung ±3 °C, Vakuum 10<sup>-5</sup> Pa, Gleichmäßigkeit ±5 °C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gassystem: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Durchflussgenauigkeit  $\pm 0,1$  l/min, O<sub>2</sub>-Erkennung <5 ppm.

Prüfung: SEM/XPS (Korn/Zusammensetzung), Ultraschall (Riss > 0,1 mm).

#### Anwendungsanpassung:

Aufkohlen: Bergbaupickel (Gestein mit hoher Härte), Werkzeuge (Hochgeschwindigkeitsschneiden).

Entkohlungsreparatur: Aufkohlen (1100°C, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, 1 Stunde) + Beschichten (CrN, 2  $\mu$ m).

## 5. Normen

GB/T 183762014: Porosität <0,01 %, Gleichmäßigkeit >95 %.

GB/T 51692013: Porosität A02B00C00 (Vakuum), A00B00C00 (HIP).

GB/T 38502015: Dichte 14.515,0 g/cm<sup>3</sup>, Abweichung  $\leq \pm 0,1$  g/cm<sup>3</sup>.

GB/T 38512015: Biegefestigkeit 1,82,8 GPa.

GB/T 7997-2017: Härte 1400–2200 HV.

NACE MR0175: H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>-beständig, Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr.

ASTM G65: Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h.

ISO 6508: Härteabweichung  $\leq \pm 50$  HV.

## 6. Fazit

Die Aufkohlung von Hartmetall erfolgt in der Gasphase (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, 1000–1200 °C), in der Festphase (Graphit, 1100–1300 °C) oder durch Plasmaaufkohlung (CH<sub>4</sub>, 800–1000 °C). Dabei bildet sich auf der Oberfläche eine 0,11 mm dicke aufgekohlte Schicht, die die Härte auf 2000–2200 HV erhöht, die Verschleißfestigkeit um 2030 % (Verschleißverlust <0,05 mm<sup>3</sup>/h) und die Korrosionsbeständigkeit um 2050 % (H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> <0,01 mm/Jahr) verbessert und die Lebensdauer der Meißel (1000–1500 Stunden), des Werkzeugs und der Dichtung (Erhöhung um 3050 %) deutlich verlängert. Durch die Entkohlung entsteht durch Oxidation bei hohen Temperaturen (> 800 °C) oder Kohlenstoffverflüchtigung eine W<sub>2</sub>C/Co-reiche Schicht, die die Härte um 1020 % (1000–1600 HV) und die Verschleißfestigkeit um 2050 % reduziert. Dies muss durch Optimierung der Atmosphäre (O<sub>2</sub> < 5 ppm), des Vakuums (10<sup>-5</sup> Pa) und des HIP (1350 °C, 120 MPa) kontrolliert werden. Ein präziser Aufkohlungsprozess (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 510 l/min, 12 Stunden) und eine strikte Verhinderung und Kontrolle der Entkohlung (H<sub>2</sub> 10 l/min, Restkohlenstoff < 0,05 %) gewährleisten die stabile Leistung des Hartmetalls.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Anhang:

### Was ist Binder Jetting von Hartmetall?

Binder Jetting von Hartmetall (WC-Co) ist eine fortschrittliche additive Fertigungstechnologie, bei der flüssige Bindemittel verwendet werden, um Hartmetallpulver selektiv zu verbinden und so schichtweise leistungsstarke dreidimensionale Strukturen aufzubauen. Sie eignet sich zur Herstellung komplexer Hartmetall-Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer und verschleißfester Formen. Die Technologie wurde 1994 vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt (Referenz: MIT-Patent US5340656A) und später von ExOne, Desktop Metal und anderen Unternehmen kommerzialisiert. In den letzten Jahren hat sie im Bereich Hartmetall breite Anwendung gefunden. Im Folgenden werden Definition, Geschichte, Prinzipien, Prozessablauf, technische Parameter, Eigenschaften, Anwendungsbereiche, Leistungsdaten und Optimierungsstrategien ausführlich erläutert.

#### 1. Definition und Grundkonzepte des Binderspritzgießens von Hartmetall

Binder Jetting von Hartmetall ist ein additives Fertigungsverfahren auf Pulverbettbasis. Dabei werden hochpräzise Bindemittel gespritzt, um Hartmetallpulver (z. B. WC-Co) zu verbinden und schrittweise zu dreidimensionalen Bauteilen zu stapeln. Im Gegensatz zu herkömmlichen Hartmetall-Herstellungsverfahren (z. B. Pressen und Sintern) oder fusionsbasiertem 3D-Druck (z. B. selektives Laserschmelzen, SLM) wird beim Binder Jetting das Pulver nicht direkt geschmolzen, sondern durch die physikalische oder chemische Wirkung des Bindemittels eine anfängliche Verfestigung zwischen den Partikeln erreicht. Der resultierende „Grünkörper“ (Grünteil) muss nachbearbeitet werden, z. B. entfettet und gesintert, um Festigkeit und Dichte zu verbessern.

#### Eignung von Hartmetall für den Binder-Spritzguss:

Hartmetall (WC-Co, Co-Gehalt 6–12 %), Härte kann HV 1500–1800 erreichen, Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) 10–15 MPa $\cdot$ m<sup>1/2</sup>.

Geeignet für Teile mit komplexer Geometrie, wie etwa Werkzeuge mit internen Kühlkanälen oder Formen mit porösen Strukturen.

#### Geschichte und Entwicklung der Binder-Spritzgusstechnologie für Hartmetall

Die Binder-Jetting-Technologie wurde 1994 vom MIT entwickelt und zunächst für den Sandguss eingesetzt (Patent US5340656A). 1999 vermarktete ExOne sie und brachte das erste kommerzielle Gerät, den ZPrinter 310, auf den Markt. 2016 veröffentlichte Desktop Metal das Shop System, das die Strahlgenauigkeit und Produktionseffizienz weiter optimierte.

#### Strahltechnologie für Hartmetallanwendungen:

Im Jahr 2018 brachte ExOne das Innovent +-System auf den Markt, das WC-Co-Pulverformen unterstützt und eine Druckgeschwindigkeit von bis zu 2000 cc/h hat.

Im Jahr 2023 brachte Sandvik Additive Manufacturing das Osprey WC-Co-Pulver (Partikelgröße

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5–15  $\mu\text{m}$  ) auf den Markt, das für Binder Jetting optimiert ist und eine auf 99,1 % erhöhte Dichte aufweist.

Aktuelle Fortschritte: GE Research hat ab 2025 ein neues Nanopartikelbindemittel (Partikelgröße < 1  $\mu\text{m}$  ) entwickelt , das die Grünkörperfestigkeit um 30 % (von 8 MPa auf 10,4 MPa) erhöht und Druckfehler deutlich reduziert.

### 3. Funktionsprinzip der Binder-Jetting-Technologie

Beim Binder-Spritzgießen von Hartmetall erfolgt die Teilekonstruktion in den folgenden Schritten:

#### Pulverstreuung

einen Schaber , um Hartmetallpulver (z. B. WC-10Co, Partikelgröße 5–20  $\mu\text{m}$  ) gleichmäßig auf der Bauplattform zu verteilen. Die Schichtdicke beträgt normalerweise 50–100  $\mu\text{m}$  .

Um eine qualitativ hochwertige Schicht zu gewährleisten, muss das Pulver eine hohe Fließfähigkeit (Schüttwinkel <30°) und eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung (D50-Abweichung <5%) aufweisen.

#### Binder Jetting

Hochpräzise Düsen (Auflösung 40–50  $\mu\text{m}$  , Düsenanzahl >1000) sprühen flüssiges Bindemittel gezielt entsprechend den CAD-Modelldaten .

Zu den üblichen Bindemitteln zählen wasserbasierte Bindemittel (wie etwa Polyvinylalkohol (PVA) mit einer Viskosität von 5–10 mPa·s ) und organische Bindemittel (wie etwa Phenolharz mit einem Feststoffgehalt von 30–40 %).

der Pulverpartikel ein (Eindringtiefe 100–150  $\mu\text{m}$  ) und verfestigt sich durch physikalische Bindung oder chemische Reaktion (Aushärtezeit 0,5–1 s).

#### Kaskadenkonstruktion

Die Bauplattform senkt sich um eine Schicht (entsprechend der Schichtdicke) und der Pulververteilungs- und -ausstoßvorgang wird wiederholt, bis das Teil fertig ist.

ohne Bindemittel fungiert als natürliche Stützstruktur und sorgt für die Stabilität des Teils, ohne dass zusätzliche Stützen erforderlich sind.

#### Nachbearbeitung

Der Grünkörper wird aus dem Pulverbett entnommen und einer Entbinderung (200–400 °C, 2–4 h) unterzogen, um das Bindemittel zu entfernen.

Durch Sintern (1350–1450 °C, Vakuum <10<sup>-2</sup> Pa, 4–8 Stunden) werden WC-Co-Partikel kombiniert und die Dichte auf 98–99,2 % erhöht.

Optional kann durch Heißisostatisches Pressen (HIP, 1500 °C, 100 MPa, 2 h) die Porosität weiter reduziert werden (<0,5 %).

### 4. Binder-Jetting-Technologieprozess und technische Parameter

Der Binder-Jetting-Prozess für Hartmetall umfasst die folgenden detaillierten Parameter:

#### Pulvereigenschaften:

Material: WC-Co-Pulver (z. B. WC-8Co, WC-12Co).

Partikelgröße: 5–20  $\mu\text{m}$  , D50-Abweichung <5 % , Sphärizität >0,9 (REM-Messung).

Chemische Zusammensetzung: WC-Gehalt 88–94 % , Co-Gehalt 6–12 % , Sauerstoffgehalt <0,3 Gew.-% (LECO-Analyse).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Pudern und Sprühen:**

Schichtdicke: 50–100  $\mu\text{m}$ , Abweichung  $\leq \pm 5 \mu\text{m}$  (überprüft durch Laserentfernungsmesser).

Injektionsdruck: 0,2–0,5 MPa, Einzeltropfenvolumen 10–20  $\mu\text{L}$  (gemessen mit Hochgeschwindigkeitsvideo).

Strahlgeschwindigkeit: 20–50 mm/s, Druckauflösung 1200 dpi.

### **Aushärtung und Umweltkontrolle:**

Aushärtezeit des Klebstoffs:  $< 1 \text{ s}$ , Umgebungstemperatur 20–30  $^{\circ}\text{C}$ , Luftfeuchtigkeit 40–60 %.

Die Baukammer muss mit einem Schutzgas (z. B. Stickstoff, Sauerstoffgehalt  $< 500 \text{ ppm}$ ) ausgestattet sein.

### **Nachbearbeitung:**

Entfetten: 250–350  $^{\circ}\text{C}$ , Heizrate 1–2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 3 Stunden warm halten, Restkohlenstoffgehalt  $< 0,5 \text{ Gew.} \%$ .

Sintern: 1350–1450  $^{\circ}\text{C}$ , Heizrate 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , Vakuumgrad  $< 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 6 Stunden warm halten.

Schrumpungsrate: Die lineare Schrumpfung beträgt 12–15 %, was eine Vorkompensationskonstruktion erfordert (Genauigkeit  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ).

Dichte: 98,5 % – 99,2 % (gemessen mit der Archimedes-Methode), Porosität  $< 1 \%$  (CT-Scan, Auflösung  $< 5 \mu\text{m}$ ).

### **Ausrüstungsanforderungen:**

Hochpräzise 3D-Drucker (wie ExOne Innovent +, Bauvolumen  $160 \times 65 \times 65 \text{ mm}$ ).

Druckkopf: Xaar 1003 Druckkopf, Düsenanzahl 1000, Auflösung 40  $\mu\text{m}$ .

Pulversversorgungssystem: Vibrationssiebung, Gleichmäßigkeitsabweichung  $< 3 \%$ .

Temperaturregelung: Infrarotheizung, Abweichung  $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

## **Merkmale der Binder-Spritzgusstechnologie**

Das Binder-Spritzgießen von Hartmetall weist die folgenden Eigenschaften auf:

### **Hohe Gestaltungsfreiheit:**

Es können komplexe Geometrien gedruckt werden, wie etwa interne Kühlkanäle (0,5–2 mm Durchmesser), poröse Strukturen (0,1–1 mm Porengröße) und dünnwandige Teile (Wandstärke  $< 0,5 \text{ mm}$ ).

Unterstützt funktionales Gradientendesign, wie beispielsweise hohe Oberflächenhärte (HV 1700) und hohe innere Zähigkeit ( $K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

### **Geringe Wärmezufuhr:**

Drucken Sie bei Raumtemperatur (20–30  $^{\circ}\text{C}$ ), um eine Kornvergrößerung ( $> 2 \mu\text{m}$ ) oder eine Verflüchtigung der Co-Phase durch Schmelzen bei hohen Temperaturen ( $> 3000^{\circ}\text{C}$ ) zu vermeiden. Die thermische Spannung beträgt  $< 50 \text{ MPa}$  (gemessen mit einem Röntgenspannungsmessgerät), was viel niedriger ist als bei SLM ( $> 200 \text{ MPa}$ ).

### **Hohe Produktionseffizienz:**

Druckgeschwindigkeit: 2000  $\text{cc}/\text{h}$  (Daten von ExOne), wodurch 50–100 Kleinteile (Volumen 10  $\text{cm}^3$ ) pro Stunde produziert werden können.

Es ist keine Stützstruktur erforderlich, Teile können dicht angeordnet werden und die Konstruktionseffizienz wird um 30–50 % verbessert.

### **Materialverträglichkeit:**

## **COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Unterstützt eine Vielzahl von WC-Co-Verhältnissen, wie z. B. WC-6Co (hohe Härte) und WC-12Co (hohe Zähigkeit).

Die Pulverrückgewinnungsrate liegt bei >99 % und kann 5–10 Mal wiederverwendet werden (Anstieg des Sauerstoffgehalts <0,1 Gew.-%).

**Wirtschaftlichkeit:**

Pulverkosten: WC-Co-Pulver kostet 50–60 USD/kg (Angebot von Sandvik), was 20–30 % günstiger ist als SLM-Pulver.

Gerätebetriebskosten: 1-2 \$/Stunde (Stromverbrauch <5 kWh), Stückkosten 5-10 \$ (Teilevolumen 10 cm<sup>3</sup>).

**Einschränkung:**

Der Grünkörper weist eine geringe Festigkeit (8–10 MPa, Instron-Zugversuch) auf und bricht leicht. Die Sinterschrumpfrate beträgt 12–15 %, die Maßabweichung beträgt ±0,1 mm, was eine präzise Vorkompensation erfordert.

Oberflächenrauheit: Ra 4–6 µm (nach dem Sintern), zur Reduzierung auf Ra < 0,1 µm ist Kugelstrahlen erforderlich.

## 6. Anwendungsgebiete und Leistungsdaten der Binder-Jetting-Technologie

Das Binder-Spritzgießen von Hartmetall weist in den folgenden Bereichen einen einzigartigen Wert auf:

**Schneidwerkzeuge:**

- Werkzeug (Schichtdicke 50 µm), interner Kühlkanal (Durchmesser 1 mm) verbessert die Wärmeableitungseffizienz um 25 %, Schnittlebensdauer 15–18 Stunden (um 20 % erhöht), Schnittgeschwindigkeit 1000 m/min (Luftfahrt-Aluminiumlegierung).

**Bergbaubohrer:**

WC-8Co-Bohrer (Volumen 50 cm<sup>3</sup>), Gitterstruktur (Öffnung 0,5 mm), 15 % Gewichtsreduzierung, Bohrdistanz 1500-1800 m (Erhöhung um 50 %), Härte HV 1650, K<sub>1</sub> c 12 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Verschleißfeste Form:**

WC-12Co-Matrize (Wandstärke 0,4 mm), Extrusionszeiten >1,2×10<sup>6</sup>-fach (Erhöhung um 25 %), Härte HV 1700, Verschleißrate <0,09 mm<sup>3</sup>/N·m (ASTM G65-Test).

**Schnelles Prototyping:**

Der Produktionszyklus beträgt 6–8 Stunden (herkömmliches Pressen und Sintern dauert 3–5 Tage) und die F&E-Kosten werden um 50 % reduziert, was für die Überprüfung des Designs von Hartmetallwerkzeugen geeignet ist.

**Leistungsdaten (gemessen):**

Härte: HV 1650-1750 (Vickers-Härteprüfgerät, Belastung 30 kg).

Bruchzähigkeit: K<sub>1</sub> c 11-13 MPa·m<sup>1/2</sup> (Einkanten-Kerbbalkenverfahren, ASTM E399).

Dichte: 98,8 % – 99,2 % (Archimedes-Methode).

Dauerfestigkeit: >1,2×10<sup>5</sup>-fach (Rotationsbiegefestigkeitstest, 500 MPa).

## 7. Vergleich der Binder-Jetting-Technologie mit anderen Technologien

**Im Vergleich zum selektiven Laserschmelzen (SLM):**

einer kleineren Korngröße (0,5–1 µm vs. 1–3 µm).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Etwas weniger dicht (99 % gegenüber 99,5 %), aber 50 % weniger teuer (5 \$ gegenüber 10 \$ pro Stück).

### Im Vergleich zum herkömmlichen Pressen und Sintern:

Binder Jetting unterstützt komplexe Designs mit kurzen Produktionszyklen (8 Stunden vs. 5 Tage), erfordert jedoch eine höhere Präzision bei der Schrumpfungskontrolle (Abweichung  $\pm 0,1$  mm vs.  $\pm 0,05$  mm).

Eine umfassende Liste, die die Binder-Jetting-Technologie mit anderen Formtechnologien vergleicht

Die folgende Tabelle vergleicht die Binder Jetting (BJ)-Technologie mit Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modeling (FDM), Press and Sinter (P&S) und Directed Energy Deposition (DED).

| Index                | Binder Jetting (BJ)                                                                                                                     | Selektives Laserschmelzen (SLM)                                                                          | Elektronenstrahlschmelzen (EBM)                                                                                   | Fused Deposition Modeling (FDM)                                                                  | Konventionelles Pressen und Sintern (P&S)                                                           | Gerichtete Energieabscheidung (DED)                                                              |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prinzip              | Die Pulver werden durch Aufsprühen von Bindemitteln verbunden, Schicht für Schicht gestapelt und anschließend gesintert und verfestigt. | Der Laser schmilzt das Pulver, trägt es Schicht für Schicht auf und bringt es in eine geschmolzene Form. | Ein Elektronenstrahl schmilzt Pulver und lagert es in einer Hochtemperatur-Vakuumumgebung Schicht für Schicht ab. | Der Heißschmelzdraht wird extrudiert, Schicht für Schicht aufgetragen, abgekühlt und verfestigt. | Das Pulver wird gepresst und bei hohen Temperaturen gesintert, um es zu formen und zu verfestigen.  | Der Laser oder Lichtbogen schmilzt das Pulver/den Draht und trägt es Schicht für Schicht auf.    |
| Materialeignung      | Metall (z. B. WC-Co), Keramik, Sand; Pulverpartikelgröße 5–20 $\mu\text{m}$ .                                                           | Metalle (z. B. Titanlegierungen, Stahl), geringe Mengen Keramik; Partikelgröße 10–45 $\mu\text{m}$ .     | Metalle (wie Titan, Nickelbasislegierungen); Partikelgröße 20–75 $\mu\text{m}$ .                                  | Thermoplaste, geringe Menge Verbundwerkstoffe; Drahtdurchmesser 1,75–3 mm.                       | Metallpulver (z. B. WC-Co), Nickellegierungen, Keramik; Partikelgröße 1–10 $\mu\text{m}$ .          | Metalle (z. B. Stahl, Nickellegierungen), Verbundwerkstoffe; Pulver/Draht 50–150 $\mu\text{m}$ . |
| Genauigkeit          | $\pm 0,1$ mm, Schichtdicke 50–100 $\mu\text{m}$ , Auflösung 40–50 $\mu\text{m}$ (Düse).                                                 | $\pm 0,05$ mm, Schichtdicke 20–50 $\mu\text{m}$ , Auflösung 20–30 $\mu\text{m}$ (Laserstrahl).           | $\pm 0,2$ mm, Schichtdicke 50–100 $\mu\text{m}$ , Auflösung 50–100 $\mu\text{m}$ (Elektronenstrahl).              | $\pm 0,2$ mm, Schichtdicke 100–200 $\mu\text{m}$ , Auflösung 100–200 $\mu\text{m}$ (Düse).       | $\pm 0,05$ mm, hängt von der Formgenauigkeit ab, die Partikelgröße beeinflusst die Gleichmäßigkeit. | $\pm 0,5$ mm, Schichtdicke 0,5–2 mm, Auflösung 0,5–1 mm (Schmelzbad).                            |
| Druckgeschwindigkeit | 2000 $\text{cm}^3/\text{h}$ , 50–100 Stück/Stunde ( $10 \text{ cm}^3$ ).                                                                | 10–20 $\text{cm}^3/\text{h}$ , 5–10 Stück/Stunde ( $10 \text{ cm}^3$ ).                                  | 20–50 $\text{cm}^3/\text{h}$ , 5–15 Stück/h ( $10 \text{ cm}^3$ ).                                                | 50–100 $\text{cm}^3/\text{h}$ , 10–20 Stück/h ( $10 \text{ cm}^3$ ).                             | Massenproduktion, 1–5 Stunden pro Stück (die $10 \text{ cm}^3$ ).                                   | 500–1000 $\text{cm}^3/\text{h}$ , 20–50 Stück/h ( $10 \text{ cm}^3$ ).                           |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

| Index                                | Binder Jetting (BJ)                                                                  | Selektives Laserschmelzen (SLM)                                                 | Elektronenstrahlschmelzen (EBM)                                                                | Fused Deposition Modeling (FDM)                                                 | Konventionelles Pressen und Sintern (P&S)                                                                          | Gerichtete Energieabscheidung (DED)                                              |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                      |                                                                                      |                                                                                 |                                                                                                |                                                                                 | Vorbereitung der Form dauert mehrere Wochen).                                                                      |                                                                                  |
| kosten                               | Mittel (moderate Geräte- und Materialkosten, geringe Betriebskosten).                | Hoch (teure Geräte, hohe Material- und Betriebskosten).                         | Hoch (das Gerät erfordert eine Vakuumumgebung und die Material- und Betriebskosten sind hoch). | Niedrig (geringe Geräte- und Materialkosten, niedrige Betriebskosten).          | Mittel (die Kosten für Ausrüstung und Material sind moderat, aber die Kosten für die Formenentwicklung sind hoch). | Mittel (hohe Gerätekosten, mittlere Material- und Betriebskosten).               |
| Oberflächenqualität                  | Ra 4–6 μm (nach dem Sintern), Ra <0,1 μm nach dem Kugelstrahlen.                     | Ra 10–15 μm, muss auf Ra <0,2 μm bearbeitet werden.                             | Ra 20–30 μm, muss auf Ra <0,5 μm bearbeitet werden.                                            | Ra 5–10 μm, muss auf Ra <0,2 μm nachbearbeitet werden.                          | Ra 0,1–0,5 μm (Formgenauigkeit), keine zusätzliche Bearbeitung erforderlich.                                       | Ra 20–50 μm, muss auf Ra <0,5 μm bearbeitet werden.                              |
| Anforderungen an die Nachbearbeitung | Entbindern (200–400 °C, 3 h), Sintern (1350–1450 °C, 6 h), HIP (optional).           | Wärmebehandlung (900–1200°C, 2 h), spanende Bearbeitung.                        | Wärmebehandlung (1000–1300°C, 2 h), spanende Bearbeitung.                                      | Keine Wärmebehandlung erforderlich, Stützentfernung und Schleifen erforderlich. | Sintern (1300–1500 °C, 4–8 h) ohne zusätzliche Behandlung.                                                         | Wärmebehandlung (800–1100°C, 2 h), spanende Bearbeitung.                         |
| Gestaltungsfreiheit                  | Hohe, interne Kanäle (0,5–2 mm), dünne Wände (<0,5 mm), Gradientenstruktur.          | Mittel, interne Kanäle (0,3–1 mm), Stützstruktur erforderlich.                  | Mittel, interne Kanäle (0,5–2 mm), Stützstruktur erforderlich.                                 | Niedrig, auf den Kabelverlauf beschränkt, keine interne Struktur.               | Gering, abhängig vom Formdesign, begrenzt durch komplexe Strukturen.                                               | Hoch, Restauration oder Großstückfertigung, Innenkanäle (1–5 mm).                |
| Hartmetalleistung                    | Härte HV 1650–1750, K <sub>1c</sub> 11–13 MPa·m <sup>1/2</sup> , Dichte 98,8–99,2 %. | Härte HV 1700–1900, K <sub>1c</sub> 10–12 MPa·m <sup>1/2</sup> , Dichte 99,5 %. | Härte HV 1600–1800, K <sub>1c</sub> 9–11 MPa·m <sup>1/2</sup> , Dichte 99,3 %.                 | Nicht zutreffend, schwierig zu handhaben                                        | Härte HV 1800–2000, K <sub>1c</sub> 12–15 MPa·m <sup>1/2</sup> , Dichte 99,8 %.                                    | Härte HV 1600–1700, K <sub>1c</sub> 10–12 MPa·m <sup>1/2</sup> , Dichte 98–99 %. |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

| Index              | Binder Jetting (BJ)                                                                           | Selektives Laserschmelzen (SLM)                                                        | Elektronenstrahlschmelzen (EBM)                                                      | Fused Deposition Modeling (FDM)                                        | Konventionelles Pressen und Sintern (P&S)                           | Gerichtete Energieabscheidung (DED)                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                                                               |                                                                                        |                                                                                      | WC-Co.                                                                 |                                                                     |                                                                                 |
| Hitzestress        | <50 MPa (Röntgenspannungsmessgerät), geringe Wärmezufuhr.                                     | >200 MPa, zur Entspannung ist eine Wärmebehandlung erforderlich.                       | >300 MPa, zur Entspannung ist eine Wärmebehandlung erforderlich.                     | <20 MPa, keine Wärmezufuhr.                                            | <100 MPa, gleichmäßig während des Sinterns.                         | >150 MPa, zur Entspannung ist eine Wärmebehandlung erforderlich.                |
| Körnung            | 0,5–1 µm (nach dem Sintern, gemessen mit SEM).                                                | 1–3 µm (nach dem Schmelzen, SEM-Messung).                                              | 2–5 µm (nach dem Schmelzen, SEM-Messung).                                            | nicht anwendbar.                                                       | 0,5–2 µm (nach dem Pressen, gemessen mit SEM).                      | 5–10 µm (Schmelzbaderstarrung, SEM-Messung).                                    |
| Anwendungsszenario | Schneidwerkzeuge (WC-10Co), Bergbaubohrer, Formprototypen.                                    | Hochpräzise Luftfahrtkomponenten (Ti6Al4V), medizinische Implantate.                   | Turbinenschaufeln für die Luftfahrt (Nickel-Basislegierungen), Ersatzteile.          | Prototyping, Verbraucherprodukte (ABS-Teile).                          | Große Mengen an Hartmetallwerkzeugen (WC-Co-Bohrer).                | Großflächige Metallreparatur, additive Fertigung (Stahlkonstruktionen).         |
| Einschränkung      | Der Grünkörper weist eine geringe Festigkeit (8–10 MPa) und eine Schrumpfung von 12–15 % auf. | Hohe Kosten, erfordert Stützkonstruktion und weist eine hohe thermische Belastung auf. | Hohe Kosten, erfordert Vakuumumgebung und hat eine raue Oberfläche.                  | Begrenzte Materialauswahl und keine Möglichkeiten zur Metallumformung. | Die Formkosten sind hoch und die Gestaltungsfreiheit gering.        | Geringe Präzision, schlechte Oberflächenqualität und große Wärmeeinflusszone.   |
| Umweltauswirkungen | Pulverrückgewinnungsrate >99 %, Energieverbrauch 5 kWh/h.                                     | Die Pulverrückgewinnungsrate liegt bei 90 % und der Energieverbrauch beträgt 10 kWh/h. | Die Pulverrückgewinnungsrate beträgt 85 % und der Energieverbrauch beträgt 15 kWh/h. | Geringer Materialabfall und Energieverbrauch von 2 kWh/h.              | Der Materialabfall beträgt 5–10 % und der Energieverbrauch 8 kWh/h. | Der Materialabfall beträgt 10–15 % und der Energieverbrauch liegt bei 12 kWh/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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Anhang:**

**Anwendung von Hartmetall in Elektrolyseuren für neue Energie**

Hartmetall (hauptsächlich bestehend aus Wolframkarbid WC und Bindephasen wie Co und Ni, WC-Gehalt 8594 Gew.-%, Bindephase 615 Gew.-%) hat aufgrund seiner hohen Härte (1400–2200 HV), ausgezeichneten Verschleißfestigkeit ( Verschleißverlust <0,05 mm<sup>3</sup>/h, ASTM G65), Korrosionsbeständigkeit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>S <0,01 mm/Jahr, NACE MR0175) und hohen Temperaturstabilität (>800 °C) ein wichtiges Anwendungspotenzial in Elektrolyseuren für neue Energien (wie alkalischer Elektrolyseur AWE, Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur PEM und Festoxidelektrolyseur SOEC). Elektrolyseure für neue Energien sind die Kernausrüstung für grünen Wasserstoff (H<sub>2</sub>), der durch Elektrolyse von Wasser Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt, die Energiespeicherung erneuerbarer Energien (wie Windkraft, Solarenergie) und die grüne Transformation harter Dekarbonisierungsindustrien (wie Stahl- und Chemieindustrie) unterstützt.

Basierend auf den Materialeigenschaften, internationalen Normen (wie GB/T 183762014, IEC 62976) und Branchentrends von Hartmetall analysiert dieser Artikel dessen Anwendung, Herausforderungen und Optimierungsrichtungen in Elektrolysezellen und empfiehlt die Kompetenzen der CTIA GROUP LTD in der Forschung und Entwicklung von Hochleistungs-Hartmetallkomponenten. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich der Inhalt dieses Artikels nicht auf den Aufkohlungs- und Entkohlungsprozess von Hartmetall bezieht.

**1. Übersicht über neue Energieelektrolyseure**

Neue Energieelektrolyseure erzeugen grünen Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser (H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> + ½ O<sub>2</sub>) und werden in die folgenden Haupttypen eingeteilt:

**Alkalischer Elektrolyseur (AWE):**

Prinzip: Als Elektrolyt wird eine KOH/NaOH-Lösung (2530 Gew.-%) verwendet, als Elektrode dient Ni oder Ni-beschichteter Stahl, und Bipolarplatten trennen Kathode und Anode.

Merkmale:

Ausgereifte Technologie, niedrige Investitionskosten (500–1.000 €/kW, Prognose für 2030: 300 €/kW).

Wirkungsgrad: 6080 % (4050 kWh/kg H<sub>2</sub>).

Lebensdauer: >80.000 Stunden.

Herausforderungen: Korrosiver Elektrolyt (pH >14), komplexe Gas-Flüssigkeits-Trennung.

Anwendungen: Wasserstoffproduktion im großen Maßstab (> 1 MW), Energiespeicherung in Windparks.

**Protonenaustauschmembran- Elektrolyseur (PEM):**

Prinzip: Verwendung einer festen Polymermembran (z. B. Nafion ) als Elektrolyt, Pt/ Ir -Katalysator, Ti- oder Edelstahl -Bipolarplatte.

Merkmale:

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



Hoher Wirkungsgrad: 7090 % (3545 kWh/kg H<sub>2</sub>).

Die dynamische Reaktion ist schnell (Sekunden), was für intermittierende erneuerbare Energie geeignet ist.

Die Investitionskosten sind hoch (1.000–2.000 €/kW, Prognose für 2030: 500 €/kW).

Lebensdauer: 20.000–60.000 Stunden.

Herausforderungen: Edelmetallkatalysatoren sind teuer und in sauren Umgebungen (pH < 2) korrosiv.

Anwendungen: Dezentrale Wasserstoffproduktion, Brennstoffzellen für den Transport.

### **Festoxidelektrolyseur (SOEC) :**

Prinzip: Verwendung von keramischen Elektrolyten (wie YSZ), Ni- oder Perowskit-Elektroden bei hohen Temperaturen (500–850 °C).

Merkmale:

Ultrahoher Wirkungsgrad: >90 % (<40 kWh/kg H<sub>2</sub>).

Hoher CAPEX (>2000 €/kW, Laborphase).

Lebensdauer: 10.000–20.000 Stunden.

Herausforderungen: Hochtemperaturversiegelung, thermische Zyklenstabilität.

Anwendung: Industrielle Abwärmekopplung und zukünftige großtechnische Wasserstoffproduktion.

Anwendungsszenarien von Hartmetall: Hartmetall wird hauptsächlich in Schlüsselkomponenten von Elektrolyseuren verwendet, wie etwa Bipolarplatten, Dichtungen, Düsen und verschleißfesten Elektrodenbeschichtungen, um Korrosion, Verschleiß und hohen Temperaturen standzuhalten.

## **2. Anwendung von Hartmetall in Elektrolysezellen**

Dank seiner hohen Härte, Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Stabilität kann Hartmetall herkömmliche Werkstoffe (wie Nickel, Titan und Edelstahl) in Elektrolysezellen ersetzen und so die Lebensdauer der Komponenten (bis zu 2050 %) und die Systemeffizienz (bis zu 1020 %) verbessern. Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

### **2.1 Bipolarplatte aus Hartlegierung**

Funktion: Trennt Elektrolysezellen, leitet Strom und verteilt Elektrolyt/Gas.

Erfordern:

Korrosionsbeständigkeit: AWE (KOH, pH >14), PEM (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH <2).

Leitfähigkeit: Spezifischer Widerstand <10 μΩ·cm.

Mechanische Festigkeit: Druckfestigkeit > 2 GPa, Biegefestigkeit 1,8–2,8 GPa.

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h (ASTM G65).

Vorteile von Hartmetall:

WCCo : Härte 1400–2000 HV, KOH/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

WCNi : nicht magnetisch, Säurebeständigkeit ist besser als auf Co-Basis (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> <0,005 mm/Jahr).

Leitfähigkeit: Der spezifische Widerstand beträgt 510 μΩ·cm, was besser ist als bei Ti (40 μΩ·cm).

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

Stabilität: Kornstabilität bei 800°C, keine Phasenänderung.

Beispiele:

AWE-Bipolarplatte: WC10 % Ni (Ø 200 mm, Dicke 2 mm), Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Lebensdauer >100.000 Stunden (Ni-Stahl 50.000 Stunden).

- Bipolarplatte: WC6%Co + CrN -Beschichtung (2 µm), Säurebeständigkeit um 30 % erhöht, Leitfähigkeit bei 99 % gehalten.

## 2.2 Hartmetalldichtungen

Funktion: Verhindert Elektrolytlecks und gewährleistet Luftdichtheit (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Trennung).

Erfordern:

Korrosionsbeständigkeit: Beständig gegen KOH/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>S.

Verschleißfestigkeit: Anti-Reibverschleiß (Verschleißrate <0,01 mm<sup>3</sup>/h).

Hohe Temperaturstabilität: SOEC erfordert >800 °C.

Vorteile von Hartmetall:

WCCo /Ni: Härte 1600–2200 HV, besserer Schutz vor Reibverschleiß als PTFE (Verschleißreduzierung um 50 %).

Korrosionsbeständigkeit: H<sub>2</sub>S <0,005 mm/Jahr (NACE MR0175).

Hohe Temperatur: WC-Schmelzpunkt 2870 °C, SOEC umweltstabil.

Beispiele:

SOEC-Dichtring: WC8%Ni (Ø 50 mm), Luftdichtheit >99,9% bei 800°C, Lebensdauer >15.000 Stunden (Keramikdichtung <10.000 Stunden).

AWE-Dichtung: WC10 % Co (1 mm dick), KOH-Umweltkorrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Wartungszyklus um 20 % erhöht.

## 2.3 Hartmetalldüse und -rohr

Funktion: Transport von Elektrolyt H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, muss Erosion und Korrosion widerstehen.

Erfordern:

Erosionsbeständigkeit: Hochgeschwindigkeits-Gas- und Flüssigkeitsströmung (>10 m/s).

Korrosionsbeständigkeit: Beständig gegen KOH/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Geringe Reibung: Ra <0,2 µm.

Vorteile von Hartmetall:

WCCo : Härte 2000 HV, Lebensdauer der Erosionsbeständigkeit um 3050 % erhöht (im Vergleich zu Edelstahl).

Oberflächenpolitur: Ra 0,10,2 µm, reduziert Blasenhaftung.

Korrosionsbeständigkeit: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> <0,01 mm/Jahr.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beispiele:

PEM-Düse: WC6%Co ( $\varnothing$  10 mm), Erosionslebensdauer 50.000 Stunden (Ti 20.000 Stunden).

AWE-Rohrauskleidung: WC10 % Ni (2 mm dick), KOH-Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Wartungskosten um 15 % reduziert.

## 2.4 Hartmetall-Elektrodenbeschichtung

Funktion: Verbessert die katalytische Effizienz der Elektrode und verringert Überspannung.

Erfordern:

Katalytische Aktivität: Überspannung <300 mV (OER/HER).

Korrosionsbeständigkeit: Säure-/Laugen-/Hochtemperaturbeständigkeit.

Haftung: >80 N (Kratztest).

Vorteile von Hartmetall:

WC-basierte Beschichtung: zusammengesetzt aus Ni und Pt, Überspannung 200–250 mV, besser als reines Ni (300 mV).

Korrosionsbeständigkeit: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/KOH <0,01 mm/Jahr.

Haftung: >100 N (PVD-Verfahren).

Beispiele:

AWE-Elektrode: WCNi- Beschichtung (5  $\mu$  m) , OER-Überspannung 220 mV, Effizienzsteigerung 5 % (Ni-Elektrode 280 mV).

PEM-Elektrode: WCPt- Beschichtung (2  $\mu$  m) , HER-Überspannung 200 mV, Lebensdauer um 20 % erhöht.

---

## 3. Vorteile und Herausforderungen von Hartmetall

### 3.1 Vorteile von Hartmetall

Korrosionsbeständigkeit:

WCCo /Ni in KOH (pH > 14) und H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH < 2) beträgt < 0,01 mm/Jahr, was besser ist als bei Ni-Stahl (0,05 mm/Jahr) oder Ti (0,02 mm/Jahr).

Beständig gegen H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub>-Korrosion, geeignet für Tiefsee- oder Hochtemperatur -Elektrolyseure .

Abriebfestigkeit:

Härte 1400–2200 HV, Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h (ASTM G65), bessere Erosions-/Reibverschleißbeständigkeit als Edelstahl (Verschleißrate 0,1 mm<sup>3</sup>/h).

Hohe Temperaturstabilität:

Der Schmelzpunkt von WC liegt bei 2870 °C und es findet in einer SOEC-Umgebung (500–850 °C) kein Phasenwechsel statt, was besser ist als bei Ni (1455 °C).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elektrische Leitfähigkeit:

Der spezifische Widerstand beträgt  $510 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , was den Anforderungen von Bipolarplatten entspricht und besser ist als Ti ( $40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit:

Die Lebensdauer der Komponenten erhöhte sich um 2050 % ( $> 100.000$  Stunden) und die Wartungskosten sanken um 1020 %.

Obwohl die Anschaffungskosten hoch sind (WC 50100 \$/kg vs. Ni 20 \$/kg), sind die Lebenszykluskosten niedrig.

### 3.2 Herausforderungen

Verarbeitungsschwierigkeiten:

Hartmetall weist eine hohe Härte (1400–2200 HV) auf und erfordert Diamantwerkzeuge oder EDM-Bearbeitung, was die Kosten um 20–30 % erhöht.

Komplexe Formen (wie etwa Strömungskanäle von Bipolarplatten) haben lange Verarbeitungszyklen ( $> 10$  Stunden/Stück).

kosten:

WC-Pulver (Reinheit  $> 99,9\%$ ) und Sintern ( $1350\text{--}1450^\circ\text{C}$ ,  $10^{-5}$  Pa) sind teuer; der Stückpreis liegt beim 23-Fachen von Ti.

Edelmetallbeschichtungen (wie Pt, Ir) erhöhen die Investitionskosten zusätzlich.

Gewicht:

Dichte  $14.515,0 \text{ g/cm}^3$  (vs. Ti  $4,5 \text{ g/cm}^3$ ), nicht geeignet für mobile Elektrolyseure.

Katalytische Aktivität:

Reines WC weist eine begrenzte katalytische Aktivität auf (Überspannung  $> 300 \text{ mV}$ ) und erfordert eine zusammengesetzte Pt/Ni-Beschichtung, was die Prozesskomplexität erhöht.

Sprödigkeit:

Die Zähigkeit ist geringer ( $\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  vs. Ni  $50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) und die Schlagzähigkeit muss optimiert werden.

### 4. Optimierungsrichtung

Material:

WCNi -basiert: Eine Erhöhung des Ni-Gehalts (1015 Gew.-%) verbessert die Säurebeständigkeit ( $\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,005 \text{ mm/Jahr}$ ) und verringert die Co-Auflösung.

Nano WC: Korngröße  $0,20,5 \mu\text{m}$ , Härte um 10 % erhöht (2200 HV), Zähigkeit um 15 % erhöht ( $\text{KIC} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Verbundbeschichtung: WC+Pt /Ni (PVD, 25  $\mu\text{m}$ ), Überspannung wird auf 200 mV reduziert und die katalytische Effizienz um 10 % erhöht.

Herstellungsverfahren:

Additive Fertigung: 3D-gedruckte WCCo- Bipolarplatten, Fließkanalgenauigkeit  $\pm 0,01$  mm, Verarbeitungskosten um 20 % reduziert.

HIP-Sintern: 1350  $^{\circ}\text{C}$ , 120 MPa, Porosität  $< 0,001$  %, Korrosionsbeständigkeit um 15 % erhöht.

Oberflächenbehandlung: Polieren ( $R_a < 0,1$   $\mu\text{m}$ ) + CrN - Beschichtung (2  $\mu\text{m}$ ), Verschleißfestigkeit um 30 % erhöht.

Kostenoptimierung:

WC-Pulver recyceln (Rückgewinnungsrate  $> 90$  %) und Rohstoffkosten um 20 % senken.

Durch den Ersatz des Pt/ Ir -Katalysators durch eine NiFe- Legierung können die Investitionskosten um 1015 % gesenkt werden.

Modularität:

Standardisierte Bipolarplatten (200  $\times$  200 mm, 2 mm dick) sind mit AWE/PEM kompatibel und erhöhen die Produktionseffizienz um 20 %.

Durch die schnelle Demontage und Montage der Dichtungen wird die Wartungszeit um 30 % reduziert.

Getestet und verifiziert:

Korrosionstest: NACE MR0175,  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KOH}$ , Korrosionsrate  $< 0,005$  mm/Jahr.

Haltbarkeit: ASTM G65, Verschleiß  $< 0,05$   $\text{mm}^3/\text{h}$ , Zyklen  $> 100.000$  Mal.

Elektrochemie: OER/HER-Überspannung  $< 250$  mV, Effizienz  $> 80$  %.

## 5. Normen und Spezifikationen

GB/T 183762014: Hartmetall-Porosität  $< 0,01$  %, Gleichmäßigkeit  $> 95$  %.

GB/T 38502015: Dichte 14.515,0  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Abweichung  $\leq \pm 0,1$   $\text{g}/\text{cm}^3$ .

GB/T 38512015: Biegefestigkeit 1,82,8 GPa .

GB/T 7997-2017: Härte 1400–2200 HV, Abweichung  $\leq \pm 50$  HV.

IEC 62976: Elektrische Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand  $< 10$   $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) und Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate  $< 0,01$  mm/Jahr) von Bipolarplatten für Elektrolyseure .

NACE MR0175: Beständig gegen  $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{SO}_4$ , Korrosionsrate  $< 0,005$  mm/Jahr.

ASTM G65: Verschleißrate  $< 0,05$   $\text{mm}^3/\text{h}$ .

ISO 6508: Härteprüfung, Abweichung  $\leq \pm 50$  HV.

## 6. Branchentrends und Fälle

Trend:

Produktion von grünem Wasserstoff: EU RePowerEU strebt bis 2030 20 Mt grünen  $\text{H}_2$  an, Bedarf

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

an Elektrolyseuren >100 GW.

Materialsubstitution: Hartmetall ersetzt schrittweise Ti (PEM) und Ni-Stahl (AWE) und reduziert so die Investitions- und Betriebskosten.

Hochtemperaturelektrolyse: Die Nachfrage nach SOEC steigt und der Markt für Hochtemperaturkomponenten aus Hartmetall (wie etwa Dichtungen) expandiert.

Intelligenz: Online-Überwachung von Korrosion/Verschleiß, integrierte Sensoren an Hartmetallteilen und um 20 % gesteigerte Wartungseffizienz.

Beispiele:

AWE-Projekt: 1-MW- Elektrolyseur (China), WC10%Ni-Bipolarplatten (200×200 mm), Korrosionsrate <0,005 mm/Jahr, Wirkungsgrad 75 %, Lebensdauer >80.000 Stunden, Reduzierung der Wartungskosten 15 %.

PEM-Projekt: 500 kW- Elektrolyseur (Deutschland), WC6%Co-Düse (Ø 10 mm), Erosionslebensdauer 50.000 Stunden, Systemwirkungsgrad um 5 % gesteigert.

SOEC-Pilot: 100 kW- Elektrolyseur (USA), WC8%Ni-Dichtungsring (Ø 50 mm), Luftdichtheit >99,9 % bei 800 °C, Lebensdauer >15.000 Stunden.

## 7. Fazit

Mit seiner hohen Härte (1400–2200 HV), Korrosionsbeständigkeit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/KOH <0,01 mm/Jahr), Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust <0,05 mm<sup>3</sup>/h) und hohen Temperaturstabilität (>800 °C) bietet Hartmetall ( WCCo / Ni) als Schlüsselmateriale für Bipolarplatten, Dichtungen, Düsen und Elektrodenbeschichtungen in Elektrolyseuren für neue Energien (AWE, PEM, SOEC) erhebliche Vorteile. Im Vergleich zu herkömmlichem Ni-Stahl (Lebensdauer 50.000 Stunden) oder Ti (Korrosionsrate 0,02 mm/Jahr) erhöht sich die Lebensdauer von Hartmetallteilen um 2050 % (>100.000 Stunden) und die Wartungskosten sinken um 1020 %, was die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Produktion von grünem Wasserstoff unterstützt.

Die Herausforderungen liegen in der Verarbeitungsschwierigkeit (Kostensteigerung von 2030 %), den Anschaffungskosten und der katalytischen Aktivität (Verbundbeschichtung erforderlich). Durch Nano-WC, additive Fertigung, HIP-Sintern und NiFe- Katalysatoroptimierung können CAPEX/OPEX weiter gesenkt und die Wettbewerbsfähigkeit verbessert werden.

Die CTIA GROUP LTD verfügt über fortschrittliche Hartmetalltechnologie. Sie verwendet Nano-WC-Pulver (D<sub>50</sub> 0,20,5 µm ), HIP-Sintern (1350 °C, 120 MPa) und PVD-Beschichtung ( WCPt /Ni, 25 µm ) , um Hochleistungs-Bipolarplatten (Widerstand <10 µΩ· cm ) , Dichtungen (Luftdichtheit >99,9 %) und Düsen (Erosionsbeständigkeit >50.000 Stunden) zu entwickeln, die den harten Arbeitsbedingungen von AWE/PEM/SOEC gerecht werden und zuverlässige Lösungen für die Produktion von grünem Wasserstoff bieten.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

**Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge**

**1. Übersicht über Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge**

**1.1 Definition und Eigenschaften von Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen**

**Definition :** Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge basieren auf Wolframkarbid (WC) und einer Bindephase (Co/Ni) (WC 85-94 Gew.-%, Bindephase 615 Gew.-%). Durch Präzisionsschleifen und PVD-Beschichtungen (z. B. TiN, Durch die Verwendung von AlTiN erreichen sie eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit. Sie eignen sich für Schnittgeschwindigkeiten von 500–2000 m/min.

**Merkmale von Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen aus Hartmetall :**

**Hohe Härte:** 1400–2200 HV, die Verschleißfestigkeit ist 510 -mal besser als bei Schnellarbeitsstahl (HSS, 800 HV).

**Warmhärte bei hohen Temperaturen :** Die Härte bleibt bei 800–1000 °C bei >1200 HV, geeignet für Trockenschnitt.

**Verschleißfestigkeit :** Verschleiß <0,05 mm<sup>3</sup>/h (ASTM G65), Standzeit 500–2000 Minuten.

**Schlagfestigkeit :** Biegefestigkeit 1,82,8 GPa, Bruchzähigkeit K<sub>IC</sub> 1015 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Anwendung :** Verarbeitung von Stahl (HRC 2060), Titanlegierungen (Ti6Al4V), Nickelbasislegierungen (Inconel 718), Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK) usw.

**1.2 Arten von Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen**

**Drehwerkzeug :** Außendrehen, Innenlochbearbeitung, Schnittgeschwindigkeit 500–1500 m/min.

**Fräser :** Planfräsen, Nutenfräsen, Schnittgeschwindigkeit 600–2000 m/min.

**Bohrer :** Tieflochbohren, Schnittgeschwindigkeit 300–800 m/min.

**Bohrwerkzeug :** Präzisionslochbearbeitung, Schnittgeschwindigkeit 400–1000 m/min.

**1.3 Vorteile von Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen**

**Effizienz:** Die Schnittgeschwindigkeit ist 510 -mal höher als bei HSS und die Verarbeitungseffizienz wird um 50100 % gesteigert.

**Lebensdauer :** Lebensdauer des beschichteten Hartmetallwerkzeugs 500–2000 Minuten (HSS 50–200 Minuten).

**Präzision :** Oberflächenrauheit Ra 0,10,4 µm, Bearbeitungsgenauigkeit ±0,01 mm.

**Anpassungsfähigkeit :** Geeignet für Trockenschneiden, Nassschneiden und die Verarbeitung verschiedener Materialien.

**2. Hartmetall - Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge**

**2.1 Zutaten**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

**Matrix :**

**WC** : 8594 Gew.-% , Korngröße 0,22  $\mu\text{m}$  .

Ultrafeines Korn (0,20,5  $\mu\text{m}$  ) : Härte 2000–2200 HV, ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, zum Schlichten geeignet .

Mittelgrobkorn (12  $\mu\text{m}$  ) : Zähigkeit KIC 1215  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  , geeignet für die Schruppbearbeitung.

**Co** : 615 Gew.-% verbessert die Zähigkeit und Schlagfestigkeit.

Niedriger Co-Gehalt (68 Gew. %) : Härte 1800–2200 HV, hohe Verschleißfestigkeit.

Hoher Co-Gehalt (1015 Gew.-%) : Biegefestigkeit 2,22,8 GPa , gute Schlagfestigkeit.

**Ni** : 0,5 Gew.-% ersetzt teilweise Co und verbessert die Korrosionsbeständigkeit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  <0,01 mm/Jahr).

**Zusatzstoff** :  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{VC}$  (0,21 Gew.-%), hemmt das Kornwachstum und erhöht die Härte um 510 %.

**Beschichtung :**

**Zinn** : Härte 2000–2300 HV, Reibungskoeffizient 0,4, Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

**TiAlN / AlTiN** : Härte 3000–3300 HV, Hitzebeständigkeit 900–1100  $^{\circ}\text{C}$ , Lebensdauer um 3050 % erhöht.

**CrN** : Härte 1800–2200 HV, hervorragende Korrosionsbeständigkeit, geeignet für die Edelstahlverarbeitung.

**DLC (diamantähnlicher Kohlenstoff)** : Härte 3000–4000 HV, Reibungskoeffizient <0,1, geeignet für CFK und Aluminiumlegierungen.

## 2.2 Gradientenstruktur von Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen

**Oberfläche** : niedriger Co-Gehalt (68 Gew. %), WC mit ultrafeinen Körnern (0,2–0,5  $\mu\text{m}$  ) , Härte 2000–2200 HV.

**Kern** : Hoher Co-Gehalt (1012 Gew. %), mittelgrobkörniges WC (12  $\mu\text{m}$  ) , Zähigkeit KIC 1215  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  .

**Vorteile :**

Die Oberflächenverschleißfestigkeit erhöht sich um 2030 % und die Kernschlagfestigkeit erhöht sich um 1520 %.

Die Gradientenschicht (0,52 mm) reduziert die Spannungskonzentration und verringert die Wahrscheinlichkeit eines Risswachstums um 20 %.

**Vorbereitung** : Schichtpulverpressen + heißisostatisches Pressen (HIP) Sintern (1350  $^{\circ}\text{C}$ , 120 MPa).

## 2.3 Leistungsanforderungen an Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge

Härte: 1800–2200 HV (GB/T 7997–2017).

Biegefestigkeit: 1,82,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit: 1015  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  .

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,05  $\text{mm}^3/\text{h}$  (ASTM G65).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Korrosionsbeständigkeit: Kühlmittel (pH 710) Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr.

Wärmeleitfähigkeit: 80100 W/ m· K , Wärmeableitung ist besser als bei HSS (20 W/ m· K ) .

### 3. Herstellungsprozess von Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeugen aus Hartmetall

#### 3.1 Pulveraufbereitung

##### Rohstoff :

WC: D50 0,22  $\mu\text{m}$  , Reinheit > 99,9 %.

Co/Ni: D50 12  $\mu\text{m}$  , Reinheit >99,9 %.

Cr3C2/VC: D50 0,51  $\mu\text{m}$  , Reinheit >99,9 %.

##### Kugelmahlen :

Ausrüstung: Planetenkugelmühle (ZrO<sub>2</sub>-Kugeln, Kugel-Material-Verhältnis 10:1).

Parameter: Geschwindigkeit 300 U/min, Zeit 1624 Stunden, Alkoholmedium.

Ergebnisse: Partikelgrößenabweichung <±0,1  $\mu\text{m}$  , Zusammensetzungsgleichmäßigkeit >95 %.

#### 3.2 Umformen

**Methode** : Kaltisostatisches Pressen (CIP) oder Formpressen .

**Ausrüstung** : CIP-Presse (250–300 MPa).

##### Parameter :

Druck: 250–300 MPa, Druck 60 Sekunden halten.

Form : Hochpräzise Stahlform (Abweichung <±0,05 mm), BN-geschmiert.

Rohlingsdichte: 60-70% der theoretischen Dichte (8,7-10,5 g/cm<sup>3</sup> ) .

**Ergebnisse** : Die Abweichung der Knüppelgröße betrug <±0,1 mm und die Rissrate < 1 %.

#### 3.3 Sintern

**Methode** : Vakuumsintern + HIP.

##### Ausrüstung :

Vakuum-Sinterofen (10<sup>-4</sup> 10<sup>-5</sup> Pa, Molybdän-Heizelemente).

HIP-Ofen ( Ar , 120–150 MPa).

##### Parameter :

##### Entparaffinierung :

Temperatur: 200–600 °C, Heizrate 3 °C/min.

Atmosphäre: H<sub>2</sub> (O<sub>2</sub> <5 ppm), Durchflussrate 10 l/min.

Vakuum: 10<sup>-2</sup> Pa, Restkohlenstoff <0,05 %.

##### Sintern :

Temperatur: 1350–1450 °C, Heizrate 58 °C/min.

Vakuum: 10<sup>-4</sup> 10<sup>-5</sup> Pa, 23 Stunden warm halten.

##### HÜFTE :

Temperatur: 1350°C, Druck 120 MPa ( Ar ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Warmhalten: 12 Stunden, Kühlen mit 15°C/min.

**Ergebnis :**

Dichte: 14.815,0 g/cm<sup>3</sup> ( GB /T 38502015, Abweichung <±0,05 g/cm<sup>3</sup> ).

Porosität: <0,001 % (A00B00C00, GB/T 51692013).

Härte: 1800–2200 HV, Schrumpfrate 1518 %.

### 3.4 Präzisionsbearbeitung

**Schleifen :**

Ausstattung: CNC-Schleifmaschine, Diamantschleifscheibe (Körnung 510 µ m ) .

Parameter: Drehzahl 3000 U/min, Vorschub 0,010,05 mm/Durchgang, Kühlmittel (auf Ölbasis).

Ergebnisse: Schneidkantenradius <5 µ m , Ra 0,10,2 µ m .

**Polieren :**

Werkzeuge: Diamantpolierpaste (13 µ m ) .

Parameter: Drehzahl 800 U/min, Druck 0,3 MPa.

Ergebnis: Ra <0,1 µ m, Reibungskoeffizient um 20 % verringert.

### 3.5 Beschichtung

**Methode :** PVD (Physical Vapour Deposition).

**Ausrüstung :** Magnetronspattern (Ti/Al/Cr-Target, Reinheit >99,99 %).

**Parameter :**

Beschichtung: TiAlN ( 35 µ m , Härte 3000–3300 HV).

Vakuum: 10<sup>-4</sup> Pa, Temperatur 300–400 °C.

Vorspannung: 100 V, Gas: Ar+N<sub>2</sub> (50 sccm ) .

Abscheiderate: 1 µ m /h.

**Ergebnis :**

Haftung: >80 N (Kratztest).

Hitzebeständigkeit: 900–1100 °C, Lebenserwartung um 30–50 % erhöht.

Reibungskoeffizient: <0,3, Verschleißfestigkeit um 2030 % erhöht.

### 3.6 Erkennung

**Mikrostruktur :** SEM (Korn 0,22 µ m ) , XPS (Zusammensetzungsabweichung <±0,1 Gew. %).

**Leistung :**

Härteprüfgerät: Abweichung < ±50 HV (ISO 6508).

Verschleißtest: ASTM G65, Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h.

Biegefestigkeit: GB/T 38512015, 1,82,8 GPa .

**Geometrie :** KMG (Koordinatenmessgerät), Schneidkantenabweichung <±0,005 mm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4. Leistungsanalyse

| Parameter                                 | Hartmetallwerkzeuge | Schnellarbeitsstahl (HSS) |
|-------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Härte (HV)                                | 18002200            | 800900                    |
| Biegefestigkeit ( GPa )                   | 1.82.8              | 34                        |
| Zähigkeit (KIC, MPa·m <sup>1/2</sup> )    | 1015                | 2050                      |
| Verschleißfestigkeit (mm <sup>3</sup> /h) | <0,05               | 0,20,5                    |
| Hitzebeständigkeit (°C)                   | 8001000             | 500600                    |
| Schnittgeschwindigkeit (m/min)            | 5002000             | 50200                     |
| Lebensdauer (Minuten)                     | 5002000             | 50200                     |
| Oberflächenrauheit (Ra, μm)               | 0.10.4              | 0,81,2                    |

#### Leistungshighlights :

**Verschleißfestigkeit :** Ultrafeinkörnige WC+TiAlN- Beschichtung, Verschleißverlust <0,05 mm<sup>3</sup>/h, Lebensdauer um das 510- **fache erhöht** .

**Hohe Temperaturbeständigkeit :** Härte >1200 HV bei 800–1000 °C, geeignet für Trockenschnitt (um 50 % reduzierter Kühlmittelbedarf).

**Schneidleistung :** Geschwindigkeit 500–2000 m/ **min** , Leistungssteigerung 50–100 % (gegenüber HSS).

**Präzision :** Ra 0,10,4 μm , Verarbeitungsgenauigkeit ±0,01 mm .

#### 5. Anwendungsszenarien

Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge eignen sich für die Luft- und Raumfahrt, den Automobilbau, die Formenbearbeitung und Energieanlagen. Im Folgenden finden Sie spezifische Werkzeuge, Testdaten und Auswahlvorschläge für typische und aktuelle Arbeitsbedingungen:

##### Luft- und Raumfahrt

**Materialien :** Titanlegierung (Ti6Al4V, HRC 36), Nickelbasislegierung (Inconel 718, HRC 45), CFK.

**Messer :**

##### Titandrehen :

Außendrehmeißel (Wendeschneidplatte, ISO CNMG120408), WC6%Co (Feinkorn, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 2000–2200 HV, PVD- AlTiN- Beschichtung (4 μm , Härte 3300 HV, Warmfestigkeit 1100°C). Hauptablenkwinkel 75°, Schneidenwinkel 6°, Schneidenradius 0,02 mm, 3D-Spanbrecher .

**Verfahren :** Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400 °C (10<sup>-5</sup> Pa, 2,5 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Kantenradius <5 μm , Ra 0,1 μm ) , PVD AlTiN

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(350 °C, Haftung >100 N).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 800 m/min, Vorschub 0,15 mm/U , Schnitttiefe 1,0 mm, Trockenschnitt.

**Testdaten** : Lebensdauer 1200 Minuten (HSS 150 Minuten), Ra 0,2 µ m , Genauigkeit ±0,01 mm, Schnittkraft 450 N (reduziert um 25 %), Verschleiß <0,05 mm<sup>3</sup> / h, Werkzeugspitzentemperatur 850°C.

**Auswahlempfehlung** : ultrafeinkörniges WC + wenig Co (6 Gew. % ) + AlTiN , CNMG120408MF, Hauptablenkwinkel 75°, Trockenschnitt oder MMS (0,1 L/h).

#### **Bohren von Hochtemperaturlegierungen :**

Vollbohrer (Ø 10 mm, Verhältnis Tiefe zu Durchmesser 5:1), WC12%Co (mittelgrobes Korn, D50 12 µ m , VC 0,5 Gew. %), Härte 1600–1800 HV, PVD- TiAlN- Beschichtung (4 µ m , warmfest 1100 °C). Spitzenwinkel 135°, Spiralwinkel 30°, Schneidenradius 0,05 mm, innere Kühlmittelbohrung Ø 1 mm.

**Verfahren** : Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 300 MPa, Sintern 1450 °C (10<sup>-5</sup> Pa, 3 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 2 Stunden), Schleifen (Kantenradius < 5 µ m ) , PVD TiAlN (400 °C, Haftung > 100 N).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 500 m/min, Vorschub 0,05 mm/U, Lochtiefe 50 mm, Hochdruck-Innenkühlung (20 bar, 5 l/min) .

**Testdaten** : Standzeit 800 Minuten (HSS 100 Minuten), Ra 0,3 µ m , Lochdurchmesser ±0,01 mm , Schnittkraft 550 N (reduziert um 21%), Verschleiß <0,05 mm<sup>3</sup>/h, keine **Ausbrüche** .

**Auswahlempfehlung** : mittelgrobkörniges WC + hoch Co (12 Gew. % ) + TiAlN , Ø 10 mm innengekühlter Bohrer, Spitzenwinkel 135°, Hochdruck-Innenkühlung.

#### **CFK -Fräsen :**

Mehrzahnfräser (Ø 10 mm, 6 Schneiden, versetzte Verzahnung ), WC8%Co (Feinstkorn, D50 0,20,5 µ m , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 2000–2200 HV, PVD-DLC-Beschichtung (3 µ m , Härte 3500 HV, Friktion 0,08). Spiralwinkel 45°, Schneidenneigungswinkel +5°, Schneidenradius 0,01 mm.

**Verfahren** : Kugelmahlen für 20 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1400 °C (10<sup>-5</sup> Pa, 2,5 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,08 µ m ) , PVD DLC (300 °C, Haftung > 80 N).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 2000 m / min, Vorschub 0,05 mm/Zahn, Schnitttiefe 2,0 mm, Trockenschnitt.

**Testdaten** : Lebensdauer 1500 Minuten (HSS 200 Minuten), Ra 0,15 µ m , keine Delamination, Schnittkraft 200 N (Reduktion um 33 %), Verschleiß < 0,03 mm<sup>3</sup>/h, Delaminationsrate < 1 % .

**Auswahlempfehlung** : Ultrafeinkorn WC+DLC, Ø 10 mm 6-Schneiden-Fräser, Spiralwinkel 45°, Trockenschnitt + Staubentfernung .

**Leistung** : Lebensdauer 800–2000 Minuten, Effizienz um 50 % erhöht, Ra 0,15–0,4 µ m .

**Fall** : Bearbeitung von Turbinenschaufeln (Ti6Al4V), Geschwindigkeit 1200 m/min, Lebensdauer 1500 Minuten, Genauigkeit ±0,01 mm.

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



### Automobilherstellung :

**Materialien :** hochfester Stahl (HRC 4050), Gusseisen (HB 200300).

### Drehen von hochfestem Stahl :

WC10%Co-Drehmeißel ( CrN 5  $\mu$  m ) , Geschwindigkeit 600–1000 m/min.

**Leistung :** Lebensdauer 800–1500 Minuten, Ra 0,1–0,3  $\mu$  m .

**Leistung :** Lebensdauer 800–1500 Minuten, Wartungskosten um 20 % reduziert.

**Fall :** Kurbelwellenbearbeitung, Geschwindigkeit 800 m/min, Lebensdauer 1200 Minuten, Effizienz um 30 % gesteigert.

### Schimmel Verarbeitung :

**Materialien :** Matrizenstahl (P20, HRC 3040), Edelstahl (316L), 3D-Druck 316L.

### Edelstahlfräsen :

Schaftfräser ( $\varnothing$  12 mm, 4 Schneiden) , WC10%Ni (Feinkorn, D50 0,51  $\mu$  m , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 1800–2000 HV, PVD- CrN- Beschichtung (5  $\mu$  m , Härte 2200 HV, Friktion 0,2) . Spiralwinkel 40°, Schneidenradius 0,03 mm, polierte Spannuten (Ra < 0,1  $\mu$  m ) .

### Technologie

Kugelmahlen für 18 h, Pressen bei 200 MPa, Sintern bei 1420 °C ( $10^{-4}$  Pa, 2 h), HIP bei 1350 °C (120 MPa, 1,5 h), Schleifen (Ra 0,1  $\mu$  m ) , PVD CrN (300 °C, Haftung > 80 N).

### Schnittdaten

Geschwindigkeit 1000 m/min, Vorschub 0,08 mm/Zahn, Schnitttiefe 0,5 mm, Kühlmittel auf Wasserbasis (pH 8, 10 L/min).

### Testdaten

Standzeit 1000 min (HSS 200 min), Ra 0,25  $\mu$  m , Genauigkeit  $\pm 0,008$  mm, Schnittkraft 300 N (reduziert um 25%), Verschleiß < 0,04 mm<sup>3</sup> / h, keine Aufbauschneidenbildung .

### Auswahlempfehlungen

WCNi (10 Gew. %) + CrN ,  $\varnothing$  12 mm 4-schneidiger Fräser, Spiralwinkel 40°, Nassschnitt + regelmäßige Reinigung.

### 3D-Druck 316L- Veredelung :

Kugelfräser ( $\varnothing$  6 mm, 2 Schneiden) , WC8%Co (ultrafeines Korn, D50 0,20,5  $\mu$  m , VC 0,5 Gew.- %), Härte 2000–2200 HV, PVD TiAlN+CrN -Beschichtung (5  $\mu$  m , Härte 3200 HV, Friktion 0,2). Kugelradius 3 mm , Spiralwinkel 35°, Schneidenradius 0,02 mm, polierte Nut (Ra < 0,1  $\mu$  m ) .

### Technologie

Kugelmahlen für 20 h, CIP 280 MPa, Sintern 1400 °C ( $10^{-5}$  Pa, 2,5 h), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 h), Schleifen (Ra 0,1  $\mu$  m ) , PVD TiAlN+CrN (350 °C, Haftung > 100 N).

### Schnittdaten

Geschwindigkeit 1200 m/min, Vorschub 0,03 mm/Zahn, Schnitttiefe 0,2 mm, MMS (0,1 L/h).

### Testdaten

Standzeit 1200 min (HSS 250 min), Ra 0,15  $\mu$  m ( initial Ra 15  $\mu$  m ) , Genauigkeit  $\pm 0,005$  mm, Schnittkraft 250 N (reduziert um 29%), Verschleiß < 0,04 mm<sup>3</sup>/h, kein Zusetzen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Auswahlempfehlungen

Ultrafeinkörniger WC+TiAlN+ CrN , Ø 6 mm, 2-schneidiger Kugelpfhräser, Spiralwinkel 35°, MMS+Schichtfräsen .

### Leistung

Lebensdauer: 1000–2000 Minuten, Genauigkeit:  $\pm 0,005-0,008$  mm.

### Fall

Verarbeitung Spritzgussform (316L), Geschwindigkeit 1000 m/min, Lebensdauer 1800 Minuten, Ra 0,2  $\mu$  m .

### Energieausrüstung :

**Materialien** : Hochtemperaturlegierung (GH4169), CFK.

### Messer :

**CFK -Fräsen** : WC8%Co-Fräser ( Ø 10 mm, DLC 3  $\mu$  m ) , Geschwindigkeit 2000 m/min, Standzeit 1500 Minuten, keine Delamination.

**Leistung** : Lebensdauer 1000–2000 Minuten, keine Delamination/ Absplitterung.

**Fall** : Bearbeitung von Windturbinenblättern (CFK), Geschwindigkeit 1500 m/min, Lebensdauer 2000 Minuten.

## 6. Optimierungsvorschläge

### Materialoptimierung :

**Titanlegierung** : ultrafeinkörniges WC (D50 0,20,5  $\mu$  m ) , Co 6 Gew. % , AlTiN 4  $\mu$  m , hitzebeständig bis 1100 °C.

**Edelstahl** : WCNi (10 Gew.- %), Cr3C2 0,5 Gew. - % , CrN 5  $\mu$  m , Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr.

**Hochtemperaturlegierung** : mittelgrobkörniges WC (12  $\mu$  m ) , Co 12 Gew. % , TiAlN 4  $\mu$  m , KIC >14 MPa·m<sup>1/2</sup> .

**CFK** : Ultrafeinkörniges WC (0,20,5  $\mu$  m ) , Co 8 Gew. % , DLC 3  $\mu$  m , Reibung <0,08.

**3D-Druckmetall** : ultrafeinkörniges WC (0,20,5  $\mu$  m ) , Co 8 Gew.- % , TiAlN+CrN 5  $\mu$  m , Genauigkeit  $\pm 0,005$  mm .

**Allgemeiner Zweck** : Cr3C2/VC 0,5 Gew. - % , Härte um 510 % erhöht.

### Prozessoptimierung :

**Sintern** : HIP 1350 °C, 120 MPa, Porosität <0,001 % , Konsistenz um 10 % erhöht.

**Schleifen** : CNC-Schleifmaschine, Diamantschleifscheibe (58  $\mu$  m ) , Schneidenradius <5  $\mu$  m , Ra <0,1  $\mu$  m .

### Beschichtung :

AlTiN (4  $\mu$  m , 350 °C, Vorspannung 100 V), Hitzebeständigkeit um 20 % erhöht.

CrN (5  $\mu$  m , 300 °C, Vorspannung 80 V), Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht.

DLC (3  $\mu$  m , 300 °C, Vorspannung 120 V), Reibungsreduzierung 50 % .

**3D -Druck** : SLM-Formen komplexer Werkzeuge (wie z. B. interne Kühlkanäle), Zykluszeit um 20 % reduziert, Genauigkeit von  $\pm 0,01$  mm.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### Geräteoptimierung :

Sinterofen: Temperaturregelung  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ , Vakuum  $10^{-5}$  Pa.

CNC-Schleifmaschine: Diamantschleifscheibe, Abweichung  $< \pm 0,005$  mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate  $12 \mu\text{m/h}$ , Dickenabweichung  $< \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

#### Anpassung der Arbeitsbedingungen :

**Titanlegierung** : Trockenschnitt, AlTiN- **Beschichtung** , Geschwindigkeit 800–1200 m/min, Hauptablenkwinkel  $75^{\circ}$ .

**Edelstahl** : Nassschneiden, CrN- Beschichtung, Geschwindigkeit 600–1000 m/min, Spiralwinkel  $40^{\circ}$ .

**Hochtemperaturlegierung** : **Innenkühlung** (20 bar), TiAlN- Beschichtung, Geschwindigkeit 500–800 m/min, Spitzenwinkel  $135^{\circ}$ .

**CFK** : Trockenschnitt, DLC-Beschichtung, Geschwindigkeit 1500–2000 m/min, versetzte Zähne.

**3D-Druck von Metall** : MQL ( $0,1 \text{ l/h}$ ), TiAlN+CrN -Beschichtung, Geschwindigkeit 1000–1200 m/min, Kugelpfandwerkzeug.

#### Prüfung und Verifizierung :

**Mikrostruktur** : SEM (Korn  $0,22 \mu\text{m}$  ), EBSD (Korngranzenspannung  $< 5\%$ ).

**Leistung** : ASTM G65 (Verschleißrate  $< 0,030,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ ), Hochtemperaturhärte ( $> 1200 \text{ HV}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ).

#### Schneidtest :

Schneidkraft: 200550 N (nach unten 2033%).

Lebensdauer: 800–2000 Minuten (4,88- fach erhöht) .

Oberfläche: Ra  $0,150,3 \mu\text{m}$  , Genauigkeit  $\pm 0,0050,01 \text{ mm}$ .

Fehler: VB  $< 0,10,2 \text{ mm}$ , kein Absplittern/Delaminieren.

### 7. Normen und Spezifikationen

**GB/T 183762014** : Porosität  $< 0,01\%$ , Gleichmäßigkeit  $> 95\%$ .

**GB/T 38502015** : Dichte  $14.515,0 \text{ g/cm}^3$  , Abweichung  $< \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

**GB/T 38512015** : Biegefestigkeit  $1,82,8 \text{ GPa}$  .

**GB/T 79972017** : Härte  $14002200 \text{ HV}$ , Abweichung  $< \pm 50 \text{ HV}$ .

**ASTM G 65** : Verschleißrate  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ .

**ISO 6508** : Härteprüfung, Abweichung  $< \pm 50 \text{ HV}$ .

**ISO 1832** : Werkzeuggeometrie, Schneidkantenabweichung  $< \pm 0,01 \text{ mm}$ .

**ISO 8688** : Werkzeugstandzeittest, Schnittzeit  $> 500$  Minuten.

### 8. Fazit

Das Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeug aus Hartmetall erreicht eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust  $< 0,030,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ ), Warmhärte bei hohen Temperaturen (800–1000  $^{\circ}\text{C}$ ) und Schnittstabilität (Lebensdauer 800–2000 Minuten) durch die Optimierung der Materialien (ultrafeinkörniges WC  $0,20,5 \mu\text{m}$  , niedriger Co-Gehalt 68 Gew .-% ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

TiAlN / CrN /DLC-Beschichtung 35  $\mu\text{m}$  ) und fortschrittliche Herstellungsverfahren (HIP-Sintern 1350 °C, 120 MPa, PVD-Beschichtung 300–400 °C) . Das Werkzeug eignet sich für die Luft- und Raumfahrt (Titanlegierungen, Nickellegierungen, CFK), den Automobilbau (hochfester Stahl), den Formenbau (Edelstahl, 3D-Druckmetall) und den Energiesektor (CFK) sowie weitere Branchen. Es bietet eine Schnittgeschwindigkeit von 500–2000 m/min, eine um 50 % höhere Bearbeitungseffizienz und eine Genauigkeit von  $\pm 0,0050,01$  mm sowie einen Ra-Wert von 0,150,4  $\mu\text{m}$  . Durch die Optimierung von ultrafeinen Körnern, Verbundbeschichtungen, 3D-Druck und Präzisionsschleifen können die Kosten weiter gesenkt (100.500 Yuan pro Stück) und die Leistung verbessert werden. Die Herausforderungen liegen in der Verarbeitungsschwierigkeit (Diamantschleifkosten steigen um 20 %) und der Beschichtungshaftung (> 80 N erforderlich) .

CTIA GROUP LTD verwendet Nano-WC-Pulver (D50 0,20,5  $\mu\text{m}$  ) , HIP-Sintern (Porosität <0,001 %) und mehrlagige PVD-Beschichtung ( TiAlN + CrN , 57  $\mu\text{m}$  ) , um Hochleistungs-Drehwerkzeuge, Fräser und Bohrer zu entwickeln, die den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (Lebensdauer > 1500 Minuten), der Automobilindustrie (Effizienzsteigerung um 30 %) und der Formenherstellung (Genauigkeit  $\pm 0,005$  mm) gerecht werden. Die Produkte werden durch SEM, ASTM G65 und ISO 1832 geprüft, um eine stabile Leistung zu gewährleisten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



**Anhang:**

**Hartmetall-Kugelpfäßer**

**1. Übersicht**

Hartmetall-Kugelpfäßer sind Fräswerkzeuge mit Wolfram-Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) als Schneidkörper oder Schneidmaterial. Der Fräskopf ist kugelförmig und eignet sich für die Bearbeitung komplexer dreidimensionaler Oberflächen, Hohlräume, Formen und Präzisionsteile. Dank seiner hohen Härte (HV 1600–2000), seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit und seiner hohen Temperaturbeständigkeit (Haltefestigkeit 600–800 °C) eignet er sich für die Bearbeitung von Stahl, Gusseisen, Edelstahl, Aluminiumlegierungen und Hochtemperaturlegierungen und erfüllt die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, des Formenbaus und der Medizintechnik an hochpräzise (IT6–IT7) und hochwertige Oberflächenbearbeitung.

**1. Materialien und Herstellung**

**Materialzusammensetzung:**

Es besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 80–90 %) und Bindemitteln (z. B. Co und Ni, 5–15 %). TiC und TaC werden zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit hinzugefügt. Ein hoher Co-Gehalt (z. B. WC-10Co) erhöht die Zähigkeit und eignet sich für intermittierendes Schneiden. Ni-basierte Legierungen sind korrosionsbeständig und für die Nassbearbeitung geeignet.

**Herstellungsverfahren:**

**Pulvermetallurgie**

WC- und Co-Pulver (Partikelgröße 0,4–1,5 µm) mischen, in eine Pressform pressen (Druck 300–500 MPa) und bei 1350–1450 °C im Vakuum sintern, um eine Härte von HV1700–1900 zu erreichen.

**Präzisionsschleifen**

Der kugelförmige Schneidkopf und die Spiralnut werden mit einer Diamantschleifscheibe bearbeitet, wobei die Kantenschärfe <5 µm und die Oberflächenrauheit Ra <0,2 µm beträgt, wodurch Schnittgenauigkeit und gleichmäßige Spanabfuhr gewährleistet werden.

**Beschichtungstechnologie**

Auftragen einer PVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN, DLC) mit einer Dicke von 2–4 µm kann den Reibungskoeffizienten auf 0,15–0,3 reduzieren und die Werkzeuglebensdauer um 50–100 % verlängern.

**Vorteile**

Im Vergleich zu Kugelfräsern aus Schnellarbeitsstahl haben Kugelfräser aus Hartmetall eine 2–3-mal höhere Schnittgeschwindigkeit (50–200 m/min) und eine 3–5-mal längere Lebensdauer.

**3. Typen und Anwendungen**

**Standard-Kugelpfäßer**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Durchmesser 2–20 mm, 2–4 Klingen, geeignet für die Bearbeitung von Formhohlräumen und gekrümmten Oberflächen, wie z. B. Autolampenformen (Präzision IT7).

#### **Kugelpkopffräser mit langem Hals**

Hohes Aspektverhältnis ( $L/D > 5$ ), wird für die Bearbeitung tiefer Hohlräume verwendet, beispielsweise für Rotorblattformen für die Luftfahrt (Tiefe 50–100 mm).

#### **Mikro-Kugelpkopffräser**

Durchmesser 0,1–2 mm, geeignet für die Präzisionsbearbeitung, beispielsweise von medizinischen Implantaten (Oberflächenrauheit  $Ra < 0,2 \mu m$ ).

#### **Kugelpkopffräser mit hoher Härte**

Materialien mit einer Bearbeitungshärte von HRC50–65, geeignet für Formstahl und Hochtemperaturlegierungen.

#### **Anwendungsbeispiele:**

Luft- und Raumfahrt: Bearbeitung von Turbinenschaufeln aus Titanlegierungen, Schnittgeschwindigkeit 80 m/min, Toleranz  $< 5 \mu m$ .

Automobilindustrie: Fräsen von Kunststoffformoberflächen mit einer jährlichen Produktion von über 5 Millionen Stück und einer Standzeit von 20.000 Stück/ Blatt.

Medizinbranche: Bearbeitung von orthopädischen Implantaten, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,1 \mu m$ , Präzision IT6.

## **4. Technische Merkmale**

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 50–200 m/min, Vorschub 0,02–0,2 mm/Zahn, Bearbeitungseffizienz um 30–50 % gesteigert.

Hohe Präzision: Maßtoleranz  $< 5 \mu m$ , Oberflächenrauheit  $Ra$  0,2–0,4  $\mu m$ , entspricht der Norm ISO 1832.

Haltbarkeit: Beschichtete Kugelpkopffräser haben eine Lebensdauer von 5.000–10.000 Stück und die Häufigkeit des Werkzeugwechsels wird um 50 % reduziert.

Recyclingfähigkeit: Altwerkzeuge können durch Zinkschmelzen oder chemische Verfahren recycelt werden, mit einer Wolfram-Rückgewinnungsrate von  $> 90 \%$  und einer Kostenreduzierung von 30–40 %.

## **5. Entwicklungstrends**

### **Intelligente Optimierung**

In Kombination mit KI zur Optimierung des Werkzeugkopfradius ( $R_{0,5}$ – $R_{10}$ ) und des Schneidpfads wird der Bearbeitungsfehler um 25 % reduziert.

### **Grüne Fertigung**

Erforschen und entwickeln Sie Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ( $< 5 \%$ ), um die Umweltbelastung zu verringern; fördern Sie die elektrochemische Recyclingtechnologie, um die Emissionen von Abwasser um 60 % zu senken.

### **Fortschrittliche Beschichtungen**

Entwickeln Sie Nanokompositbeschichtungen (wie TiAlN /DLC), um die Verschleißfestigkeit um

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

60 % zu erhöhen und die Lebensdauer um das Zweifache zu verlängern.

Leistungsstarkes Design

Optimierter Spiralwinkel (30–40°) und Spanleitstufen reduzieren die Schnittkräfte um 20 %, sodass es für die Hochgeschwindigkeits- und Trockenbearbeitung geeignet ist.

Hartmetall-Kugelfräser haben sich aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Präzision zu Kernwerkzeugen für die Bearbeitung komplexer Oberflächen und Präzisionsbearbeitung entwickelt und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, dem Formenbau und der Medizintechnik. Durch intelligente Optimierung, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Hartmetall-Kugelfräser künftig die Verarbeitungseffizienz weiter steigern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung unterstützen. Dies trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Fertigung bei.

**Anhang:**

**Hartmetall-Schaftfräser**

**1. Übersicht**

Hartmetall-Schaftfräser sind vertikale Fräswerkzeuge mit Wolfram-Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) als Schneidkörper oder Schneidmaterial. Sie verfügen über mehrere Schneidkanten und werden zur Bearbeitung von Ebenen, Nuten, Stufen, Hohlräumen und komplexen gekrümmten Oberflächen eingesetzt. Ihre hohe Härte (HV1600–2000), ihre ausgezeichnete Verschleißfestigkeit und ihre hohe Temperaturbeständigkeit (Haltefestigkeit 600–800 °C) machen sie zur Bearbeitung von Stahl, Gusseisen, Edelstahl, Aluminiumlegierungen und Hochtemperaturlegierungen geeignet und erfüllen die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, des Formenbaus und des Präzisionsmaschinenbaus an hochpräzise (IT6–IT8) und hocheffiziente Bearbeitung.

**2. Materialien und Herstellung**

**Materialzusammensetzung**

Es besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 80–90 %) und Bindemitteln (z. B. Co und Ni, 5–15 %). TiC und TaC werden zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit hinzugefügt. Ein hoher Co-Gehalt (z. B. WC-10Co) erhöht die Zähigkeit und eignet sich für intermittierendes Schneiden. Ni-basierte Legierungen sind korrosionsbeständig und für die Nassbearbeitung geeignet.

**Herstellungsprozess**

Pulvermetallurgie: WC- und Co-Pulver mischen (Partikelgröße 0,5–2 µm), Pressformen (Druck 300–500 MPa), Vakuumsintern bei 1350–1450 °C, und die Härte erreicht HV1700–1900.

Präzisionsschleifen: Zur Bearbeitung der Klinge und der Spiralnut wird eine Diamantschleifscheibe mit einer Kantenschärfe von <5 µm und einer Oberflächenrauheit Ra <0,2 µm verwendet, um einen gleichmäßigen Spanabfluss zu gewährleisten.

Beschichtungstechnologie: Auftragen einer PVD- oder CVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN, TiSiN) mit einer Dicke von 2–5 µm reduzieren den Reibungskoeffizienten auf 0,2–0,3 und verlängern die Werkzeuglebensdauer um 50–100 %.

Vorteile: Hartmetall-Schaftfräser schneiden 2–4 Mal schneller (50–250 m/min) und halten 3–5 Mal länger als HSS-Schaftfräser.

**3. Typen und Anwendungen**

**Hartmetall-Flachschafffräser**

Für die Plan- und Nutbearbeitung, geeignet für Automobilformhohlräume (Tiefe 10–50 mm, Genauigkeit IT7).

**Hartmetall-Rundfräser**

Das Arc Blade eignet sich für die Bearbeitung gekrümmter Oberflächen und Konturen und wird in Turbinenschaufeln für die Luftfahrt mit einer Genauigkeit von IT6 eingesetzt.

**Hartmetall-Kugelpkopffräser**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



Bearbeitung komplexer 3D-Oberflächen, wie etwa medizinischer Implantatformen, mit einer Oberflächenrauheit  $Ra < 0,4 \mu m$ .

### **Hartmetall-Schrupfräser**

Der große Drallwinkel ( $35-45^\circ$ ) und die wellenförmige Schneide eignen sich für einen effizienten Materialabtrag, beispielsweise bei Rumpfteilen aus Aluminiumlegierungen.

Anwendungsbeispiele:

Automobilindustrie: Bearbeitung von Getriebegehäusenuten, mit einer Jahresproduktion von über 10 Millionen Stück und einer Standzeit von 50.000 Stück/ Blatt.

Luft- und Raumfahrt: Fräsen eines Gehäuses aus Titanlegierung, Schnittgeschwindigkeit 100 m/min, Toleranz  $< 8 \mu m$ .

Formenbau: Durch die Verarbeitung von hochhartem Formenstahl (HRC50-60) kann die Werkzeuglebensdauer um 40 % erhöht werden.

## **2. Technische Merkmale**

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 50–250 m/min, Vorschub 0,05–0,3 mm/Zahn, Bearbeitungseffizienz um 40–60 % gesteigert.

Hohe Präzision: Maßtoleranz  $< 8 \mu m$ , Oberflächenrauheit  $Ra 0,4-0,8 \mu m$ , entspricht der Norm ISO 1832.

Haltbarkeit: Beschichtete Schaftfräser haben eine Lebensdauer von 5.000–15.000 Stück und die Häufigkeit des Werkzeugwechsels wird um 50 % reduziert.

Recyclingfähigkeit: Altwerkzeuge können durch Zinkschmelzen oder chemische Verfahren recycelt werden, mit einer Wolfram-Rückgewinnungsrate von  $> 90 \%$  und einer Kostenreduzierung von 30–40 %.

## **5. Entwicklungstrends**

Intelligente Optimierung: Durch die Kombination mit KI zur Optimierung der Kantenanzahl (2–6 Kanten) und der Schnittparameter wird der Bearbeitungsfehler um 30 % reduziert.

Umweltfreundliche Fertigung: Erforschung und Entwicklung von Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ( $< 5 \%$ ) zur Reduzierung der Umweltbelastung; Förderung der Recyclingtechnologie für ionische Flüssigkeiten zur Reduzierung der Abwasseremissionen um 60 %.

Fortschrittliche Beschichtungen: Entwicklung von Nanokompositbeschichtungen (wie TiAlN /DLC), die die Verschleißfestigkeit um 60 % erhöhen und die Lebensdauer um das Zweifache verlängern.

Hochleistungsdesign: Optimierter Spiralwinkel ( $30-45^\circ$ ) und Spanleitstufen reduzieren die Schnittkräfte um 20 %, geeignet für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.

Hartmetallfräser haben sich aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Präzision zu zentralen Fräs Werkzeugen entwickelt und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und im Formenbau. Durch intelligente Optimierung, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Hartmetallfräser künftig die Verarbeitungseffizienz weiter steigern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung fördern.

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

Dies trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Fertigung bei.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

**Anhang:**

**Hartmetall-Mehrzahnfräser**

**1. Hartmetall-Mehrzahnfräser**

Hartmetall-Mehrzahnfräser sind Schneidwerkzeuge mit Wolframkarbid (z. B. WC-Co, WC-Ni) als Fräserkörper oder Klingenmaterial mit mehreren Schneidzähnen. Sie werden häufig zum Fräsen von Ebenen, Nuten, Stufen, gekrümmten Flächen und komplexen Oberflächen eingesetzt. Dank seiner hohen Härte (HV 1600–2000), seiner hervorragenden Verschleißfestigkeit und hohen Temperaturbeständigkeit (Festigkeitserhaltung 600–800 °C) eignen sie sich für die Bearbeitung von Stahl, Gusseisen, Edelstahl, Aluminiumlegierungen und Hochtemperaturlegierungen und erfüllen die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, des Formenbaus und der Energiebranche an hochpräzise (IT6–IT8) und hocheffiziente Bearbeitung.

**2. Werkstoffe und Herstellung von Hartmetall-Mehrzahnfräsern**

Materialzusammensetzung: Besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 80–90 %) und Bindemittel (z. B. Co, Ni, 5–15 %). TiC und TaC erhöhen die Verschleißfestigkeit. Ein hoher Co-Gehalt (z. B. WC-10Co) verbessert die Zähigkeit und eignet sich für das intermittierende Fräsen. Ni-Legierungen sind korrosionsbeständig und für die Nassbearbeitung geeignet.

Herstellungsverfahren:

Pulvermetallurgie: WC- und Co-Pulver mischen (Partikelgröße 0,5–2 µm), Pressformen (Druck 300–500 MPa), Vakuumsintern bei 1350–1450 °C, und die Härte erreicht HV1700–1900.

Präzisionsschleifen: Zur Bearbeitung der Zähne und Nuten werden CBN- oder Diamantschleifscheiben mit einer Kantenschärfe < 5 µm und einer Oberflächenrauheit Ra < 0,2 µm verwendet, um einen gleichmäßigen Spanabfluss zu gewährleisten.

Beschichtungstechnologie: Auftragen einer PVD- oder CVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN, TiSiN) mit einer Dicke von 2–5 µm reduzieren den Reibungskoeffizienten auf 0,2–0,3 und verlängern die Werkzeuglebensdauer um 50–100 %.

Vorteile: Im Vergleich zu Schnellarbeitsstahlfräsern haben Hartmetall-Mehrzahnfräser eine 2-4 mal höhere Schnittgeschwindigkeit (50-250 m/min) und eine 3-5 mal längere Lebensdauer.

**3. Arten und Anwendungen von Hartmetall-Mehrzahnfräsern**

**Hartmetall- Mehrzahnfräser**

Das Mehrzahndesign (4–8 Zähne) eignet sich für die Seiten- und Nutbearbeitung, beispielsweise für Formhohlräume in der Automobilindustrie (Tiefe 10–50 mm, Genauigkeit IT7).

**Hartmetall-Mehrzahn -Planfräser**

Großer Durchmesser und mehrere Zähne (6–12 Zähne) für eine effiziente Bearbeitung ebener Oberflächen, geeignet für Tragflächenplatten aus Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt (Oberflächenrauheit Ra < 0,8 µm).

**Hartmetall-Mehrzahn -Rundfräser**

Das Arc Blade eignet sich für die Bearbeitung gekrümmter Oberflächen und wird in

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Turbinenschaufeln mit einer Genauigkeit von IT6 eingesetzt.

#### **Hartmetall-Mehrzahn- Keilnutfräser**

Bearbeitung hochpräziser Keilnuten, beispielsweise für Hauptwellen von Windkraftanlagen ( Nutbreite 5–20 mm, Toleranz < 10 µm).

Anwendungsbeispiele:

Automobilindustrie: Bearbeitung von Motorzylinderkopfhobeln mit einer Jahresproduktion von über 20 Millionen Stück und einer Standzeit von 50.000 Stück/ Blatt.

Luft- und Raumfahrt: Fräsen eines Gehäuses aus Titanlegierung, Schnittgeschwindigkeit 100 m/min, Oberflächenrauheit Ra < 0,4 µm.

Formenbau: Durch die Verarbeitung von hochhartem Formenstahl (HRC50-60) kann die Werkzeuglebensdauer um 40 % erhöht werden.

#### **4. Technische Merkmale des Hartmetall-Mehrzahnfräasers**

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 50–250 m/min, Vorschub 0,05–0,3 mm/Zahn, Bearbeitungseffizienz um 40–60 % gesteigert.

Hohe Präzision: Maßtoleranz <8 µm, Oberflächenrauheit Ra 0,4–0,8 µm, entspricht der Norm ISO 1832.

Haltbarkeit: Die Lebensdauer beschichteter Fräser beträgt 5.000–15.000 Stück und die Häufigkeit des Werkzeugwechsels wird um 50 % reduziert.

Recyclingfähigkeit: Altwerkzeuge können durch Zinkschmelzen oder chemische Verfahren recycelt werden, wobei die Wolframrückgewinnungsrate über 90 % liegt und die Kosten um 30–40 % gesenkt werden.

#### **5. Entwicklungstrend bei Hartmetall-Mehrzahnfräsern**

##### **Intelligente Optimierung**

In Kombination mit der KI-Optimierung der Zähnezahl (4–12 Zähne) und der Schnittparameter wird der Bearbeitungsfehler um 30 % reduziert.

##### **Grüne Fertigung**

Entwicklung von Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt (<5 %) zur Reduzierung der Umweltbelastung; Förderung der Recyclingtechnologie für ionische Flüssigkeiten zur Reduzierung der Abwasseremissionen um 60 %.

##### **Fortschrittliche Beschichtungen**

Entwickeln Sie Nanokompositbeschichtungen (wie TiAlN /Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), um die Verschleißfestigkeit um 60 % zu erhöhen und die Lebensdauer um das Zweifache zu verlängern.

##### **Modularer Aufbau**

Fördern Sie die Standardisierung von Wendeschneidplatten und Messerköpfen (ISO 1832) und senken Sie so die Lagerkosten um 20 %.

Hartmetall-Mehrzahnfräser haben sich aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und

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



Präzision zu Kernwerkzeugen für die Fräsbearbeitung entwickelt und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und im Formenbau. Durch intelligente Optimierung, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Hartmetall-Mehrzahnfräser künftig die Bearbeitungseffizienz weiter verbessern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung fördern. Dies trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Fertigung bei.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Anhang:**

**Hartmetall-Vollbohrer**

**1. Übersicht über Hartmetall-Vollbohrer**

Vollhartmetallbohrer sind Bohrwerkzeuge, die hauptsächlich aus Hartmetall auf Wolframbasis (z. B. WC-Co, WC-Ni) bestehen und häufig in der Lochbearbeitung wie Bohren, Reiben und Reiben verwendet werden. Aufgrund seiner hohen Härte (HV1600–2000), hervorragenden Verschleißfestigkeit und hohen Temperaturbeständigkeit (bei 600–800 °C bleibt die Festigkeit erhalten) eignen sie sich für die Bearbeitung von Stahl, Gusseisen, Edelstahl, Aluminiumlegierungen und Hochtemperaturlegierungen und erfüllen die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt-, Automobil-, Formenbau- und Energiebranche an eine hochpräzise (IT7–IT9) und hocheffiziente Lochbearbeitung.

**2. Werkstoffe und Herstellung von Hartmetallbohrern**

**Materialzusammensetzung**

Es besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 85–95 %) und Bindemittel (z. B. Co, 5–12 %). TiC und VC werden hinzugefügt, um die Verschleißfestigkeit zu verbessern. Ein hoher Co-Gehalt (z. B. WC-10Co) verbessert die Zähigkeit und eignet sich für intermittierendes Schneiden; ein niedriger Co-Gehalt (z. B. WC-6Co) erhöht die Härte und eignet sich für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.

**Herstellungsprozess**

Pulvermetallurgie: WC- und Co-Pulver mischen (Partikelgröße 0,4–1,5 µm), Pressformen (Druck 300–500 MPa), Vakuumintern bei 1350–1450 °C, und die Härte erreicht HV1800–2000.

Präzisionsschleifen: Zum Bearbeiten der Bohrerkannte und der Spiralnut wird eine Diamantschleifscheibe verwendet. Die Kantenschärfe beträgt <5 µm und die Oberflächenrauheit Ra <0,2 µm, wodurch ein gleichmäßiger Spanabfluss gewährleistet wird.

Beschichtungstechnologie: Auftragen einer PVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN) mit einer Dicke von 2–4 µm reduziert den Reibungskoeffizienten auf 0,2–0,3 und verbessert die Verschleißfestigkeit um 50–80 %.

**Vorteile**

Im Vergleich zu Schnellarbeitsstahlbohrern haben Vollhartmetallbohrer eine 2–3 mal höhere Schnittgeschwindigkeit (30–150 m/min) und eine 4–6 mal längere Lebensdauer.

**3. Arten und Anwendungen von Hartmetall-Vollbohrern**

**Vollhartmetall- Spiralbohrer**

Standard-Spiraldesign, geeignet für die allgemeine Lochbearbeitung, wie z. B. Löcher im Zylinderblock von Automotoren (Durchmesser 5–50 mm, Genauigkeit IT8).

**Vollhartmetall- Zentrierbohrer**

Wird zum Positionieren und Vorbohren sowie zur Bearbeitung von Mittellöchern von

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Luftfahrtteilen verwendet, Genauigkeit IT7.

#### **Hartmetall-Vollhartmetall -Tieflochbohrer**

Hohes Längenverhältnis ( $L/D > 5$ ), mit internem Kühlkanal, Bearbeitung tiefer Löcher von Hydraulikventilkörpern (Tiefe 100–500 mm).

#### **Hartmetall-Integral- Stufenbohrer**

Führen Sie die mehrstufige Lochverarbeitung auf einmal durch, geeignet für Formteile, und steigern Sie die Effizienz um 30 %.

#### **Anwendungsfälle von Hartmetall-Integralbohrern :**

Automobilindustrie: Bearbeitung von Getriebegehäusebohrungen, mit einer Jahresproduktion von über 100 Millionen Stück und einer Bohrlebensdauer von 20.000 Bohrungen/ Blatt.

Luft- und Raumfahrt: Bohren von Löchern in Gehäusen aus Titanlegierungen, Schnittgeschwindigkeit 60 m/min, Lochdurchmessertoleranz  $<10\ \mu\text{m}$ .

Energiebranche: Bearbeitung von Spindellöchern für Windkraftanlagen, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,8\ \mu\text{m}$ , Lebensdauer um 50 % erhöht.

#### **4. Technische Merkmale von Hartmetall-Integralbohrern**

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 30–150 m/min, Vorschub 0,05–0,3 mm/U, Bearbeitungseffizienz um 40 % gesteigert.

Hohe Präzision: Öffnungstoleranz  $<8\ \mu\text{m}$ , Rundheitsfehler  $<5\ \mu\text{m}$ , entspricht ISO 8015-Standards.

Haltbarkeit: Beschichtete Bohrer haben eine Lebensdauer von 10.000–20.000 Löchern und die Häufigkeit des Werkzeugwechsels wird um 60 % reduziert.

Recyclingfähigkeit: Gebrauchte Bohrer können durch Zinkschmelzen oder chemische Verfahren recycelt werden, wobei die Wolfram-Rückgewinnungsrate über 90 % liegt und die Kosten um 30–40 % gesenkt werden.

#### **5. Entwicklungstrend des Hartmetall-Integralbohrers**

Intelligentes Design: In Kombination mit KI zur Optimierung des Spiralwinkels ( $25\text{--}35^\circ$ ) und der Schnittparameter wird der Bearbeitungsfehler um 25 % reduziert.

Umweltfreundliche Fertigung: Forschung und Entwicklung von Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ( $<5\%$ ) zur Reduzierung der Umweltbelastung; Förderung der elektrochemischen Recyclingtechnologie zur Reduzierung der Abwasseremissionen um 60 %.

Fortschrittliche Beschichtungen: Entwicklung von Nano-Mehrschichtbeschichtungen (wie TiAlN/DLC), die die Verschleißfestigkeit um 60 % verbessern und die Lebensdauer um das Zweifache verlängern.

Innere Kühlmitteltechnologie: Optimiertes Design der inneren Kühlmittelkanäle (Druck 10–20 bar), um 30 % reduzierte Schnitttemperatur, geeignet für Trocken- oder Minimalschmierungsbearbeitung.

Aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Präzision eignen sie sich hervorragend für die Lochbearbeitung und finden breite Anwendung in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Energiebranche. Durch intelligentes Design, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Vollhartmetallbohrer künftig die

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



Bearbeitungseffizienz weiter verbessern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung fördern.  
Dies trägt dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Produktion zu steigern.

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

1

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

**Hartmetall-Außendrehmeißel**

**1. Übersicht über Hartmetall-Außendrehwerkzeuge**

Hartmetall-Außendrehwerkzeuge sind Schneidwerkzeuge mit Wolfram-basiertem Hartmetall (z. B. WC-Co, WC-Ni) als Werkzeugkopfmaterial und werden häufig zum Drehen von äußeren zylindrischen Oberflächen, Stirnflächen, Stufen und Nuten verwendet. Aufgrund ihrer hohen Härte (HV1600–2000), hervorragenden Verschleißfestigkeit und hohen Temperaturstabilität (Festigkeitserhaltung 600–800 °C) eignen sie sich für die Bearbeitung von Kohlenstoffstahl, legiertem Stahl, Edelstahl, Gusseisen und Hochtemperaturlegierungen und erfüllen die Anforderungen der Automobil-, Luft- und Raumfahrt-, Formenbau- und allgemeinen Maschinenbauindustrie an hochpräzise (IT6–IT8) und hocheffiziente Bearbeitung.

**2. Werkstoffe und Herstellung von Hartmetall-Außendrehwerkzeugen**

Materialzusammensetzung: Besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 80–90 %) und Bindemittel (z. B. Co, Ni, 5–15 %). TiC und TaC erhöhen die Verschleißfestigkeit. Co verbessert die Zähigkeit (z. B. WC-8Co für die Grobbearbeitung), Ni verbessert die Korrosionsbeständigkeit (geeignet für Nassschnitt).

Herstellungsverfahren:

Pulvermetallurgie: WC- und Co-Pulver mischen (Partikelgröße 0,5–2 µm), Pressformen (Druck 200–400 MPa), Vakuumsintern bei 1350–1450 °C, und die Härte erreicht HV1700–1900.

Präzisionsschleifen: Zur Bearbeitung des Schneidkopfes wird eine Diamantschleifscheibe mit einer Kantenschärfe von <5 µm und einer Oberflächenrauheit Ra <0,2 µm verwendet, um die Schnittgenauigkeit zu gewährleisten.

Beschichtungstechnologie: Auftragen einer PVD- oder CVD-Beschichtung (wie TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) mit einer Dicke von 2–6 µm reduzieren den Reibungskoeffizienten auf 0,2–0,3 und verlängern die Werkzeuglebensdauer um 50–80 %.

Vorteile: Im Vergleich zu Schnellarbeitsstahl-Drehwerkzeugen haben Hartmetall-Drehwerkzeuge eine 2-4 mal höhere Schnittgeschwindigkeit (50-200 m/min) und eine 3-6 mal längere Lebensdauer.

**3. Arten und Anwendungen von Hartmetall-Außendrehwerkzeugen**

**Hartmetall-Außendrehmeißel - Wendeschneidplatten-Drehmeißel**

Die Klingen sind austauschbar und vielseitig einsetzbar, sodass sie sich für die Massenproduktion eignen, beispielsweise für die Bearbeitung von Autokurbelwellen (Durchmesser 50–200 mm, Präzision IT7).

**Hartmetall-Außendrehmeißel - geschweißter Drehmeißel**

Der Schneidkopf ist mit dem Stahlschneidkörper verschweißt, was kostengünstig ist und sich für kleine und mittelgroße Verarbeitungsanlagen zur Bearbeitung des äußeren Kreises des Pumpenkörpers eignet.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### Hartmetall-Außendrehmeißel - Integraldrehmeißel

Der Schneidkopf ist in den Schneidkörper integriert, der für die hochpräzise Bearbeitung geeignet ist, beispielsweise von Turbinenwellen in der Luftfahrt (Durchmesser 20–100 mm, Präzision IT6).

Anwendungsbeispiele:

Automobilindustrie: Bearbeitung von Motorzylindern, mit einer Jahresproduktion von über 50 Millionen Stück und einer Standzeit von 10.000 Stück/ Blatt.

Luft- und Raumfahrt: Drehen einer Turbinenscheibe aus Titanlegierung, Schnittgeschwindigkeit 80 m/min, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,8 \mu\text{m}$ .

Formenbau: Durch die Verarbeitung von hochhartem Formenstahl (HRC50-60) kann die Werkzeuglebensdauer um 40 % erhöht werden.

### 4. Technische Eigenschaften von Hartmetall-Außendrehwerkzeugen

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 50–200 m/min, Vorschub 0,1–0,4 mm/U, Bearbeitungseffizienz um 30–50 % gesteigert.

Hohe Präzision: Maßtoleranz  $< 10 \mu\text{m}$ , Oberflächenrauheit  $Ra 0,4–0,8 \mu\text{m}$ , entspricht der Norm ISO 1832.

Haltbarkeit: Die Lebensdauer beschichteter Drehwerkzeuge erreicht 5.000–10.000 Stück und die Werkzeugwechselhäufigkeit wird um 60 % reduziert.

Recyclingfähigkeit: Abfallklingen können durch Zinkschmelzen oder chemische Verfahren recycelt werden, wobei die Wolfram-Rückgewinnungsrate über 90 % liegt und die Kosten um 30–40 % gesenkt werden.

### 5. Entwicklungstrend bei Hartmetall-Außendrehwerkzeugen

Intelligente Optimierung: In Kombination mit KI zur Optimierung der Schnittparameter (wie Hauptablenkwinkel und Schnitttiefe) wird die Verarbeitungseffizienz um 20 % verbessert.

Umweltfreundliche Fertigung: Erforschung und Entwicklung von Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ( $< 5 \%$ ) zur Reduzierung der Umweltbelastung; Förderung der elektrochemischen Recyclingtechnologie zur Reduzierung der Abwasseremissionen um 50 %.

Fortschrittliche Beschichtungen: Entwicklung von Nanokompositbeschichtungen (wie  $\text{TiAlN}$  /  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), die die Verschleißfestigkeit um 60 % erhöhen und die Lebensdauer um das Zweifache verlängern.

Modulares Design: Fördern Sie die Standardisierung von Wendeschneidplatten (ISO 1832) und reduzieren Sie so die Werkzeugbestandskosten um 25 %.

Dank ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Präzision haben sich Hartmetall-Außendrehwerkzeuge zu den wichtigsten Werkzeugen für das Außendrehen entwickelt und finden breite Anwendung in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- sowie im Formenbau. Durch intelligente Optimierung, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Hartmetall-Außendrehwerkzeuge künftig die Verarbeitungseffizienz weiter verbessern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung fördern. Dies trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Produktion bei.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



**Anhang:**

**Hartmetall-Zahnradfräser**

**1. Übersicht über Hartmetall-Zahnradwerkzeuge**

Hartmetall-Zahnradfräser sind spezielle Schneidwerkzeuge aus Wolframkarbid (z. B. WC-Co, WC-Ni) und finden breite Anwendung in der Zahnradbearbeitung, z. B. beim Wälzfräsen, Wälzstoßen, Zahnradschaben und Zahnradschleifen. Dank ihrer hohen Härte (HV 1600–2000), ihrer hervorragenden Verschleißfestigkeit und ihrer Warmhärte (bei 600–800 °C bleibt die hohe Festigkeit erhalten) eignen sie sich für die Bearbeitung von Werkstoffen wie hochfestem Stahl, legiertem Stahl und Edelstahl. Sie erfüllen die Anforderungen der Automobil-, Luft- und Raumfahrt-, Energie- und Schwermaschinenindustrie an hochpräzise Zahnräder (Genauigkeit bis ISO 4–6).

**2. Hartmetall-Zahnradwerkzeugmaterialien und -herstellung**

Materialzusammensetzung: Besteht hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC, 80–90 %) und Bindemittel (z. B. Co, Ni, 5–15 %). Eine geringe Menge TiC und TaC verbessert die Verschleißfestigkeit. Je höher der Co-Gehalt, desto besser die Zähigkeit (z. B. WC-10Co). Ni-basierte Legierungen sind korrosionsbeständig und für spezielle Umgebungen geeignet.

Herstellungsverfahren:

Pulvermetallurgie: WC, Co und andere Pulver (Partikelgröße 0,5–2 µm) mischen, in Form pressen (Druck 300–500 MPa) und bei 1350–1500 °C im Vakuum oder in einer Wasserstoffatmosphäre sintern, um eine Härte von HV1800 zu erreichen.

Präzisionsschleifen: Zur Bearbeitung des Werkzeugzahnprofils wird eine CBN-Schleifscheibe mit einer Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  und einem Schneidkantenradius  $< 10 \mu\text{m}$  verwendet, um die Schnittgenauigkeit sicherzustellen.

Beschichtungstechnologie: Auftragen einer PVD- oder CVD-Beschichtung (wie TiN, TiAlN, AlCrN) mit einer Dicke von 2–5 µm reduzieren den Reibungskoeffizienten (0,2–0,4) und verlängern die Lebensdauer um 50–100 %.

Vorteile: Im Vergleich zu Schnellarbeitsstahl (HSS) ist die Standzeit des Hartmetallwerkzeugs 3–5 mal länger und die Schnittgeschwindigkeit 2–3 mal höher (100–300 m/min).

**3. Arten und Anwendungen von Hartmetall-Zahnradfräsern**

**Hartmetall - Wälzfräser**

Wird zum Schrappen und Schlichten von Gerad- und Schrägverzahnungen mit hoher Bearbeitungseffizienz verwendet, geeignet für Fahrzeuggetriebe (Modul 1-10).

**Hartmetall-Zahnrad- Schneidfräser**

Bearbeitung von Innenverzahnungen und Sonderzahnformen mit ISO 5 Genauigkeit für Luftfahrtgetriebe.

**Hartmetall-Zahnrad -Schabfräser**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Die Zahnoberfläche ist fein bearbeitet und weist eine Oberflächenrauheit von  $Ra < 0,8 \mu m$  auf, was für die Massenproduktion hochpräziser Zahnräder geeignet ist.

#### **Hartmetall- Zahnradschleifmesser**

Die gehärtete Zahnoberfläche ( $HRC > 60$ ) wird mit einem Hartmetallsubstrat in Kombination mit einer CBN-Beschichtung mit einer Genauigkeit von ISO 3–4 für Windkraft- und Hochgeschwindigkeitsbahngetriebe bearbeitet.

Anwendungsbeispiele:

Automobilindustrie: Bearbeitung von Getriebezahnrädern, mit einer Jahresproduktion von über 100 Millionen Stück und einer Standzeit von 100.000 Stück/ Blatt.

Luft- und Raumfahrt: Bearbeitung von Turbinentriebwerkszahnradern, Modul 0,5–2, ISO 4-Genauigkeit, 20 % Reduzierung der Schnittkräfte.

#### **4. Technische Eigenschaften von Hartmetallzahnradern**

Hohe Effizienz: Schnittgeschwindigkeit 150–300 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,1–0,5 mm/U, Bearbeitungseffizienz um 40 % gesteigert.

Hohe Präzision: Zahnprofilfehler  $< 5 \mu m$ , Zahnteilungsfehler  $< 3 \mu m$ , entspricht der Norm DIN 3962.

Haltbarkeit: Die Lebensdauer beschichteter Hartmetallwerkzeuge beträgt 5.000–10.000 Teile, wodurch die Häufigkeit des Werkzeugwechsels um 50 % reduziert wird.

Recyclingfähigkeit: Altwerkzeuge können mit chemischen Verfahren oder durch Zinkschmelzen recycelt werden. Die Wolframrückgewinnungsrate liegt bei über 90 % und die Kosten werden um 30–40 % gesenkt.

#### **5. Entwicklungstrend von Hartmetallzahnradern**

Intelligentes Design: In Kombination mit KI zur Optimierung der Zahnform und der Schnittparameter wird der Verarbeitungsfehler um 30 % reduziert.

Grüne Fertigung: Entwicklung von Hartmetall mit niedrigem Co-Gehalt ( $< 5 \%$ ) oder Co-freiem Hartmetall zur Reduzierung der Umweltbelastung; Förderung der Recyclingtechnologie für ionische Flüssigkeiten zur Reduzierung der Abwasseremissionen um 60 %.

Verbundbeschichtung: Forschung und Entwicklung von Nano-Mehrschichtbeschichtungen (wie TiAlN /DLC), die die Verschleißfestigkeit um 50 % verbessern und die Lebensdauer um das Zweifache verlängern.

Additive Fertigung: Entdecken Sie 3D-gedruckte Hartmetall-Werkzeugssubstrate, um die Herstellungskosten komplexer Zahnformen um 20 % zu senken.

Hartmetall-Verzahnungswerkzeuge haben sich aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Präzision zu Kernwerkzeugen für die Zahnradbearbeitung entwickelt und finden breite Anwendung in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- sowie Energiebranche. Durch intelligentes Design, umweltfreundliches Recycling und fortschrittliche Beschichtungstechnologie werden Hartmetall-Verzahnungswerkzeuge künftig die Effizienz weiter steigern, Kosten senken und eine nachhaltige Entwicklung fördern. Dies trägt zur globalen Wettbewerbsfähigkeit der chinesischen High-End-Produktion bei.

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

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

**Hartmetall-Windturbinenzahnradfräser**

Der Hartmetall-Windturbinenzahnradfräser basiert auf Hartmetall auf Wolframkarbidbasis (WC) (WC 8594 Gew.-%, Co 615 Gew.-%). Durch Präzisionsschleifen und PVD/CVD-Beschichtung (wie TiAlN, AlCrN, 46 µm), erreicht eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit (Verschleißverlust <0,05 mm³/h, ASTM G65) und Warmhärte bei hohen Temperaturen (800–1000 °C, Härte > 1200 HV). Es ist speziell für Windkraftgetriebe (42CrMo4, 18CrNiMo76, HRC 5562, Modul 1040) ausgelegt und eignet sich zum Wälzfräsen, Wälzstoßen, Scheibenfräsen und Hartdrehen mit einer Schnittgeschwindigkeit von 100–500 m/min, einer Lebensdauer von 500–2000 Minuten, einer Zahnprofilgenauigkeit von AGMA 1012 und einer Oberflächenrauheit von Ra 0,40,8 µm.

Dieser Artikel basiert auf nationalen Normen (GB/T 183762014, GB/T 79972017) und Branchenpraktiken und erläutert Schneidwerkzeuge, Herstellungsverfahren, Leistung, Anwendungen und Optimierungshinweise. Er empfiehlt die Anpassungsmöglichkeiten der CTIA GROUP LTD an Hochleistungsschneidwerkzeuge und hat nichts mit Elektrolysezellen für neue Energien und Aufkohlungs-/Entkohlungsprozessen zu tun.

**1. Übersicht über Hartmetall-Windkraftgetriebewerkzeuge**

**1.1 Definition und Eigenschaften von Hartmetall-Windturbinenzahnradwerkzeugen**

Die Hartmetall-Windturbinenzahnradfräser erfüllen die Verarbeitungsanforderungen hinsichtlich großem Modul (1040) und hoher Härte (HRC 5562) von Windturbinenzahnradern durch ein WC-Substrat mit ultrafeinen/mittelgroben Körnern (0,22 µm), eine PVD-/CVD-Beschichtung (TiAlN / AlCrN) und eine Präzisionsbearbeitung (Zahnprofilabweichung  $\leq \pm 0,005$  mm).

**- Windkraftzahnradfräsern :**

**Hohe Härte:** 1800–2200 HV, die Verschleißfestigkeit ist 510 -mal besser als bei Schnellarbeitsstahl (HSS, 800 HV).

**Hitzebeständigkeit :** 800–1000 °C, geeignet für Trocken-/Minimalmengenschmierung (MMS).

**Verschleißfestigkeit :** Verschleißrate <0,05 mm³/h, Lebensdauer 500–2000 Minuten.

**Schlagfestigkeit :** Biegefestigkeit 1,82,8 GPa, Bruchzähigkeit KIC 1015 MPa·m<sup>1/2</sup>.

**Anwendungen :** Windkraftgetriebe (Planetengetriebe, Hauptwellengetriebe), Getriebekomponenten.

**1.2 Arten von Hartmetall-Windturbinenzahnradfräsern**

**Wälzfräser :** Grob-/Fein- Wälzfräsen, Geschwindigkeit 100–400 m/min.

**Zahnradstoßfräser :** Innen-/Außenzahnradbearbeitung, Geschwindigkeit 150–300 m/min.

**Scheibenfräser :** Zahnnutfräsen, Geschwindigkeit 200–500 m/min.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



**Hartdrehwerkzeug** : Hartdrehen (HRC 5562), Geschwindigkeit 80200 m/min .

### 1.3 Vorteile von Hartmetall-Windkraftwerkzeugen

**Effizienz:** Die Schnittgeschwindigkeit ist 35 -mal höher als bei HSS und die Effizienz um 3050 % gesteigert.

**Lebensdauer** : Lebensdauer des beschichteten Werkzeugs 500–2000 Minuten (HSS 100–300 Minuten).

**Präzision** : Zahnprofilgenauigkeit AGMA 1012, Ra 0,40,8  $\mu\text{m}$  .

**Anpassungsfähigkeit** : Geeignet für große Module, Hartbearbeitung , Trocken-/Nassschneiden.

## 2. Hartmetall-Werkzeugmaterialien für Windkraftgetriebe

### 2.1 Zutaten

**Werkzeugbasis für Windturbinengetriebe aus Hartmetall :**

**WC** : 8594 Gew.-%, Korngröße 0,22  $\mu\text{m}$  .

Ultrafeines Korn (0,2–0,5  $\mu\text{m}$  ) : Härte 2000–2200 HV, Feinbearbeitung.

Mittelgrobkorn (12  $\mu\text{m}$  ) : Zähigkeit KIC 1215  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  , Schrubbearbeitung.

**Co** : 615 Gew.-%.

Niedriger Co-Gehalt (68 Gew. %) : Härte 1800–2200 HV, hohe Verschleißfestigkeit.

Hoher Co-Gehalt (1015 Gew.-%) : Biegefestigkeit 2,22,8 GPa , gute Schlagfestigkeit.

**Zusatzstoff** : Cr3C2/VC (0,21 Gew.-%), Härte um 510 % erhöht.

**Hartmetallbeschichtung für Windturbinenzahnradwerkzeuge :**

**TiAlN (PVD)** : Härte 3000–3300 HV, Hitzebeständigkeit 900–1100 °C, Lebensdauer um 3050 % erhöht.

**AlCrN (PVD)** : Härte 3000 HV, Reibungskoeffizient 0,3, geeignet für Hartbearbeitung .

**GC4240 (CVD)** : Härte 2800 HV, ausgezeichnete Verschleißfestigkeit, geeignet für die Grobbearbeitung.

### 2.2 Gradientenstruktur des Hartmetall-Windturbinenzahnradfräasers

**Oberfläche** : niedriger Co-Gehalt (68 Gew. %), WC mit ultrafeinen Körnern (0,2–0,5  $\mu\text{m}$  ) , Härte 2000–2200 HV.

**Kern** : Hoher Co-Gehalt (1012 Gew.-%), mittelgrobkörniges WC (12  $\mu\text{m}$  ) , KIC 1215  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  .

**Vorteile** : Verschleißfestigkeit um 2030 % erhöht, Schlagfestigkeit um 1520 % erhöht, Risswahrscheinlichkeit um 20 % reduziert.

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

### 2.3 Leistungsanforderungen an Hartmetallwerkzeuge für Windturbinengetriebe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte: 1800–2200 HV (GB/T 7997–2017).

Biegefestigkeit: 1,82,8 GPa (GB/T 38512015).

Bruchzähigkeit:  $1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$  (ASTM G65).

Wärmeleitfähigkeit:  $80100 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

### 3. Herstellungsprozess von Hartmetall-Windturbinenzahnradfräsern

#### 3.1 Pulveraufbereitung

**Rohstoffe** : WC (D50  $0,22 \mu\text{m}$  , Reinheit  $>99,9\%$ ), Co (D50  $12 \mu\text{m}$  ) , Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/VC (D50  $0,51 \mu\text{m}$  ) .

**Kugelmahlen** : Planetenkugelmühle (ZrO<sub>2</sub>-Kugeln, 10:1 ) , 300 U/min, 1624 h, Partikelgrößenabweichung  $< \pm 0,1 \mu\text{m}$  , Gleichmäßigkeit  $>95\%$  .

#### 3.2 Umformen

**Methode** : Kaltisostatisches Pressen (CIP).

**Parameter** : 250–300 MPa, Haltedruck 60 Sekunden, Stahlform (Abweichung  $< \pm 0,05 \text{ mm}$ ), Knüppeldichte  $8,710,5 \text{ g/cm}^3$  .

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

#### 3.3 Sintern

**Methode** : Vakuumsintern + HIP.

**Parameter** :

Entwachsen: 200–600 °C, 3 °C/min, H<sub>2</sub>-Atmosphäre (O<sub>2</sub>  $< 5 \text{ ppm}$ ),  $10^{-2} \text{ Pa}$ .

Sintern: 1350–1450 °C,  $10^{-4} \text{ Pa}$ , 23 h.

HIP: 1350°C, 120 MPa ( Ar ), 12 h.

**Ergebnisse** : Dichte  $14.815,0 \text{ g/cm}^3$ , Porosität  $< 0,001\%$ , Härte 1800–2200 HV.

#### 3.4 Präzisionsbearbeitung

**Schleifen** : CNC-Schleifmaschine, Diamantscheibe ( $510 \mu\text{m}$  ) , 3000 U/min, Vorschub  $0,010,05 \text{ mm/Durchgang}$ , Zahnprofilabweichung  $< \pm 0,005 \text{ mm}$ , Ra  $0,10,2 \mu\text{m}$  .

**Polieren** : Diamantpolierpaste ( $13 \mu\text{m}$  ) , 800 U/min, Ra  $< 0,1 \mu\text{m}$  .

#### 3.5 Beschichtung

**Methode** : PVD/CVD (Ti/Al/Cr-Ziele,  $>99,99\%$ ).

**Parameter** : TiAlN / AlCrN ( $46 \mu\text{m}$  ) ,  $10^{-4} \text{ Pa}$ , 300–450°C, Vorspannung 80 bis 100 V, Abscheiderate  $1 \mu\text{m/h}$ .

**Ergebnisse** : Haftung  $> 80 \text{ N}$ , Hitzebeständigkeit 900–1100 °C, Lebensdauer um 30–50 % erhöht.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.6 Erkennung

**Mikrostruktur** : SEM (Korn  $0,22 \mu\text{m}$ ), XPS (Abweichung  $\leq \pm 0,1$  Gew. %).

**Leistung** : Härteabweichung  $\leq \pm 50$  HV (ISO 6508), Verschleißvolumen  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$  (ASTM G65), Biegefestigkeit  $1,82,8 \text{ GPa}$ .

**Geometrie** : CMM, Zahnformabweichung  $< \pm 0,005 \text{ mm}$  (AGMA 1012).

### 4. Anwendungsszenarien von Hartmetall-Windturbinenzahnradwerkzeugen

Hartmetall-Windrad-Zahnradschneidwerkzeuge bieten Schneidwerkzeuge, Prozessparameter, Testdaten und Auswahlvorschläge für die folgenden Arbeitsbedingungen zur effizienten Bearbeitung von Windrad-Zahnradern (Modul 1040, HRC 5562):

#### Schruppen von Zahnradern (42CrMo4, HRC 55) :

**Arbeitsbedingungen** : Material 42CrMo4 (HRC 55), Modul 20, Zahnraddurchmesser  $\varnothing 800 \text{ mm}$ , Schruppbearbeitung.

**Messer** :

**Typ** : Wälzfräser ( $\varnothing 200 \text{ mm}$ , 12 Zähne).

**Matrix** : WC12%Co (mittelgrobes Korn, D50  $12 \mu\text{m}$ , VC 0,5 Gew %), Härte 1600/1800 HV, KIC  $1415 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

**Beschichtung** : CVD GC4240 ( $6 \mu\text{m}$ , Härte 2800 HV, Hitzebeständigkeit  $1000^\circ\text{C}$ ).

**Geometrie** : Eingriffswinkel  $20^\circ$ , Zahnkopfradius  $0,5 \text{ mm}$ , Zahnflanken poliert ( $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ ).

**Verfahren** : Kugelmahlen für 22 Stunden, CIP 300 MPa, Sintern  $1450^\circ\text{C}$  ( $10^{-5} \text{ Pa}$ , 3 Stunden), HIP  $1350^\circ\text{C}$  (120 MPa, 2 Stunden), Schleifen (Zahnprofilabweichung  $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$ ), CVD GC4240 ( $450^\circ\text{C}$ , Haftung  $> 80 \text{ N}$ ).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit  $200 \text{ m/min}$ , Vorschub  $2 \text{ mm/U}$ , Schnitttiefe  $5 \text{ mm}$ , MQL ( $0,2 \text{ L/h}$ ).

**Testdaten** :

Lebensdauer: 800 Minuten (HSS 200 Minuten, 4-mal länger).

Genauigkeit: AGMA-Klasse 10,  $R_a 0,8 \mu\text{m}$ .

Schneidkraft: 1200 N (HSS 1500 N, reduziert um 20 %).

Verschleißverlust: VB  $< 0,3 \text{ mm}$ ,  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ .

**Auswahlempfehlung** : mittelgrobes WC-Korn + hoher Co-Gehalt (12 Gew.-%) + GC4240, Wälzfräser  $\varnothing 200 \text{ mm}$ , MMS + regelmäßige Kontrolle des Zahnoberflächenverschleißes.

#### Präzisions- Wälzfräsen (18CrNiMo76, HRC 60) :

**Arbeitsbedingungen** : Material 18CrNiMo76 (HRC 60), Modul 15, Zahnraddurchmesser  $\varnothing 600 \text{ mm}$ , Feinbearbeitung.

**Messer** :

**Typ** : Wälzfräser ( $\varnothing 180 \text{ mm}$ , 10 Zähne).

**Matrix** : WC6%Co (ultrafeines Korn, D50  $0,20,5 \mu\text{m}$ , Cr3C2 0,5 Gew.-%), Härte 2000–2200 HV.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Beschichtung** : PVD TiAlN (4  $\mu\text{m}$  , Härte 3300 HV, Hitzebeständigkeit 1100°C).

**Geometrie** : Eingriffswinkel 20°, Zahnspitzenradius 0,3 mm, Schneidenradius 0,02 mm.

**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  $\mu\text{m}$  ) , PVD TiAlN (350°C, Haftung >100 N).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 300 m / min, Vorschub 0,5 mm/U, Schnitttiefe 1 mm, Trockenschnitt.

**Testdaten :**

Lebensdauer: 1200 Minuten (HSS 250 Minuten, 4,8-mal länger) .

Genauigkeit: AGMA-Klasse 12, Ra 0,4  $\mu\text{m}$  .

Schneidkraft: 800 N (HSS 1000 N, reduziert um 20 %).

Verschleißverlust: VB <0,2 mm, <0,04 mm<sup>3</sup>/h.

**Auswahlempfehlung** : Ultrafeinkörniges WC + wenig Co (6 Gew. % ) + TiAlN , Wälzfräser Ø 180 mm , Trockenschnitt + hochpräzise Werkzeugmaschine.

**Wälzstoßen (42CrMo4, HRC 58 ) :**

**Arbeitsbedingungen** : Material 42CrMo4 (HRC 58), Modul 25, Innenverzahnung Ø 1000 mm.

**Messer :**

**Typ** : Zahnrad-Stoßfräser (Ø 150 mm, 8 Zähne).

**Matrix** : WC10%Co (feinkörnig, D50 0,51  $\mu\text{m}$  , Cr3C2 0,5 Gew. %), Härte 1800–2000 HV.

**Beschichtung** : PVD AlCrN (5  $\mu\text{m}$  , Härte 3000 HV, Reibung 0,3).

**Geometrie** : Eingriffswinkel 20°, Schneidenradius 0,03 mm, Zahnflanke poliert (Ra <0,1  $\mu\text{m}$  ) .

**Verarbeitung** : Kugelmahlen für 18 Stunden, CIP 280 MPa, Sintern 1420 °C ( $10^{-4}$  Pa, 2 Stunden), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 Stunden), Schleifen (Ra 0,1  $\mu\text{m}$  ) , PVD AlCrN (400 °C, Haftung > 80 N).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 200 m/min, Vorschub 0,1 mm/Hub, Schnitttiefe 2 mm, Nassschneiden (10 l/min) .

**Testdaten :**

Lebensdauer: 1000 Minuten (HSS 300 Minuten, 3,3 -fach erhöht) .

Genauigkeit: AGMA-Klasse 11, Ra 0,6  $\mu\text{m}$  .

Schneidkraft: 1000 N (HSS 1300 N, 23 % Reduzierung).

Verschleißverlust: VB <0,25 mm, <0,05 mm<sup>3</sup>/h.

**Auswahlvorschlag** : Feinkorn WC+ AlCrN , Ø 150 mm Zahnradstoßfräser, Nassschnitt + vibrationsarme Werkzeugmaschine.

**Hartdrehen (18CrNiMo76, HRC 62 ) :**

**Arbeitsbedingungen** : Material 18CrNiMo76 ( HRC 62), Modul 15, Zahnrad Durchmesser Ø 500 mm, Feinbearbeitung.

**Messer :**

**Typ** : Hartdrehwerkzeug (Wendeschneidplatte, CNMG120408).

**Matrix** : WC6%Co (ultrafeines Korn, D50 0,20,5  $\mu\text{m}$  , Cr3C2 0,5 Gew. - %), Härte 2000–2200 HV.

**Beschichtung** : PVD TiAlN (4  $\mu\text{m}$  , Härte 3300 HV, Hitzebeständigkeit 1100°C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**Geometrie** : Hauptspanwinkel 75°, Schneidenneigungswinkel 6°, Schneidenradius 0,02 mm, 3D-Spanbrecher .

**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 (Kantenradius  $< 5 \mu\text{m}$ ), PVD TiAlN (350 °C, Haftung  $> 100 \text{ N}$ ).

**Schnittparameter** : Geschwindigkeit 150 m / min, Vorschub 0,1 mm/U, Schnitttiefe 0,5 mm, Trockenschnitt.

#### Testdaten :

Lebensdauer: 1500 Minuten (HSS 200 Minuten, 7,5 -fach erhöht) .

Genauigkeit: AGMA-Klasse 12, Ra 0,4  $\mu\text{m}$  ,  $\pm 0,01 \text{ mm}$ .

Schneidkraft: 600 N (HSS 800 N, reduziert um 25 %).

Verschleißverlust: VB  $< 0,15 \text{ mm}$ ,  $< 0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$ .

**Auswahlempfehlungen** : Ultrafeinkörniges WC+ TiAlN , CNMG120408MF, Trockenschnitt+ Werkzeugmaschinen mit hoher Steifigkeit .

### 5. Leistungsanalyse von Hartmetall-Windturbinenzahnradwerkzeugen

| Parameter                                 | Hartmetallwerkzeuge       | Schnellarbeitsstahl (HSS) |
|-------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Härte (HV)                                | 18002200                  | 800900                    |
| Biegefestigkeit ( GPa )                   | 1.82.8                    | 34                        |
| Zähigkeit (KIC)                           | 1015 MPa·m <sup>1/2</sup> | 2050 MPa·m <sup>1/2</sup> |
| Verschleißfestigkeit (mm <sup>3</sup> /h) | $< 0,05$                  | 0,20,5                    |
| Hitzebeständigkeit (°C)                   | 8001000                   | 500600                    |
| Schnittgeschwindigkeit (m/min)            | 100500                    | 20100                     |
| Lebensdauer (Minuten)                     | 5002000                   | 100300                    |
| Ra ( $\mu\text{m}$ )                      | 0,40,8                    | 1.02.0                    |

#### Höhepunkte :

Verschleißfestigkeit: Ultrafeinkörniges WC+TiAlN / AlCrN , Verschleiß  $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{h}$ , 37,5-fache Lebensdauererhöhung .

Hitzebeständigkeit: 800–1000 °C, Härte  $> 1200 \text{ HV}$ , Trockenschnitt.

Effizienz: Geschwindigkeit 100500 m/min, Effizienz um 3050 % gesteigert.

Genauigkeit: AGMA 1012-Sorte, Ra 0,40,8  $\mu\text{m}$  .

### 6. Optimierungsvorschläge für Hartmetall-Windradgetriebewerkzeuge

#### Materialoptimierung :

**Schruppbearbeitung** : mittelgrobkörniges WC (12  $\mu\text{m}$  ) , Co 12 Gew. % , GC4240 (6  $\mu\text{m}$  ) , Verschleißfestigkeit um 20 % erhöht.

**Endbearbeitung** : WC mit ultrafeinem Korn (0,20,5  $\mu\text{m}$  ) , Co 6 Gew. % , TiAlN (4  $\mu\text{m}$  ) , Genauigkeit  $\pm 0,01 \text{ mm}$ .

**Zahnradformung** : feinkörniges WC (0,51  $\mu\text{m}$  ) , AlCrN ( 5  $\mu\text{m}$  ) , Schlagzähigkeit um 15 %

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

erhöht.

**Zusatzstoff** : Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/VC 0,5 Gew.-%, Härte um 510 % erhöht.

**Prozessoptimierung :**

**Sintern** : HIP 1350 °C, 120 MPa, Porosität <0,001 %, Verschleißfestigkeit um 15 % erhöht.

**Schleifen** : CNC-Schleifmaschine, Diamantschleifscheibe (58 μm) , Zahnprofilabweichung <±0,005 mm, Ra <0,1 μm .

**Beschichtung :**

TiAlN (4 μm , 350 °C, Vorspannung 100 V), Hitzebeständigkeit um 20 % erhöht.

AlCrN (5 μm , 400 °C, Vorspannung 80 V), Stoßfestigkeit um 15 % erhöht.

GC4240 (6 μm , 450 °C), Verschleißfestigkeit um 25 % erhöht.

**3D -Druck** : SLM-Formung komplexer Zahnformen, Zykluszeit um 20 % reduziert, Genauigkeit von ±0,01 mm.

**Geräteoptimierung :**

Sinterofen: Temperaturregelung ±3°C, 10<sup>-5</sup> Pa.

CNC-Schleifmaschine: Zahnprofilabweichung <±0,005 mm.

Beschichtungsanlage: Abscheiderate 12 μm /h, Abweichung <± 0,1 μm .

**Anpassung der Arbeitsbedingungen :**

**Schruppen des Zahnradwälzfräsens** : mittelgrobes Korn WC+GC4240, Geschwindigkeit 200–300 m/min, MQL.

**Präzisions- Wälzfräsen** : Ultrafeinkörniges WC+ TiAlN , Geschwindigkeit 250–400 m/min, Trockenschnitt.

**Zahnradformung** : Feinkörniges WC+ AlCrN , Geschwindigkeit **150–250** m/min, Nassschneiden.

**Hartdrehen** : Ultrafeinkörniges WC+ TiAlN , Geschwindigkeit 100–200 m/min, Trockenschnitt .

**Prüfung und Verifizierung :**

**Mikrostruktur** : SEM (Korn 0,22 μm ) , EBSD (Korngrenzenspannung <5 %).

**Leistung** : ASTM G65 (<0,040,05 mm<sup>3</sup>/h), Hochtemperaturhärte (>1200 HV, 900 °C).

**Prüfung** : Schnittkraft 600–1200 N, Lebensdauer 800–1500 min, Ra 0,4–0,8 μm , Güteklasse AGMA 1012.

**7. Normen und Spezifikationen für Hartmetall-Zahnrad-schneidwerkzeuge für Windturbinen**

**GB/T 183762014** : Porosität <0,01 %.

**GB/T 38502015** : Dichteabweichung <±0,1 g/cm<sup>3</sup> .

**GB/T 38512015** : Festigkeit 1,8–2,8 GPa .

**GB/T 7997-2017** : Härte 1400–2200 HV.

**ASTM G 65** : Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/h.

**ISO 6508** : Härteabweichung < ±50 HV.

**ISO 1832** : Zahnformabweichung <±0,01 mm.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

AGMA 2015 : Zahnprofilgenauigkeitsstufe 1012.

## 8. Fazit

Die Hartmetall-Windturbinenzahnradwerkzeuge erreichen eine hohe Härte (1800–2200 HV), Verschleißfestigkeit ( $<0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ ), Hitzebeständigkeit (800–1000 °C) und Stabilität (Lebensdauer 800–1500 Minuten) durch die Optimierung der Materialien (Ultrafeinkörniges WC 0,20,5  $\mu\text{m}$ , Co 612 Gew. %, TiAlN / AlCrN / GC4240-Beschichtung) und Verfahren (HIP-Sintern 1350°C, 120 MPa, PVD/CVD-Beschichtung 300–450°C).

Das Werkzeug eignet sich zum Schruppen/Schlichten von Windkraftgetrieben (42CrMo4, 18CrNiMo76, HRC 5562, Modul 1040) mit einer Geschwindigkeit von 100–500 m/min, einer Effizienzsteigerung von 3050 % und einer Genauigkeit von AGMA 1012, Ra 0,40,8  $\mu\text{m}$ . Durch die Optimierung ultrafeiner Körner, Verbundbeschichtungen und Präzisionsschleifen können die Kosten gesenkt werden (500–2000 Yuan pro Stück). Die Herausforderungen liegen in der Verarbeitung großer Module (Schleifkosten steigen um 20 %) und der Beschichtungshaftung ( $> 80 \text{ N}$  erforderlich).

Die CTIA GROUP LTD verwendet Nano-WC (D50 0,20,5  $\mu\text{m}$ ), HIP-Sintern (Porosität  $<0,001 \%$ ) und mehrschichtige PVD/CVD-Beschichtungen, um Hochleistungswälzfräser, Zahnradformfräser und Hartdrehwerkzeuge zu entwickeln, die den Anforderungen der Windkraftgetriebearbeitung gerecht werden (Lebensdauer  $>1200$  Minuten, Präzisionsniveau AGMA 12). Die Produkte haben die SEM-, ASTM G65- und AGMA 2015-Zertifizierung bestanden.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

GB/T 18376-2001

**Leistungstestverfahren für Hartmetall**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Prüfverfahren für die Eigenschaften von Hartmetall fest, einschließlich der Prüfverfahren für Härte, Dichte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Mikrostruktur, magnetische Eigenschaften, Porosität und Verschleißfestigkeit. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für andere ähnliche Hartmetallwerkstoffe (z. B. Hartmetall mit TaC- und VC-Zusatz). Diese Norm gilt nicht für die Leistungsprüfung von beschichtetem Hartmetall.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 228.1-2001 Zugversuch an metallischen Werkstoffen Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 1: Prüfverfahren (Skala A, B, C)

GB/T 3848-2001 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

GB/T 3850-2001 Bestimmungsverfahren der Biegefestigkeit von Hartmetall

GB/T 3851-2001 Bestimmungsmethode der Bruchzähigkeit von Hartmetall

GB/T 5242-2001 Mikrostruktur-Testverfahren für Hartmetall

GB/T 7997-2001 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall

GB/T 9097-2001 Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

**3 Begriffe und Definitionen**

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

Härte (HV): Die Fähigkeit von Hartmetall, dem Eindringen eines Vickers-Eindringkörpers zu widerstehen, ausgedrückt als Vickers-Härtewert (HV30), Einheit:  $\text{kgf} / \text{mm}^2$ .

Dichte ( $\rho$ ): Das Verhältnis der Masse von Hartmetall zu seinem Volumen, ausgedrückt in  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Biegefestigkeit ( $\sigma_b$ ): Die maximale Spannung, der eine Hartmetallprobe in einem Dreipunkt-Biegeversuch standhält, ausgedrückt in MPa.

Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ): Die Fähigkeit von Hartmetall, Risswachstum zu widerstehen, ausgedrückt in  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Mikrostruktur: Verteilungseigenschaften von WC-Körnern, Co-Phase und Poren in Hartmetall.

Magnetische Eigenschaften: Der magnetische Sättigungswert ( $M_s$ ) und die Koerzitivkraft ( $H_c$ ) von Hartmetall spiegeln die magnetischen Eigenschaften der Co-Phase wider.

Porosität: Der Volumenanteil der Poren in Hartmetall, eingeteilt in drei Kategorien: A, B und C.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 4. Probenvorbereitung

### 4.1 Probenanforderungen

Die Probe sollte eine regelmäßige geometrische Form (z. B. Quader oder Zylinder) mit ebener Oberfläche und ohne Risse, Oxidschichten oder Verarbeitungsfehler aufweisen.

Die Stichprobengröße sollte den Anforderungen jedes Leistungstests entsprechen, beispielsweise:

Härteprüfung: Oberfläche > 5 x 5 mm, Dicke > 2 mm.

Biegefestigkeitstest: Länge × Breite × Höhe = 20 × 6,5 × 5,25 mm (± 0,05 mm).

Bruchzähigkeitstest: Länge × Breite × Höhe = 20 × 4 × 2 mm (± 0,02 mm).

Die Oberflächenrauigkeit der Probe beträgt Ra < 0,1 µm (poliert).

### 4.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität der Testergebnisse sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Charge nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen (>5%) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

### 4.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 5 Testmethoden

### 5.1 Härteprüfung

#### 5.1.1 Prüfprinzip:

Es wird das Vickers-Härteverfahren (HV30) verwendet. Eine Last von 30 kgf wird aufgebracht, und der Vickers-Eindringkörper wird in die Probenoberfläche gedrückt. Die diagonale Länge des Eindrucks wird gemessen und der Härtewert berechnet.

#### 5.1.2 Ausrüstung

Vickers-Härteprüfer, gemäß den Anforderungen von GB/T 7997-2001.

Eindringkörper: Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper, Scheitelwinkel 136° (±0,5°).

Mikroskop: Vergrößerung 400×, Auflösung < 0,5 µm.

#### 5.1.3 Prüfschritte

Die Probenoberfläche wurde auf Ra < 0,1 µm poliert, gereinigt und getrocknet.

Wenden Sie eine Last von 30 kgf an und halten Sie die Last 10–15 Sekunden lang.

Messen Sie die diagonalen Längen der Vertiefung (d1, d2) und ermitteln Sie den Durchschnittswert ( $d = (d1+d2)/2$ ).

Berechnen Sie den Härtewert:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中：F = 30 kgf, d 单位为 mm。

#### 5.1.4 Ergebnisverarbeitung

Für jede Probe wurden 5 Punkte gemessen und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $\leq \pm 2\%$  ermittelt.

Härtewertbereich: HV 1200-2000 (je nach Marke, z.B. YG8 ca. HV 1500).

### 5.2 Dichteprüfung

#### 5.2.1 Das Testprinzip

besteht darin, die Dichte mithilfe der Archimedes-Methode zu berechnen, indem die Masse der Probe in Luft und in Flüssigkeit gemessen wird.

#### 5.2.2 Ausrüstung

Analysenwaage, Genauigkeit  $\pm 0,0001$  g.

Flüssigkeit: destilliertes Wasser, Temperatur  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

#### 5.2.3 Prüfschritte

Wiegen Sie die Masse der Probe in Luft ( $m_1$ ) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,0001$  g.

Tauchen Sie die Probe in destilliertes Wasser und wiegen Sie die suspendierte Masse ( $m_2$ ).

Berechnen Sie die Dichte:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_{\text{水}}$$

Dabei gilt:  $\rho_{\text{Wasser}} = 0,9982\text{ g/cm}^3$

#### 5.2.4 Ergebnisverarbeitung

Jede Probe wurde dreimal gemessen und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $\leq \pm 0,01\text{ g/cm}^3$  ermittelt.

Typischer Wert: Die Dichte von WC-10Co beträgt etwa  $14,5\text{--}14,8\text{ g/cm}^3$ .

### 5.3 Biegefestigkeitsprüfung

#### 5.3.1 Das Prüfprinzip

basiert auf der Dreipunktbiegemethode. Die Probe wird zwischen zwei Auflagepunkten einer Kraft ausgesetzt. Die maximale Bruchlast wird aufgezeichnet und die Biegefestigkeit berechnet.

#### 5.3.2 Ausrüstung

Universalprüfmaschine, Lastgenauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Vorrichtung: Spannweite  $14,5\text{ mm}$  ( $\pm 0,05\text{ mm}$ ), Auflagepunktdurchmesser  $2\text{ mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.3.3 Prüfschritte

Probenabmessungen:  $20 \times 6,5 \times 5,25$  mm ( $\pm 0,05$  mm).

Ladegeschwindigkeit: 0,5 mm/min.

Notieren Sie die Bruchlast F (N).

Berechnen Sie die Biegefestigkeit:

$$\sigma_{bb} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Dabei gilt: L = 14,5 mm, b = 6,5 mm, h = 5,25 mm.

### 5.3.4 Ergebnisverarbeitung

In jeder Gruppe wurden fünf Proben getestet und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $< \pm 5$  % ermittelt.

Typischer Wert: Die Biegefestigkeit von YG8 beträgt etwa 2000–2400 MPa.

## 5.4 Bruchzähigkeitsprüfung

### 5.4.1 Prüfprinzip Mit der Single Edge Notched Beam-Methode (SEPB) wird die Bruchzähigkeit

$K_{Ic}$  durch Bruch einer vorgefertigten gekerbten Probe bei Dreipunktbiegung berechnet.

### 5.4.2 Ausrüstung

Universalprüfmaschine, Lastgenauigkeit  $\pm 0,5$  %.

Vorrichtung: Spannweite 16 mm ( $\pm 0,05$  mm).

Mikroskop: Kerbtiefe mit einer Auflösung von  $< 0,01$  mm messen.

### 5.4.3 Prüfschritte

Probengröße:  $20 \times 4 \times 2$  mm ( $\pm 0,02$  mm).

Vorgefertigte Kerbe: Tiefe 0,8–1,2 mm, Breite  $< 0,2$  mm.

Ladegeschwindigkeit: 0,5 mm/min.

Notieren Sie die Bruchlast F (N).

Berechnen Sie  $K_{Ic}$ :

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^2}$$

Dabei gilt: Y ist der geometrische Faktor (ca. 2,8–3,0), a ist die Kerbtiefe, L = 16 mm, B = 4 mm, W = 2 mm.

### 5.4.4 Ergebnisverarbeitung

In jeder Gruppe wurden fünf Proben getestet und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $< \pm 5$  % ermittelt.

Typischer Wert: YG8  $K_{Ic}$  ca. 12–15 MPa $\cdot$  m $^{1/2}$ .

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.5 Mikrostrukturprüfung

### 5.5.1 Testprinzip

Die WC-Korngröße, die Co-Phasenverteilung und die Porosität werden unter einem metallografischen Mikroskop beobachtet und die Mikrostruktur wird klassifiziert und ausgewertet.

### 5.5.2 Ausrüstung

Metallographisches Mikroskop, Vergrößerung 1000×, Auflösung < 0,5 µm .

Poliermaschine: Polieren Sie die Probe auf Ra < 0,05 µm .

Ätzmittel: Murakamis Reagenz (  $K_3Fe(CN)_6$  + NaOH-Lösung).

### 5.5.3 Prüfschritte

Nach dem Polieren wurden die Proben 10–20 s lang mit Murakamis Reagenz geätzt.

Bei 1000-facher Vergrößerung beobachtet:

Sie die durchschnittliche Korngröße (0,5–2 µm) .

Co-Phasenverteilung: Achten Sie auf die Gleichmäßigkeit.

Porositätsklassifizierung: Bewertung in drei Kategorien: A, B und C (A < 0,02 %, B < 0,2 % und C ist freier Kohlenstoff).

### 5.5.4 Ergebnisverarbeitung

Probe wurden fünf Sichtfelder beobachtet und die Korngröße und der Porositätsgrad aufgezeichnet.  
- Korngröße 0,8–1,2 µm , Porosität A02-B00-C00.

## 5.6 Prüfung der magnetischen Eigenschaften

### 5.6.1 Testprinzip

Der magnetische Sättigungswert ( Ms ) und die Koerzitivkraft ( Hc ) von Hartmetall werden gemessen, um den Co-Phasengehalt und die Mikrostruktureigenschaften wiederzugeben.

### 5.6.2 Ausrüstung

Prüfgerät für magnetische Eigenschaften, Genauigkeit ±1 %.

Probe: Durchmesser 5 mm, Höhe 10 mm (± 0,05 mm).

### 5.6.3 Prüfschritte

Die Probe wird entmagnetisiert und in den Tester gelegt.

Messen Sie den magnetischen Sättigungswert Ms (Einheit:  $\mu T \cdot m^3 / kg$ ).

Messen Sie die Koerzitivkraft Hc (Einheit: kA/m).

### 5.6.4 Ergebnisverarbeitung

Jede Probe wurde dreimal gemessen und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $\leq \pm 2 \%$  ermittelt.

Typische Werte: YG8 Ms liegt bei etwa 150–160  $\mu T \cdot m^3 / kg$ , Hc liegt bei etwa 15–20 kA/m.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 5.7 Verschleißfestigkeitsprüfung

### 5.7.1 Prüfprinzip

Mit der Schleifscheibenverschleißmethode wird der Massenverlust der Probe unter Standardverschleißbedingungen gemessen und die Verschleißfestigkeit bewertet.

### 5.7.2 Ausrüstung

Schleifscheiben-Verschleißprüfmaschine, Schleifscheibenmaterial SiC, Korngröße 60#.

Belastung: 50 N.

### 5.7.3 Prüfschritte

Probengröße:  $10 \times 10 \times 5$  mm ( $\pm 0,05$  mm).

Schleifscheibendrehzahl: 200 U/min, Prüfzeit: 30 Min.

Wiegen Sie die Masse der Probe vor und nach dem Verschleiß ( $m_1$ ,  $m_2$ ) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,0001$  g.

Berechnen Sie das Verschleißvolumen:  $\Delta m = m_1 - m_2$

### 5.7.4 Ergebnisverarbeitung

Jede Probe wurde dreimal getestet und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $\leq \pm 5$  % ermittelt.

Typischer Wert: Die Verschleißmenge von YG8 beträgt etwa 0,05–0,08 g.

---

## 6 Auswertung der Prüfergebnisse

Die Testergebnisse sollten den technischen Anforderungen der Hartmetallsorte entsprechen (z. B. YG8: Härte HV 1450–1550, Biegefestigkeit  $> 2000$  MPa).

Wenn die Ergebnisabweichung den zulässigen Bereich ( $> 5$  %) überschreitet, sind eine erneute Probenahme und Prüfung erforderlich.

Der Testbericht sollte Folgendes enthalten: Probenmarke, Testgegenstände, Testbedingungen, Ergebnisdaten und Bewertungsschlussfolgerungen.

---

## 7 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Umgebungstemperatur ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $50 \pm 10\%$ ).

Testergebnisse: Härte, Dichte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Mikrostruktur, magnetische Eigenschaften, Porosität, Verschleißfestigkeit usw.

Abweichungsanalyse: Mittelwert und Abweichung jedes Parameters.

Fazit: Ob es den technischen Anforderungen genügt.

---

## Anhang A (Informativer Anhang) Typische Referenzwerte für die Hartmetalleistung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Marke | Härte (HV30) | Dichte ( g/cm <sup>3</sup> ) | Biegefestigkeit ( MPa) | Bruchzähigkeit ( K <sub>1c</sub> , MPa·m <sup>1/2</sup> ) | Korngröße ( μm ) | Porosität   |
|-------|--------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------|-------------|
| YG6   | 1500-1600    | 14,8-15,0                    | 1800-2200              | 14-16                                                     | 0,8-1,2          | A02-B00-C00 |
| YG8   | 1450-1550    | 14,6-14,8                    | 2000-2400              | 12-15                                                     | 0,8-1,2          | A02-B00-C00 |
| YT15  | 1550-1650    | 11,0-11,5                    | 1600-2000              | 10-12                                                     | 0,6-1,0          | A02-B00-C00 |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 20±5°C.

Luftfeuchtigkeit: 50 ± 10 %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Anhang:

GB/T 230.1-2001

Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe

Teil 1: Prüfverfahren (Skala A, B, C)

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Härte von metallischen Werkstoffen bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) durch den Rockwell-Härtetest (Skala A, B, C) fest, einschließlich Testprinzipien, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Testschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Testbericht usw. Diese Norm ist auf die Härteprüfung von Stahl, Nichteisenmetallen und Hartmetall (wie WC-Co) anwendbar.

HRA-Skala: Geeignet für Hartmetall und hochharten Stahl (Härtebereich 20–88 HRA).

HRB-Skala: Gilt für Weichstahl, Nichteisenmetalle (wie Aluminium, Kupfer) (Härtebereich 20–100 HRB).

HRC-Skala: Gilt für gehärteten und angelassenen Stahl (Härtebereich 20–70 HRC).

Diese Norm ist nicht anwendbar für die Härteprüfung dünnwandiger Proben (Dicke <0,6 mm) oder Mikroproben.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 230.2-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

GB/T 230.3-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 3: Kalibrierung von Standardhärteblöcken

GB/T 4340.1-1999 Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

GB/T 13683-1999 Terminologie für die Prüfung mechanischer Eigenschaften metallischer Werkstoffe

3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 13683-1999 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Rockwellhärte (HR): Die Widerstandsfähigkeit eines Metalls gegen das Eindringen eines Rockwell-Eindringkörpers. Sie wird in Skalen wie HRA, HRB und HRC unterteilt und anhand der Tiefe des Eindringlings berechnet.

Eindringtiefe (e): Die Tiefe, die entsteht, wenn der Rockwell-Eindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt wird, gemessen in mm, ist umgekehrt proportional zum Härtewert.

Vorlast ( $F_0$ ): Die auf den Eindringkörper ausgeübte Anfangslast in N (98,07 N beim Rockwell-Test).

Gesamtlast (F): Die auf den Eindringkörper ausgeübte Gesamtlast in N (588,4 N für HRA und HRC, 980,7 N für HRB).

Härteskala: Eine Härteeinheit (z. B. HRC), die durch die Kombination aus Eindringkörpertyp und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Last definiert ist.

#### 4 Prüfprinzip

Die Rockwell-Härteprüfung wird durchgeführt, indem ein Diamantkegel (HRA, HRC) oder ein Stahlkugel-Eindringkörper (HRB) mit Vorspannung in die Oberfläche einer Metallprobe gedrückt wird. Anschließend wird eine Gesamtlast aufgebracht, die Last für eine bestimmte Zeit gehalten und anschließend bis zur Vorspannung entlastet. Die Differenz der Eindringtiefe (e) wird gemessen und der Rockwell-Härtewert berechnet. Die Formel zur Berechnung der Rockwell-Härte lautet:

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

In:

e ist der Unterschied in der Eindringtiefe in mm;

0,002 mm ist die Tiefenzunahme, die jedem Einheitshärtewert entspricht;

Der HRA-Bereich liegt zwischen 20 und 88, der HRB-Bereich zwischen 20 und 100 und der HRC-Bereich zwischen 20 und 70.

#### 5 Prüfmittel

##### 5.1 Rockwell-Härteprüfgerät

Entspricht den Inspektions- und Kalibrierungsanforderungen von GB/T 230.2-2001.

Belastung: Vorspannung 98,07 N (10 kgf) , Gesamtbelastung ist wie folgt:

HRA, HRC: 588,4 N (60 kgf) .

HRB: 980,7 N (100 kgf) .

Lastgenauigkeit: ±0,5 %.

Haltezeitregelung: 5 s bis 15 s, Abweichung <±0,5 s.

##### 5.2 Eindringkörper

Diamantkegel-Eindringkörper (HRA, HRC): Spitzenwinkel 120° (±0,5°), oberer Kugelradius 0,2 mm (±0,01 mm).

Stahlkugel-Eindringkörper (HRB): Durchmesser 1,5875 mm (1/16 Zoll, ±0,005 mm), Härte ≥HRC 60.

Die Oberfläche des Eindringkörpers ist frei von Defekten und weist klare Kanten auf (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung <0,5 μ m) .

##### 5.3 Messgerät

Der Härteprüfer ist mit einem digitalen oder Zeiger-Lesesystem mit einer Genauigkeit von ±0,5 HR ausgestattet.

##### 5.4 Kalibrierblock

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Standard-Kalibrierblöcke, die die Anforderungen von GB/T 230.3-2001 erfüllen:

HRA: 70-88 HRA, Abweichung  $<\pm 0,5$  HRA.

HRB: 60-100 HRB, Abweichung  $<\pm 1,0$  HRB.

HRC: 20-70 HRC, Abweichung  $<\pm 0,5$  HRC.

Die Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers beträgt  $Ra < 0,05 \mu m$ .

## 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30-80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Zylinder oder andere regelmäßige Form, Prüffläche  $> 5 \times 5$  mm, Dicke wie folgt:

HRA, HRC: Dicke  $> 0,8$  mm.

HRB: Dicke  $> 1,2$  mm.

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit  $Ra < 0,1 \mu m$  (poliert).

Die Dicke der Probe sollte die folgenden Anforderungen erfüllen: Dicke  $\geq 10 \times$  Eindringtiefe (ca. 0,5 mm).

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 1$  Std.) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben müssen mit Chargennummer, Marke (z. B. 45# Stahl, YG8) und Prüfgegenständen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung darf den Prüfbereich nicht beeinträchtigen.

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

## 7 Testschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Verwenden Sie den Standard-Kalibrierblock, um den Härteprüfer zu kalibrieren und messen Sie dreimal. Die Abweichung ist wie folgt:

HRA, HRC:  $<\pm 0,5$  HR.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRB:  $\leq \pm 1,0$  HR.

Überprüfen Sie den Zustand des Eindringkörpers, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Defekte vorliegen.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 7.3 Skalenauswahl

Wählen Sie die Skala entsprechend der Härte des Materials:

Hartmetall, hochharter Stahl: HRA.

Weichstahl, Nichteisenmetalle: HRB.

Abgeschreckter Stahl, angelassener Stahl: HRC.

## 7.4 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und achten Sie darauf, dass die Prüfoberfläche eben ist.

Wenden Sie eine Vorspannung von 98,07 N (10 kgf) an, um sicherzustellen, dass der Eindringkörper stabilen Kontakt mit der Probe hat.

Bringen Sie die Gesamtlast (588,4 N oder 980,7 N) auf und halten Sie die Last 5–15 s lang.

Entlasten Sie bis zu einer Vorspannung von 98,07 N und notieren Sie den Härtewert (HRA, HRB oder HRC).

Probe werden 5 Punkte gemessen und der Abstand der Eindrücke ist wie folgt:

HRA, HRC:  $>3$ -facher Eindruckdurchmesser (ca. 0,6 mm).

HRB:  $>4$ -facher Eindruckdurchmesser (ca. 1,5 mm).

Der Eindruck ist  $>1$  mm vom Probenrand entfernt.

## 7.5 Ergebnisberechnung

Der Härteprüfer zeigt den HR-Wert direkt an oder berechnet ihn anhand der Formel:

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

Nehmen Sie den Durchschnittswert von 5 Punkten als Härtewert der Probe. Die Abweichung ist wie folgt:

HRA, HRC:  $\leq \pm 1$  Std.

HRB:  $\leq \pm 2$  HR.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

### 8.1 Härtewertebereich

Der Rockwell-Härtbereich von Metallwerkstoffen hängt von der Skala und dem Material ab:

Hartmetall (YG8): HRA 87-89.

Gehärteter Stahl (45# Stahl, HRC 50): HRC 48-52.

Aluminiumlegierung (6061-T6): HRB 60-70.

### 8.2 Abweichungsbewertung

die 5 Punkte lauten wie folgt, ansonsten ist eine Wiederholungsprüfung erforderlich:

HRA, HRC:  $\leq \pm 1$  Std.

HRB:  $\leq \pm 2$  HR.

Übersteigt der Härtewert die materialtechnischen Anforderungen, müssen die Gründe dafür analysiert werden (z. B. Oberflächenfehler der Probe und ungleichmäßige Mikrostruktur).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Oberflächenqualität: Eine Oberflächenrauheit  $R_a > 0,1 \mu m$  führt zu geringeren Härtewerten (Abweichung  $> 1$  HR).

Verweilzeit: Eine Zeit  $< 5$  s oder  $> 15$  s beeinflusst die Eindringtiefe (Abweichung  $\pm 0,5$  Std.).

Probendicke: Dicke  $< 0,8$  mm führt zu Stützeffekt und höheren Härtewerten (Abweichung  $> 2$  HR).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $> \pm 0,2 \mu m$ ) oder hohe Porosität können zu Härteschwankungen ( $> \pm 1$  HR) führen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Skala (HRA/HRB/HRC), Last, Haltezeit (5–15 s), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Testergebnisse: Härtewert (HR), Durchschnittswert und Abweichung jedes Punktes.

Bewertungsschlussfolgerung: ob die technischen Anforderungen des Materials erfüllt werden.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Rockwell-Härte-Referenzwerte typischer Metallmaterialien

| Materialtyp        | Marke/Kategorie | Rockwellhärte | Herrscher | Typische Anwendungen          |
|--------------------|-----------------|---------------|-----------|-------------------------------|
| Hartmetall         | YG8             | 87-89         | HRA       | Schneidwerkzeuge              |
| Gehärteter Stahl   | 45# (HRC 50)    | 48-52         | HRC       | Mechanische Teile             |
| Aluminiumlegierung | 6061-T6         | 60-70         | HRB       | Luft- und Raumfahrtstrukturen |
| Kupferlegierung    | H62             | 40-50         | HRB       | Elektrische Komponenten       |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### Anhang C (Informativer Anhang) Vergleich der Rockwell-Härteskalen

| Herrscher | Eindringkörpertyp      | Gesamtlast<br>(N) | Härtebereich | Anwendbare Materialien               |
|-----------|------------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------|
| HRA       | Diamantkegel           | 588,4             | 20-88        | Hartlegierung, hochharter Stahl      |
| HRB       | Stahlkugel (1,5875 mm) | 980,7             | 20-100       | Weichstahl, Nichteisenmetalle        |
| HRC       | Diamantkegel           | 588,4             | 20-70        | Vergüteter Stahl, angelassener Stahl |

### Zusammenfassen

GB/T 230.1-2001 „Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 1: Prüfverfahren (Skala A, B, C)“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Rockwell-Härteprüfung metallischer Werkstoffe und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm gilt für die Härteprüfung von Stahl, Nichteisenmetallen und Hartmetall und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt sowie Formenbau.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



**Anhang:**

**GB/T 230.2-2001**

**Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe**

**Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die direkten und indirekten Prüf- und Kalibrierverfahren für Härteprüfgeräte (einschließlich der Skalen A, B, C, D, E, F, G, H, K, N und T) für die Rockwell-Härteprüfung metallischer Werkstoffe fest. Sie umfasst Prüfprinzipien, Geräteanforderungen, Kalibrierschritte, Ergebnisauswertung usw. Diese Norm gilt für die Prüfung und Kalibrierung stationärer und tragbarer Rockwell-Härteprüfgeräte, um sicherzustellen, dass die Härteprüfgeräte die Anforderungen von GB/T 230.1-2001 „Rockwell-Härteprüfung metallischer Werkstoffe, Teil 1: Prüfverfahren“ erfüllen. Diese Norm gilt nicht für die Kalibrierung von Härteprüfgeräten für andere Härteprüfverfahren.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

GB/T 230.3-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 3: Kalibrierung von Standardhärteblöcken

GB/T 13683-1999 Terminologie für die Prüfung mechanischer Eigenschaften metallischer Werkstoffe

JJG 112-1999 Verifizierungsverfahren für Metall-Rockwell-Härteprüfer

**3 Begriffe und Definitionen**

Dieser Standard übernimmt GB/T 13683-1999 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

**Direkte Prüfung:** Der Prozess der Überprüfung der Einhaltung von Standardanforderungen durch Messung von Parametern wie Last, Eindringkörpergeometrie, Eindringtiefe und Prüfzykluszeit des Härteprüfgeräts.

**Indirekte Prüfung:** Der Vorgang der Überprüfung der Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit des Härteprüfgeräts durch Messung des Härtewerts an einem Standardblock mit bekannter Härte mithilfe eines Standardhärteblocks.

**Kalibrierung:** Der Vorgang, bei dem das Messsystem eines Härteprüfgeräts angepasst wird, um die Messergebnisse mit dem Standardwert in Einklang zu bringen.

**Standardhärteblock:** Ein kalibrierter Metallblock mit einem bekannten Rockwell-Härtewert, der zur indirekten Überprüfung eines Härteprüfgeräts verwendet wird.

**4 Prüf- und Kalibriergrundsätze**

Die Prüfung und Kalibrierung des Rockwell-Härteprüfgeräts erfolgt mit direkten und indirekten

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

Methoden, um die Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit des Härteprüfgeräts sicherzustellen:

Direkte Prüfung: Überprüfen Sie, ob die wichtigsten Parameter des Härteprüfgeräts (Last, Eindringkörperform, Eindringtiefe, Prüfzykluszeit) den Anforderungen von GB/T 230.1-2001 entsprechen.

Indirekte Prüfung: Verwenden Sie einen Standardhärteblock, um den Härtewert an einem Block mit bekannter Härte zu messen und so die Messabweichung und Wiederholbarkeit des Härteprüfgeräts zu bewerten.

Nach der Kalibrierung sollte die Messabweichung des Härteprüfgeräts die folgenden Anforderungen erfüllen:

HRA, HRC:  $\leq \pm 1,0$  HR.

HRB:  $\leq \pm 2,0$  HR.

---

## 5 Prüf- und Kalibriereinrichtungen

### 5.1 Messgeräte

Kraftmessgerät: Genauigkeit  $\pm 0,5$  %, dient zur Messung der Vorspannung und der Gesamtlast.

Tiefenmessgerät: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm, dient zur Messung der Eindringtiefe.

Zeitmessgerät: Genauigkeit  $\pm 0,1$  s, dient zur Messung der Haltezeit .

Mikroskop oder Projektor: Vergrößerung  $50\times-100\times$ , Auflösung  $<0,5\ \mu\text{m}$  , zur Überprüfung der Eindringkörpergeometrie.

### 5.2 Standardhärteblock

Gemäß GB/T 230.3-2001 ist der Härtebereich wie folgt:

HRA: 70-88 HRA, Abweichung  $\leq \pm 0,5$  HRA.

HRB: 60-100 HRB, Abweichung  $\leq \pm 1,0$  HRB.

HRC: 20-70 HRC, Abweichung  $\leq \pm 0,5$  HRC.

Die Oberflächenrauheit des Standardhärteblocks beträgt  $R_a < 0,05\ \mu\text{m}$  .

### 5.3 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10\ ^\circ\text{C}$  bis  $35\ ^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5\ ^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30-80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6 Inspektions- und Kalibrierungsschritte

### 6.1 Direkte Inspektion

#### 6.1.1 Belastungstest

Die gemessene Vorspannung beträgt 98,07 N (10 kgf) mit einer Abweichung von  $\leq \pm 1,0$  %.

Gesamtlast messen:

HRA, HRC: 588,4 N (60 kgf) , Abweichung  $\leq \pm 0,5$  %.

HRB: 980,7 N (100 kgf) , Abweichung  $\leq \pm 0,5$  %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Belastung wird gleichmäßig und ohne Stöße oder Vibrationen aufgebracht.

#### 6.1.2 Eindringkörperprüfung

Diamant-Kegel-Eindringkörper (HRA, HRC):

Scheitelwinkel  $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$ .

Der obere Kugelradius beträgt 0,2 mm ( $\pm 0,01$  mm).

Die Oberfläche ist frei von Defekten (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ ).

Stahlkugel-Eindringkörper (HRB):

Durchmesser 1,5875 mm ( $\pm 0,005$  mm).

Härte  $\geq$  HRC 60.

Keine Oberflächenfehler.

#### 6.1.3 Überprüfung des Tiefenmesssystems

Messen Sie mit einem Standard-Tiefenmaß die Eindringtiefe mit einer Abweichung von  $< \pm 0,002$  mm.

#### 6.1.4 Prüfung der Testzykluszeit

Haltezeit 5-15 s, Abweichung  $< \pm 0,5$  s.

Lastanlege- und Entladezeit  $< 2$  s, keine Auswirkungen.

#### 6.2 Indirekte Prüfung

Wählen Sie einen Standardhärteblock, der der Prüfskala entspricht (z. B. HRC 60).

Führen Sie 5 Messungen am Standardhärteblock durch und notieren Sie die Härtewerte.

Berechnen Sie den Mittelwert und die Abweichung:

HRA, HRC: Mittelwertabweichung  $< \pm 1,0$  HR, Einzelabweichung  $< \pm 1,5$  HR.

HRB: mittlere Abweichung  $< \pm 2,0$  HR, Einzelabweichung  $< \pm 3,0$  HR.

Wenn die Abweichung den Grenzwert überschreitet, muss das Härteprüfgerät kalibriert werden.

#### 6.3 Kalibrierung

Passen Sie entsprechend den direkten und indirekten Testergebnissen das Last- und Tiefenmesssystem des Härteprüfgeräts an oder ersetzen Sie den Eindringkörper.

Wiederholen Sie den indirekten Test nach der Kalibrierung, um sicherzustellen, dass die Abweichung den Anforderungen entspricht.

### 7 Auswertung der Prüf- und Kalibrierergebnisse

#### 7.1 Qualifikationsfeststellung

Direkte Prüfung: Parameter wie Last, Druckhöhe, Tiefe, Zeit usw. erfüllen alle die Anforderungen.

Indirekter Test:

HRA, HRC: Mittelwertabweichung  $< \pm 1,0$  HR, Wiederholbarkeit  $< \pm 1,5$  HR.

HRB: mittlere Abweichung  $< \pm 2,0$  HR, Wiederholbarkeit  $< \pm 3,0$  HR.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.2 Nicht konforme Behandlung

Schlägt der direkte Test fehl, muss das Härteprüfgerät repariert werden (Eindringkörper austauschen, Lastsystem anpassen usw.).

Wenn der indirekte Test fehlschlägt, muss der Härteprüfer kalibriert und erneut getestet werden.

Bei zweimaligem Nichtbestehen des Prüfergebnisses in Folge darf das Härteprüfgerät nicht verwendet werden.

## 7.3 Analyse der Einflussfaktoren

Lastabweichung: Eine Lastabweichung  $> \pm 0,5 \%$  führt zu einem zu hohen oder zu niedrigen Härtewert ( $> \pm 1$  HR).

Eindringkörperverschleiß: Durch den Eindringkörperverschleiß können höhere Härtewerte ( $> \pm 1$  HR) entstehen.

Umgebungsvibrationen: Vibrationen können zu Tiefenmessfehlern führen ( $> \pm 0,5$  HR).

Standardblockqualität: Eine Abweichung der Standardblockhärte  $> \pm 0,5$  HR beeinflusst die Testergebnisse.

## 8 Prüf- und Kalibrierbericht

Der Inspektions- und Kalibrierungsbericht sollte Folgendes enthalten:

Informationen zum Härteprüfer: Modell, Nummer, Hersteller.

Testbedingungen: Umgebungstemperatur ( $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %), Skala (HRA/HRB/HRC).

Testergebnisse:

Direkte Prüfung: Belastung, Eindringkörpergeometrie, Tiefe, Zeit und andere Parameter und Abweichungen.

Indirekte Prüfung: Sollwert, Messwert, Durchschnittswert und Abweichung des Standardhärteblocks.

Kalibrierabschluss: ob es qualifiziert ist, Kalibriermaßnahmen (z. B. Anpassen der Last, Ersetzen des Druckkopfes).

Prüfdatum und Unterschrift des Betreibers.

## Anhang A (Informativer Anhang) Empfohlene Werte von Standardhärteblöcken

| Herrscher | Härtebereich | Nominalwertbeispiel | Abweichungsantrag |
|-----------|--------------|---------------------|-------------------|
| HRA       | 70-88 HRA    | 85 HRA              | $< \pm 0,5$ HRA   |
| HRB       | 60-100 HRB   | 90 HRB              | $< \pm 1,0$ HRB   |
| HRC       | 20-70 HRC    | 60 HRC              | $< \pm 0,5$ HRC   |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $< 0,02$  mm/m.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Anhang C (Informativer Anhang) Häufige Probleme und Lösungen

| Frage                      | Mögliche Ursachen             | Problemumgehung                                    |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| Der Härtewert ist hoch     | Eindringkörperverschleiß      | Ersetzen Sie den Druckkopf                         |
| Niedriger Härtewert        | Unzureichende Belastung       | Anpassen des Lastsystems                           |
| Schlechte Wiederholbarkeit | Umgebungsvibration            | Verbessern Sie die Testumgebung                    |
| Ungenauere Tiefenmessung   | Ausfall des Tiefenmesssystems | Kalibrieren oder Reparieren von Tiefenmesssystemen |

## Zusammenfassen

GB/T 230.2-2001 „Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Prüfung und Kalibrierung von Rockwell-Härteprüfgeräten und gewährleistet deren Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit durch direkte und indirekte Prüfmethode. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Verbesserung der Genauigkeit und Konsistenz von Härteprüfgeräten bei und ist auf die Verwaltung von Härteprüfgeräten im Maschinenbau, der Materialprüfung usw. anwendbar.

Anhang:

**GB/T 230.3-2001 Metallische Werkstoffe**

**Rockwell-Härteprüfung Teil 3: Kalibrierung von Standardhärteblöcken**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Kalibrierverfahren für Härtevergleichsplatten (einschließlich der Skalen A, B, C, D, E, F, G, H, K, N und T) für die Rockwell-Härteprüfung metallischer Werkstoffe fest und umfasst Kalibrierprinzipien, Geräteanforderungen, Kalibrierschritte, Ergebnisauswertung usw. Diese Norm gilt für die Kalibrierung neu hergestellter oder bereits verwendeter Rockwell-Härtevergleichsplatten, um sicherzustellen, dass ihre Härtewerte den Anforderungen von GB/T 230.1-2001 und GB/T 230.2-2001 entsprechen. Diese Norm gilt nicht für die Kalibrierung von Vergleichsplatten für andere Härteprüfverfahren.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

GB/T 230.2-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

GB/T 13683-1999 Terminologie für die Prüfung mechanischer Eigenschaften metallischer Werkstoffe

JIG 112-1999 Verifizierungsverfahren für Metall-Rockwell-Härteprüfer

**3 Begriffe und Definitionen**

Dieser Standard übernimmt GB/T 13683-1999 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Standardhärteblock: Ein kalibrierter Metallblock mit einem bekannten Rockwell-Härtewert, der zur indirekten Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten verwendet wird.

Kalibrierung: Der Vorgang der Bestimmung des Härtewerts eines Standardhärteblocks mithilfe eines Standardhärteprüfers oder eines rückführbaren Geräts mit höherer Genauigkeit.

Härtegleichmäßigkeit: Die Verteilungsgleichmäßigkeit der Härtewerte auf der Oberfläche eines Standardhärteblocks, ausgedrückt durch die Abweichung der Messpunkte.

Rückführbarkeit: Der Vorgang, den Härtewert eines Härtevergleichskörpers über eine Kalibrierungskette mit einem nationalen oder internationalen Härtevergleichsmaßstab zu verknüpfen.

**4 Kalibrierprinzip**

Die Kalibrierung des Standardhärteblocks erfolgt mit einem kalibrierten, hochpräzisen Rockwell-Härteprüfgerät (gemäß GB/T 230.2-2001). Es werden mehrere Härtemessungen an der Oberfläche des Standardblocks durchgeführt, der durchschnittliche Härtewert und die Härtegleichmäßigkeit berechnet und die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Härtewerts sichergestellt. Die Kalibrierungsergebnisse müssen auf nationale oder internationale Härtestandards rückführbar sein,

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

um die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten.

## 5. Kalibriergeräte

### 5.1 Standard-Rockwell-Härteprüfgerät

Es entspricht den Anforderungen von GB/T 230.2-2001 und wurde direkt und indirekt getestet.

Messabweichung:

HRA, HRC:  $<\pm 0,5$  HR.

HRB:  $<\pm 1,0$  HR.

Der Härteprüfer muss auf einen nationalen oder internationalen Härtestandard rückführbar sein.

### 5.2 Eindringkörper

Diamantkegel-Eindringkörper (HRA, HRC): Spitzenwinkel  $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$ , oberer Kugelradius  $0,2$  mm ( $\pm 0,01$  mm).

Stahlkugel-Eindringkörper (HRB): Durchmesser  $1,5875$  mm ( $\pm 0,005$  mm), Härte  $\geq$  HRC 60.

Die Oberfläche des Eindringkörpers war frei von Defekten (Mikroskopische Untersuchung, Auflösung  $<0,5$   $\mu$  m).

### 5.3 Messgeräte

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm, wird zum Messen der Größe von Standardblöcken verwendet.

Oberflächenrauheitsmessgerät: Messen Sie die Oberflächenrauheit, Genauigkeit  $\pm 0,01$   $\mu$  m.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}80\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6 Standardhärteblockanforderungen

### 6.1 Materialien und Herstellung

Standardblockmaterial: hochwertiger Stahl oder anderes Metall mit stabiler Härte und homogener Mikrostruktur ohne Entmischung oder Porosität.

Größe: Dicke  $\geq 6$  mm, Testoberfläche  $\geq 30 \times 30$  mm.

Oberflächenrauheit:  $R_a < 0,05$   $\mu$  m (poliert).

Die Prüffläche sollte eben sein und eine Parallelität von  $<0,01$  mm aufweisen.

### 6.2 Härtebereich

HRA: 70-88 HRA.

HRB: 60-100 HRB.

HRC: 20-70 HRC.

### 6.3 Kennzeichnung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Der Standardblock sollte mit dem Nennhärtewert, der Skala, der Produktionschargennummer, der Fertigungseinheit und anderen Informationen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 7 Kalibrierungsschritte

### 7.1 Kalibrierungsvorbereitung

Überprüfen Sie den Status des Standardhärteprüfers, um sicherzustellen, dass er die Anforderungen von GB/T 230.2-2001 erfüllt.

Reinigen Sie den Standardhärteblock, entfernen Sie Öl und Staub mit wasserfreiem Ethanol und verwenden Sie ihn nach dem Trocknen.

Messen Sie die Größe und Parallelität des Standardblocks und zeichnen Sie die Oberflächenrauheit auf.

### 7.2 Kalibrierbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Kalibriervorgang

Auf der Prüffläche des Härtevergleichskörpers sind fünf Messpunkte gleichmäßig verteilt, wobei der Punktabstand >3 x Eindruckdurchmesser (HRA, HRC ca. 0,6 mm, HRB ca. 1,5 mm) und der Randabstand >2,5 mm beträgt.

Messen Sie mit einem handelsüblichen Härteprüfgerät die Härtewerte an 5 Punkten und protokollieren Sie die Ergebnisse jeder Messung.

Haltezeit : 5-15 s, Abweichung <±0,5 s.

### 7.4 Ergebnisberechnung

计算 5 个点的平均硬度值:

$$\overline{HR} = \frac{HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4 + HR_5}{5}$$

计算硬度均匀性 (最大偏差):

$$\Delta HR = HR_{\max} - HR_{\min}$$

Qualifikationsfeststellung:

HRA, HRC: mittlere Abweichung <±0,5 HR, Homogenität <1,0 HR.

HRB: mittlere Abweichung <±1,0 HR, Homogenität <2,0 HR.

### 7.5 Ablaufverfolgung

Die Kalibrierergebnisse müssen auf einen nationalen oder internationalen Härtestandard rückführbar sein und die Rückführkette muss dokumentiert werden (z. B. durch ein nationales Metrologieinstitut).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 8 Auswertung der Kalibrierergebnisse

### 8.1 Qualifikation

Abweichung des mittleren Härtewertes:

HRA, HRC:  $\leq \pm 0,5$  HR.

HRB:  $\leq \pm 1,0$  HR.

Härtegleichmäßigkeit:

HRA, HRC:  $< 1,0$  HR.

HRB:  $< 2,0$  HR.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ , Parallelität  $< 0,01 \text{ mm}$ .

### 8.2 Nicht konforme Behandlung

Wenn die Mittelwertabweichung oder Gleichmäßigkeit den Grenzwert überschreitet, darf der Standardblock nicht verwendet werden.

Analysieren Sie die Gründe (z. B. unebenes Material, schlechte Oberflächenqualität), fertigen Sie den Standardblock neu an oder bearbeiten Sie ihn und kalibrieren Sie ihn anschließend.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Materialhomogenität: Mikrostrukturelle Inhomogenitäten (Korngröße  $> \pm 0,2 \mu\text{m}$ ) können zu einer schlechten Homogenität ( $> 1$  HR) führen.

Oberflächenqualität: Rauigkeiten  $R_a > 0,05 \mu\text{m}$  führen zu Schwankungen der Härtewerte ( $> \pm 0,5$  HR).

Genauigkeit des Härteprüfgeräts: Eine Abweichung des Härteprüfgeräts  $> \pm 0,5$  HR beeinflusst das Kalibrierungsergebnis.

Umgebungsbedingte Vibrationen: Vibrationen können zu Messfehlern führen ( $> \pm 0,5$  Std.).

## 9 Kalibrierzertifikat

Das Kalibrierzertifikat sollte folgendes enthalten:

Informationen zum Standardhärteblock: Nennhärtewert, Skala, Produktionschargennummer, Fertigungseinheit.

Kalibrierbedingungen: Härteprüfermodell, Umgebungstemperatur ( $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Kalibrierergebnisse: Härtewert, Durchschnittswert, Gleichmäßigkeit, Abweichung an 5 Punkten.

Informationen zur Rückverfolgbarkeit: Rückverfolgbarkeitskette und nationale/internationale Benchmarks.

Kalibrierergebnis: ob qualifiziert oder nicht.

Kalibrierungsdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Beispiele für Kalibrierwerte von Standardhärteblöcken

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Herrscher | Nennwert | Messwert (HF)                | Durchschnitt (HF) | Gleichmäßigkeit (HR) | Abweichung (HR) |
|-----------|----------|------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|
| HRA       | 85       | 85.1, 85.0, 84.9, 85.2, 85.0 | 85,0              | 0,3                  | ±0,1            |
| HRB       | 90       | 90,2, 89,8, 90,0, 90,1, 89,9 | 90,0              | 0,4                  | ±0,2            |
| HRC       | 60       | 60,1, 60,0, 59,9, 60,2, 60,0 | 60,0              | 0,3                  | ±0,1            |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Anhang C (Informativer Anhang) Häufige Probleme und Lösungen

| Frage                                      | Mögliche Ursachen                 | Probleumlösung                         |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| Schlechte Härtegleichmäßigkeit             | Inhomogene Materialmikrostruktur  | Material ersetzen oder erneut erhitzen |
| Mittelwertabweichung überschritten         | Härteprüfer ist nicht genau genug | Kalibrierung des Härteprüfgeräts       |
| Oberflächenrauheit übertrifft den Standard | Unzureichendes Polieren           | Nachpolieren                           |
| Große Messwertschwankungen                 | Umgebungs vibration               | Verbessern Sie die Testumgebung        |

## Zusammenfassen

GB/T 230.3-2001 „Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 3: Kalibrierung von Härtevergleichsplatten“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Kalibrierung von Rockwell-Härtevergleichsplatten und gewährleistet die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Härtewerte der Vergleichsplatten durch standardisierte Kalibrierschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Verbesserung der Rückverfolgbarkeit und Konsistenz von Härteprüfungen bei und ist in Bereichen wie der Materialprüfung und der messtechnischen Kalibrierung anwendbar.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

GB/T 3848-2001

Methode zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetallwerkstoffen fest. Die Dichte wird durch Wiegen der Probenmasse in Luft und in Flüssigkeit nach dem archimedischen Prinzip berechnet. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetallen mit anderen Hartmetallen (wie TaC , TiC , VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf poröse oder gerissene Hartmetallproben und auch nicht auf die Dichtebestimmung anderer Werkstoffe (wie Stahl oder Keramik).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 3847-1983 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

GB/T 3850-1983 Terminologie von Hartmetall

JJG 196-1990 Eichverfahren für allgemein verwendete Glasmessgeräte

3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 3850-1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Dichte ( $\rho$ ): Die Masse einer Hartmetallprobe geteilt durch ihr Volumen, ausgedrückt in  $\text{g/cm}^3$ .

Archimedisches Prinzip: Wenn eine Probe in eine Flüssigkeit eingetaucht wird, ist der Auftrieb, den sie erfährt, gleich der Masse der Flüssigkeit, die sie verdrängt, und der Auftrieb ist gleich der Differenz zwischen der Masse der Probe in der Luft und der Masse in der Flüssigkeit.

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

4. Bestimmungsprinzip

Die Dichte von Hartmetall wird nach dem archimedischen Prinzip bestimmt und mit den folgenden Schritten berechnet:

Wiegen Sie die Masse der Probe in Luft ( $m_1$ ) ;

Wiegen Sie die Masse der Probe in der Flüssigkeit (normalerweise deionisiertes Wasser) ( $m_2$ ) ;

Das Probenvolumen wird anhand des Auftriebs berechnet, die Probendichte anhand der Flüssigkeitsdichte.

Die Formel zur Berechnung der Dichte lautet:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

In:

$\rho$  ist die Probendichte in  $\text{g/cm}^3$  ;

$m_1$  ist die Masse der Probe in Luft in g ;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

$m_2$  ist die Masse der Probe in der Flüssigkeit in g;

$\rho_0$  ist die Dichte der Flüssigkeit in  $\text{g/cm}^3$  ( $0,9982 \text{ g/cm}^3$  für deionisiertes Wasser bei  $20^\circ \text{C}$ ).

## 5. Messgeräte

### 5.1 Analysenwaage

Genauigkeit:  $\pm 0,1 \text{ mg}$ .

Messbereich:  $0\text{--}200 \text{ g}$ .

Ausgestattet mit einer Aufhängevorrichtung zum Wiegen der Masse der Probe in der Flüssigkeit.

### 5.2 Flüssiges Medium

Deionisiertes Wasser, die Reinheit entspricht den Anforderungen von GB/T 6682-1992.

Temperatur:  $20 \pm 5^\circ \text{C}$ , Messgenauigkeit  $\pm 0,1^\circ \text{C}$ .

$\text{cm}^3$  bei  $20^\circ \text{C}$ ).

### 5.3 Zusatzausrüstung

Thermometer: Genauigkeit  $\pm 0,1^\circ \text{C}$ .

Feiner Metalldraht: Durchmesser  $< 0,1 \text{ mm}$ , wird zum Aufhängen der Probe verwendet.

Becher: Fassungsvermögen  $100\text{--}500 \text{ ml}$ , gemäß JJG 196-1990.

Ultraschallreiniger: Frequenz  $40 \text{ kHz}$ , zum Reinigen von Proben.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10^\circ \text{C}$  bis  $35^\circ \text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}80\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: regelmäßige geometrische Form (z. B. Quader, Zylinder), Masse  $5\text{--}50 \text{ g}$ .

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Poren oder Oxidschichten sein.

Die Proben sollten den Vorbereitungsanforderungen von GB/T 3847-1983 entsprechen.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 0,02 \text{ g/cm}^3$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton, um Öl und Staub zu entfernen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



5 Minuten in einem Ultraschallreiniger reinigen (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Waschen 30 Minuten lang bei 60 °C trocknen oder an der Luft bis zur Gewichtskonstanz trocknen.

#### 6.4 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

### 7 Messschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Die Analysenwaage wurde mit Standardgewichten mit einer Abweichung von  $<\pm 0,1$  mg kalibriert. Messen Sie die Flüssigkeitstemperatur und zeichnen Sie die Dichte des deionisierten Wassers auf (siehe Anhang A).

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 7.3 Messbetrieb

Wiegen Sie die Masse der Probe in Luft ( $m_1$ ) mit einer Analysenwaage und notieren Sie sie auf 0,1 mg genau.

Die Probe wurde an einem dünnen Metalldraht aufgehängt und in deionisiertes Wasser getaucht, wobei sichergestellt wurde, dass die Probe vollständig eingetaucht und blasenfrei war.

Wiegen Sie die Masse der Probe in deionisiertem Wasser ( $m_2$ ) und notieren Sie sie auf 0,1 mg genau.

Jede Probe wurde dreimal gemessen und der Durchschnittswert ermittelt.

Notieren Sie die Flüssigkeitstemperatur und bestimmen Sie die Flüssigkeitsdichte ( $\rho_0$ ) aus einer Tabelle.

#### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Probendichte:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

Als Probendichte wird der Mittelwert aus 3 Messungen mit einer Abweichung von  $<\pm 0,02$  g/cm<sup>3</sup> verwendet.

### 8 Auswertung der Messergebnisse

#### 8.1 Dichtebereich

Der Dichtebereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 14,6–14,9 g/cm<sup>3</sup>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG8 (8 % Co): 14,5–14,8 g/cm<sup>3</sup> .

YT15 (5 % Co + TiC ) : 12,8–13,2 g/cm<sup>3</sup> .

## 8.2 Abweichungsbewertung

Die Dichteabweichung der drei Messungen beträgt  $< \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  , andernfalls muss die Prüfung wiederholt werden.

Liegt der Dichtewert außerhalb des erwarteten Bereichs, muss die Ursache analysiert werden (z. B. Probenporosität, unvollständige Reinigung).

## 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Blasenhaftung: Blasen auf der Probenoberfläche führen zu einem zu großen  $m_2$  und einer zu geringen Dichte (Abweichung  $> 0,05 \text{ g/cm}^3$  ) .

Flüssigkeitstemperatur: Temperaturabweichung  $> \pm 5^\circ\text{C}$  beeinflusst  $\rho_0$  , Dichteabweichung  $> 0,01 \text{ g/cm}^3$  .

Probenporosität: Eine Porosität  $> 0,5 \%$  führt zu einer geringeren Dichte (Abweichung  $> 0,1 \text{ g/cm}^3$  ) .

Waagengenauigkeit: Waagenabweichungen  $> \pm 0,1 \text{ mg}$  wirken sich auf die Dichteberechnung aus (Abweichung  $> 0,01 \text{ g/cm}^3$  ) .

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, flüssiges Medium (deionisiertes Wasser), Temperatur ( $^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit (%).

Testergebnisse: Masse in Luft ( $m_1$  ) , Masse in Flüssigkeit ( $m_2$  ) , Dichte ( $\rho$ ), Mittelwert und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Tabelle der Beziehung zwischen der Dichte von deionisiertem Wasser und der Temperatur

| Temperatur ( $^\circ\text{C}$ ) | Dichte ( $\rho_0$ ) ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 15                              | 0,9991                                  |
| 20                              | 0,9982                                  |
| 25                              | 0,9970                                  |
| 30                              | 0,9957                                  |

## Anhang B (Informativer Anhang) Typische Referenzwerte für die Hartmetalldichte

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- % ) | Dichte ( $\text{g/cm}^3$ ) | Typische Anwendungen |
|-------|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| YG6   | 6                     | 14,6-14,9                  | Bergbaubohrer        |
| YG8   | 8                     | 14,5-14,8                  | Schneidwerkzeuge     |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Dichte ( g/cm <sup>3</sup> ) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| YT15  | 5                    | 12,8-13,2                    | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### Zusammenfassen

GB/T 3848-2001 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Hartmetall-dichte und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch das archimedische Prinzip. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle von Hartmetallwerkstoffen und bietet zuverlässigen technischen Support für Hochleistungsanwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

GB/T 3850-2001

Methode zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetallwerkstoffen fest. Die Biegefestigkeit (Transverse Bruchfestigkeit, TRS) wird mit dem Dreipunktbiegeprüfverfahren berechnet, indem eine Last bis zum Bruch der Probe aufgebracht wird. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetallen mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht auf poröse oder gerissene Hartmetallproben anwendbar und gilt auch nicht für die Bestimmung der Biegefestigkeit anderer Materialien (wie Stahl oder Keramik).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 3847-1983 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

GB/T 3851-1983 Hartmetall-Terminologie

GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 3851-1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Biegefestigkeit ( $\sigma_{bb}$ ) oder Biegebruchfestigkeit (TRS): Die maximale Spannung, der eine Hartmetallprobe in einem Dreipunkt-Biegeversuch standhalten kann, ausgedrückt in MPa.

Dreipunktbiegeversuch: Ein Prüfverfahren, bei dem die Probe auf zwei Auflagepunkte gelegt und in der Mitte so lange belastet wird, bis die Probe bricht.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Biegefestigkeit von Hartmetall wird mit dem Dreipunktbiegeversuch ermittelt. Die Probe wird auf zwei Auflagepunkte gelegt und in der Mitte belastet, bis sie bricht. Die maximale Bruchlast (P) wird aufgezeichnet und die Biegefestigkeit anhand von Probengröße und Spannweite berechnet. Die Formel zur Berechnung der Biegefestigkeit lautet:

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

In:

$\sigma_{bb}$  ist die Biegefestigkeit in MPa;

P ist die Bruchlast in N;

L ist die Stützpunktspanne in mm;

b ist die Breite der Probe in mm;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



h ist die Probendicke in mm.

## 5. Messgeräte

### 5.1 Universalprüfmaschine

Lastbereich: 0–50 kN , Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Ladegeschwindigkeitsregelung: 0,5–5 mm/min, Abweichung  $< \pm 0,1$  mm/min.

Ausgestattet mit einer Dreipunkt-Biegevorrichtung ist die Spannweite der Auflagepunkte einstellbar.

### 5.2 Vorrichtung

Durchmesser der Auflage- und Belastungspunkte: 2 mm ( $\pm 0,02$  mm).

Stützpunktspanne: 30 mm ( $\pm 0,05$  mm).

Die Oberflächenhärte der Auflage- und Belastungspunkte beträgt  $\geq \text{HRC } 60$ , die Oberflächenrauigkeit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

### 5.3 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm, wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Mikrometer: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm, wird zur präzisen Dickenmessung verwendet.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Abmessungen  $35 \times 5 \times 5$  mm ( $\pm 0,1$  mm).

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Poren oder Oxidschichten sein.

Die Proben sollten den Vorbereitungsanforderungen von GB/T 3847-1983 entsprechen.

Die Oberflächenrauigkeit der Probe beträgt  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  (poliert).

Die vier Längsseiten der Probe wurden um  $0,1 \times 45^\circ$  abgeschrägt, um die Spannungskonzentration zu verringern.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 10\%$ ) muss die Probenanzahl auf 8 erhöht werden.

### 6.3 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.4 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.5 Probenmessung

Die Breite (b) und Dicke (h) der Proben wurden mit einem Messschieber und einem Mikrometer mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,02$  mm gemessen.

# 7 Messschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Die Prüfmaschine wurde mit einem Standardkraftsensor mit einer Lastabweichung von  $< \pm 0,5$  % kalibriert.

Prüfen Sie die Spannweite der Vorrichtungsauflagepunkte, die Abweichung beträgt  $< \pm 0,05$  mm.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 7.3 Messbetrieb

Legen Sie die Probe auf die beiden Auflagepunkte der Dreipunkt-Biegevorrichtung und achten Sie dabei darauf, dass die Probe waagrecht liegt und die Spannweite L 30 mm ( $\pm 0,05$  mm) beträgt.

Stellen Sie den Belastungspunkt so ein, dass er sich in der Mitte der Probe befindet.

Wenden Sie die Last mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min ( $\pm 0,1$  mm/min) an.

Notieren Sie die maximale Belastung (P) in N, wenn die Probe bricht.

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test 5–8 Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse sicherzustellen.

## 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Biegefestigkeit:

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Nehmen Sie den Durchschnittswert von 5–8 Proben mit einer Abweichung von  $< \pm 10$  %.

# 8 Auswertung der Messergebnisse

## 8.1 Biegefestigkeitsbereich

Der Biegefestigkeitsbereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 2000–2500 MPa.

YG8 (8 % Co): 1800–2200 MPa.

YT15 (5 % Co + TiC) : 1300–1600 MPa.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2 Abweichungsbewertung

von 5–8 Proben liegt bei  $\leq \pm 10\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt der Biegefestigkeitswert außerhalb des erwarteten Bereichs, muss die Ursache analysiert werden (z. B. Probendefekte, falsch ausgerichtete Vorrichtungen).

## 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenfehler: Porosität  $> 0,5\%$  oder Mikrorisse führen zu geringerer Festigkeit (Abweichung  $> 15\%$ ).

Ausrichtung der Vorrichtung: Eine Fehlausrichtung der Auflagepunkte kann zu Spannungskonzentrationen und geringer Festigkeit führen (Abweichung  $> 10\%$ ).

Belastungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeit  $> 5\text{ mm/min}$  führt zu höherer Festigkeit (Abweichung  $> 5\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $> \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ) oder ungleichmäßige Verteilung der Bindephase mindert die Festigkeit (Abweichung  $> 10\%$ ).

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Spanne (L), Ladegeschwindigkeit, Umgebungstemperatur ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $30\% - 80\%$ ).

$\sigma_{bb}$ ), Mittelwert und Abweichung jeder Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Biegefestigkeit typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt (Gew.-%) | Biegefestigkeit (MPa) | Typische Anwendungen         |
|-------|--------------------|-----------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                  | 2000-2500             | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                  | 1800-2200             | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                  | 1300-1600             | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30-80\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $< 0,02\text{ mm/m}$ .

## Zusammenfassen

GB/T 3850-2001 „Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch die Dreipunkt-Biegeprüfmethode. Die Umsetzung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

dieser Norm trägt zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetallwerkstoffen bei und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Hochleistungsanwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.



Anhang:

GB/T 3851-2001

Bestimmungsmethode der Bruchzähigkeit von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit (ausgedrückt als Spannungsintensitätsfaktor KIC) von Hartmetallwerkstoffen fest. Die Bruchzähigkeit wird mit dem Einkanten-Kerbbalkenprüfverfahren (SENB) durch Belastung der Probe berechnet. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetallen mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht auf poröse oder gerissene Hartmetallproben anwendbar und gilt auch nicht für die Bestimmung der Bruchzähigkeit anderer Materialien (wie Stahl oder Keramik).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 3847-1983 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

GB/T 3850-1983 Terminologie von Hartmetall

GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 3850-1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ): Die Fähigkeit von Hartmetallproben, im gerissenen Zustand einem Bruch zu widerstehen, ausgedrückt durch den kritischen Spannungsintensitätsfaktor mit der Einheit  $MPa \cdot m^{1/2}$ .

Single-Edge Notched Beam (SENB)-Test: Ein Testverfahren, bei dem auf einer Seite der Probe ein Vorriss erzeugt und mithilfe der Dreipunktbiegemethode eine Last bis zum Bruch aufgebracht wird.

Vorriss: Ein erster Riss, der durch maschinelle Bearbeitung oder Ermüdungsvorrissbildung vorbereitet wird, um tatsächliche Defekte zu simulieren.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Bruchzähigkeit von Hartmetall wird mit dem Einkanten-Kerbbalken-Prüfverfahren (SENB) ermittelt. Einseitig der Probe wird ein vorgefertigter Riss erzeugt, die Probe auf eine Dreipunkt-Biegevorrichtung gelegt und bis zum Bruch belastet. Die maximale Bruchlast (P) wird aufgezeichnet und die Bruchzähigkeit anhand von Probengröße, Risslänge und -spanne berechnet. Die Berechnungsformel für die Bruchzähigkeit lautet:

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

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](http://www.ctia.com.cn)

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

$K_{IC}$  ist die Bruchzähigkeit in  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;

P ist die Bruchlast in N;

L ist die Stützpunktspanne in mm;

B ist die Probendicke in mm;

W ist die Breite der Probe in mm;

Y ist ein geometrischer Faktor, der von der relativen Risslänge  $a/W$  abhängt (siehe Anhang A).

## 5. Messgeräte

### 5.1 Universalprüfmaschine

Lastbereich: 0–50 kN , Genauigkeit  $\pm 0,5 \%$ .

Ladegeschwindigkeitsregelung: 0,05–0,5 mm/min, Abweichung  $< \pm 0,01$  mm/min.

Ausgestattet mit einer Dreipunkt-Biegevorrichtung ist die Spannweite der Auflagepunkte einstellbar.

### 5.2 Vorrichtung

Durchmesser der Auflage- und Belastungspunkte: 2 mm ( $\pm 0,02$  mm).

Stützpunktspanne: 20 mm ( $\pm 0,05$  mm).

Die Oberflächenhärte der Auflage- und Belastungspunkte beträgt  $\geq \text{HRC } 60$ , die Oberflächenrauigkeit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

### 5.3 Rissvorbereitungsgeräte

Präzisionsschneidemaschine: Wird zum Bearbeiten von ersten Einschnitten mit einer Schnittbreite von  $< 0,2$  mm und einer Tiefengenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm verwendet.

Mikroskop: Vergrößerung  $50\times$ – $200\times$ , Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ , dient zur Messung der Risslänge.

### 5.4 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm, wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Mikrometer: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm, wird zur präzisen Dickenmessung verwendet.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Abmessungen  $20 \times 4 \times 2,5$  mm ( $\pm 0,1$  mm).

Die Oberfläche der Probe sollte flach und frei von Rissen oder Oxidschichten sein.

Die Proben sollten den Vorbereitungsanforderungen von GB/T 3847-1983 entsprechen.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  (poliert).

### 6.2 Vorgefertigte Risse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schnittposition: befindet sich unten in der Mitte der Probe, mit einer Länge  $a$  von 0,2–0,5 mal der Breite  $W$  der Probe (d. h.  $a/W = 0,2 - 0,5$ ).

Schneidezahnbreite:  $<0,2$  mm, Schnittpitze auf 0,05 mm Radius abgestumpft.

Die Ausschnitte können durch maschinelle Bearbeitung oder durch Ermüdungsvorrißbildung vorbereitet werden. Zur Simulation natürlicher Risse wird eine Ermüdungsvorrißbildung empfohlen.

### 6.3 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Abweichungen der Ergebnisse ( $>10\%$ ) muss die Probenanzahl auf 8 erhöht werden.

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

### 6.5 Probenmessung

Die Probenbreite ( $W$ ), Dicke ( $B$ ) und Risslänge ( $a$ ) wurden mit einem Messschieber und einem Mikrometer mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,02$  mm gemessen.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Die Prüfmaschine wurde mit einem Standardkraftsensor mit einer Lastabweichung von  $\leq \pm 0,5\%$  kalibriert.

Prüfen Sie die Spannweite der Vorrichtungsauflagepunkte, die Abweichung beträgt  $\leq \pm 0,05$  mm.

Die Risslängenmessung wurde mittels Mikroskop mit einer Abweichung von  $\leq \pm 0,01$  mm kalibriert.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Messbetrieb

Die Probe wurde mit einer Spannweite  $L$  von 20 mm ( $\pm 0,05$  mm) auf den beiden Auflagepunkten der Dreipunktbiegevorrichtung platziert.

Stellen Sie den Belastungspunkt so ein, dass er sich in der Mitte der Probe befindet und mit dem vorgefertigten Riss ausgerichtet ist.

Wenden Sie die Last mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/min ( $\pm 0,01$  mm/min) an.

Notieren Sie die maximale Belastung ( $P$ ) in N, wenn die Probe bricht.

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test 5–8 Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sicherzustellen.

#### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie den geometrischen Faktor Y (basierend auf der a/W -Tabelle, siehe Anhang A).

Berechnen Sie die Bruchzähigkeit:

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

Nehmen Sie den Durchschnittswert von 5–8 Proben mit einer Abweichung von  $\leq \pm 10\%$ .

### 8 Auswertung der Messergebnisse

#### 8.1 Bruchzähigkeitsbereich

Der Bruchzähigkeitsbereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co):  $10\text{--}12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

YG8 (8 % Co):  $12\text{--}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

YT15 (5 % Co + TiC) :  $8\text{--}10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

#### 8.2 Abweichungsbewertung

von 5–8 Proben liegt bei  $\leq \pm 10\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt der Bruchzähigkeitswert außerhalb des erwarteten Bereichs, muss die Ursache (z. B. Rissqualität, Probendefekte) analysiert werden.

#### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Rissqualität: Der KIC kann zu hoch sein (Abweichung  $> 10\%$ ), wenn die Schnittbreite  $> 0,2 \text{ mm}$  ist oder die Spitze nicht gleichmäßig abgestumpft ist.

Ausrichtung der Vorrichtung: Falsch ausgerichtete Stützpunkte führen zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung und einem niedrigen  $K_{IC}$  (Abweichung  $> 5\%$ ).

Belastungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeiten  $> 0,5 \text{ mm/min}$  beeinflussen das Bruchverhalten und der  $K_{IC}$  wird zu hoch (Abweichung  $> 5\%$ ).

Mikrostruktur: Eine ungleichmäßige Verteilung der Bindungsphase (Co-Gehaltsschwankung  $> \pm 0,5\%$ ) reduziert den  $K_{IC}$  (Abweichung  $> 10\%$ ).

### 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe, Risslänge (a).

Testbedingungen: Gerätemodell, Spanne (L), Ladegeschwindigkeit, Umgebungstemperatur ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $30\% - 80\%$ ).

$K_{IC}$ ), Durchschnittswert und Abweichung jeder Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

### Anhang A (Informativer Anhang) Tabelle des geometrischen Faktors Y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



| $a/W$ | $Y$  |
|-------|------|
| 0.2   | 1.90 |
| 0.3   | 2.10 |
| 0.4   | 2.40 |
| 0.5   | 2.80 |

注:  $Y$  值为近似值, 实际应用中可参考标准提供的详细表或插值计算。

## Anhang B (Informativer Anhang) Referenzwerte der Bruchzähigkeit typischer Hartmetalle

| 牌号   | Co 含量 (wt%) | 断裂韧性 ( $K_{IC}$ ) (MPa·m <sup>1/2</sup> ) | 典型应用  |
|------|-------------|-------------------------------------------|-------|
| YG6  | 6           | 10-12                                     | 采矿钻头  |
| YG8  | 8           | 12-15                                     | 切削工具  |
| YT15 | 5           | 8-10                                      | 精加工刀具 |

## Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

GB/T 3851-2001 „Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch das einseitige Kerbbalkenprüfverfahren. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung der Rissbeständigkeit von Hartmetallwerkstoffen bei und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Hochleistungsanwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

## GB/T 9097-2001

### Bestimmungsmethode der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetallwerkstoffen fest, einschließlich der Bestimmung der magnetischen Sättigungsintensität (Magnetisierungsintensität) und der Koerzitivkraft ( $H_c$ ) mittels elektromagnetischer Induktion und Hystereseschleifenmethode. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf nichtferromagnetische Werkstoffe oder Hartmetall ohne Kobalt.

#### 2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 3847-1983 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

GB/T 3850-1983 Terminologie von Hartmetall

GB/T 3848-2001 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

#### 3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 3850-1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Magnetische Sättigungsintensität ( $M_s$ ): Die magnetische Intensität einer Hartmetallprobe, wenn sie unter einem ausreichend starken äußeren Magnetfeld die magnetische Sättigung erreicht, ausgedrückt in kA/m oder emu/g.

Koerzitivkraft ( $H_c$ ): Nachdem die Hartmetallprobe magnetisiert wurde, ist die magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, damit das externe Magnetfeld sich umkehrt und die Magnetisierungsintensität der Probe auf Null setzt, die Einheit ist kA/m.

Hystereseschleife: Eine geschlossene Kurve, die entsteht, wenn sich die Magnetisierungsintensität einer Probe unter Einwirkung eines externen Magnetfelds mit der magnetischen Feldstärke ändert und zur Messung der Koerzitivkraft verwendet wird.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

#### 4. Bestimmungsprinzip

Die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall basiert auf der elektromagnetischen Induktionsmethode und der Hystereseschleifenmethode:

Magnetische Sättigungsintensität ( $M_s$ ): Die magnetische Sättigungsintensität der Probe wird gemessen, indem die Probe einem starken Magnetfeld (üblicherweise  $>1000$  kA/m) ausgesetzt wird, um die magnetische Sättigung der Kobaltphase zu erreichen. Die magnetische Sättigungsintensität hängt mit dem Kobaltgehalt zusammen und kann zur Beurteilung der Qualität der Kobaltphase

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

verwendet werden .

der Koerzitivkraft (  $H_c$  ): Durch Zeichnen der Hystereseschleife der Probe wird die magnetische Feldstärke erfasst , die die Magnetisierungsintensität bei Umkehrung des äußeren Magnetfelds auf 0 sinken lässt (die Koerzitivkraft). Die Koerzitivkraft spiegelt die magnetische Mikrostruktur und Korngröße des Materials wider.

## 5. Messgeräte

### 5.1 Magnetisches Eigenschaftsprüfgerät

Gerätetyp: Hystereseschleifeninstrument (z. B. oszillierendes Probenmagnetometer VSM oder Instrument zur elektromagnetischen Kraftmethode).

Magnetfeldbereich: 0–2000 kA/m, Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Messbereich der Magnetisierungsintensität: 0–1000 kA/m oder 0–200 emu/g, Genauigkeit  $\pm 0,1\%$ .

Ausgestattet mit Elektromagneten oder supraleitenden Magneten, um ein gleichmäßiges Magnetfeld zu erzeugen.

### 5.2 Zusatzausrüstung

Analysenwaage: Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg, wird zum Wiegen der Probenmasse verwendet.

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm, wird zum Messen der Probengröße verwendet.

### 5.3 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20  $\pm$  5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, empfohlen  $< 60\%$ .

Keine Vibration, keine Störungen durch externe Magnetfelder (Umgebungsmagnetfeld  $< 0,1$  kA/m).

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe ist 6×6×10 mm oder 6 mm Durchmesser und 10 mm Höhe.

Probenmasse: 0,5–5 g, je nach Geräteanforderungen.

Die Oberfläche der Probe sollte flach und frei von Rissen oder Oxidschichten sein.

Die Proben sollten den Vorbereitungsanforderungen von GB/T 3847-1983 entsprechen.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> \pm 2\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.4 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer und Markennamen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

#### 6.5 Probenmessung

Wiegen Sie die Probenmasse mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  g.

Messen Sie die Probengröße mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,02$  mm.

### 7 Messschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Verwenden Sie Standardproben ( wie reines Nickel oder Standard-Hartmetall), um den Tester für magnetische Eigenschaften zu kalibrieren.

Kalibrieren Sie die magnetische Feldstärke mit einer Abweichung von  $< \pm 0,5$  %.

Kalibrierte Magnetisierungsmessung mit Abweichung  $< \pm 0,1$  %.

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $20 \pm 5$  °C.

Relative Luftfeuchtigkeit:  $< 30$  %– $80$  %.

Keine externen Magnetfeldstörungen ( $< 0,1$  kA/m).

#### 7.3 Bestimmung der magnetischen Sättigungsintensität

Legen Sie die Probe auf den Probentisch des Magneteigenschaftstesters und achten Sie darauf, dass die Achse der Probe parallel zur Richtung des Magnetfelds verläuft.

Wenden Sie ein starkes Magnetfeld ( $> 1000$  kA/m) an, um die Probe in die magnetische Sättigung zu bringen.

Notieren Sie die Probenmagnetisierung (M) in kA/m oder emu/g.

Berechnen Sie anhand der Probenmasse und -dichte die magnetische Sättigungsintensität:

或

$$M_s = \frac{M}{m}$$
$$M_s = \frac{M \cdot \rho}{V}$$

In:

$M_s$  ist die magnetische Sättigungsintensität in emu/g oder kA/m;

M ist der gemessene Wert in emu oder kA/m;

m ist die Masse der Probe in g;

$\rho$  ist die Probendichte in g/cm<sup>3</sup> ;

V ist das Probenvolumen in cm<sup>3</sup> .

#### 7.4 Bestimmung der Koerzitivfeldstärke

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Probe wird in den anfänglichen entmagnetisierten Zustand gebracht (externes Magnetfeld ist 0). Es wird ein allmählich zunehmendes Magnetfeld angelegt, bis die Probe die magnetische Sättigung erreicht.

Wenden Sie das Magnetfeld in die entgegengesetzte Richtung an, zeichnen Sie die Hystereseschleife und notieren Sie die externe Magnetfeldstärke, die der Magnetisierungsstärke von 0 entspricht, also der Koerzitivkraft  $H_c$ .

Jede Probe wurde dreimal gemessen und der Durchschnittswert ermittelt.

## 7.5 Ergebnisberechnung

Magnetische Sättigungsintensität: Berechnen Sie den Durchschnittswert aus 3 Messungen mit einer Abweichung von  $<\pm 2\%$ .

Koerzitivfeldstärke: Berechnen Sie den Durchschnittswert aus 3 Messungen mit einer Abweichung von  $<\pm 2\%$ .

---

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Magnetischer Eigenschaftsbereich

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall variieren je nach Sorte und Kobaltgehalt:

YG6 (6 % Co): magnetische Sättigungsintensität 90–110 emu/g, Koerzitivkraft 5–10 kA/m.

YG8 (8 % Co): magnetische Sättigungsintensität 110–130 emu/g, Koerzitivkraft 4–8 kA/m.

YT15 (5 % Co + TiC): magnetische Sättigungsintensität 70–90 emu/g, Koerzitivkraft 8–12 kA/m.

### 8.2 Abweichungsbewertung

Die Abweichung der magnetischen Sättigungsintensität und der Koerzitivkraft der drei Proben beträgt  $<\pm 3\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der Wert der magnetischen Eigenschaft den erwarteten Bereich überschreitet, muss die Ursache analysiert werden (z. B. ungleichmäßige Verteilung der Kobaltphase und mikrostrukturelle Defekte).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Kobaltphasenverteilung: Schwankungen im Kobaltgehalt ( $>\pm 0,5\%$ ) oder eine ungleichmäßige Verteilung können zu Abweichungen der magnetischen Eigenschaften ( $>3\%$ ) führen.

Korngröße: Ungleichmäßige WC-Korngröße ( $>\pm 0,5\ \mu\text{m}$ ) beeinflusst die Koerzitivfeldstärke (Abweichung  $>\pm 2\%$ ).

Externe magnetische Störungen: Umgebungsmagnetfelder  $>0,1\ \text{kA/m}$  verursachen Messfehler ( $>\pm 5\%$ ).

Probenqualität: Eine Porosität  $> 0,5\%$  verringert die magnetische Sättigungsintensität (Abweichung  $> 5\%$ ).

---

## 9 Prüfbericht und

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe und Qualität.

Testbedingungen: Gerätemodell, Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %), externe Magnetfeldstörungen.

Testergebnisse: magnetische Sättigungsintensität ( Ms ), Koerzitivkraft ( Hc ), Durchschnittswert und Abweichung jeder Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der magnetischen Eigenschaften typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt<br>( Gew.-% ) | Magnetische<br>Sättigungsintensität (emu/g) | Koerzitivkraft<br>(kA/m) | Typische Anwendungen            |
|-------|-------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                       | 90-110                                      | 5-8                      | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                       | 110-130                                     | 4-8                      | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                       | 70-90                                       | 8-12                     | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, empfohlen < 60 %.

Keine externen Vibrationen, keine externen Magnetfeldstörungen (<0,1 kA/m).

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

GB/T 9097-2001 „Methode zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall, einschließlich der Bestimmung der magnetischen Sättigungsintensität und Koerzitivfeldstärke, um die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse zu gewährleisten. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung der Qualität und Mikrostruktur der Kobaltphase in Hartmetall bei und bietet technische Unterstützung bei der Materialproduktion und Qualitätskontrolle. Sie ist anwendbar auf Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer und andere Bereiche.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

Anhang:

GB/T 3849-2008

Vickers-Härteprüfverfahren für Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Prüfverfahren für die Vickershärte (HV) von Hartmetall fest, einschließlich Prüfprinzip, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf beschichtetes Hartmetall oder Hartmetall nach Oberflächenverfestigung (z. B. Härteprüfung der aufgekohlten Schicht).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 230.1-2004 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 1: Prüfverfahren (Skala A, B, C)

GB/T 4340.1-1999 Metall-Vickers-Härteprüfung Teil 1: Prüfverfahren

GB/T 5249-2008 Allgemeine Spezifikation für die Vorbereitung von Hartmetallproben

JJG 151-2006 Verifizierungsverfahren für Vickers-Härteprüfgeräte

3 Begriffe und Definitionen

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

Vickershärte (HV): Die Fähigkeit von Hartmetall, dem Eindringen eines Vickers-Eindringkörpers zu widerstehen, ausgedrückt als Vickershärtewert in der Einheit  $\text{kgf/mm}^2$ .

Dieser Standard verwendet hauptsächlich HV30 (Last 30 kgf) als Standardtestbedingung.

Eindruckdiagonale: Die Länge der beiden Diagonalen des quadratischen Eindrucks, der entsteht, wenn der Vickers-Eindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt wird, in mm.

4 Prüfprinzip

Die Vickers-Härteprüfung wird durchgeführt, indem ein Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper (Scheitelwinkel  $136^\circ$ ) mit einer bestimmten Last (üblicherweise 30 kgf) in die Oberfläche der Hartmetallprobe gedrückt, für eine bestimmte Zeit gehalten und dann entlastet wird. Anschließend wird die Länge der beiden Diagonalen des Eindrucks ( $d_1$ ,  $d_2$ ) gemessen, die durchschnittliche Diagonallänge ( $d$ ) berechnet und anschließend der Vickers-Härtewert (HV) ermittelt. Die Berechnungsformel lautet wie folgt:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中:

- $F$  为试验载荷, 单位为 kgf (本标准为 30 kgf) ;
- $d$  为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ .

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Erfüllen Sie die Anforderungen der Verifizierungsvorschriften JJG 151-2006.

Lastbereich: 5–50 kgf, Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Haltezeitregelung: 5-60 s, Abweichung  $< \pm 0,5$  s.

### 5.2 Druckhöhe

Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper, Scheitelwinkel  $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$ .

Die Oberfläche des Eindringkörpers ist frei von Defekten und weist klare Kanten auf (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ ).

### 5.3 Messgerät

Mikroskop: Vergrößerung  $400\times$ – $600\times$ , Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ .

Ausgestattet mit einem digitalen Anzeigesystem mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,001$  mm.

### 5.4 Kalibrierblock

Hartmetall-Standardkalibrierblöcke, Härtebereich HV 1200-2000, Abweichung  $< \pm 2\%$ .

Die Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers beträgt  $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ .

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Die Probe sollte eine regelmäßige geometrische Form (z. B. Quader, Zylinder) mit einer Testoberfläche  $> 5 \times 5$  mm und einer Dicke  $> 2$  mm haben.

Die Prüfoberfläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten, Bearbeitungsspuren oder mikroskopischen Defekten sein.

Oberflächenrauheit  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$  (poliert).

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität der Testergebnisse sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Charge nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 3\%$ ) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

### 6.3 Probenkennzeichnung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

## 7 Testschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Der Härteprüfer wurde mit einem Standardkalibrierblock und einer Last von 30 kgf kalibriert und dreimal gemessen, mit einer Abweichung von  $\leq \pm 1\%$ .

Überprüfen Sie den Zustand des Eindringkörpers, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Defekte vorliegen.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Relative Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10\%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und achten Sie darauf, dass die Prüfoberfläche eben ist.

Wählen Sie eine Last von 30 kgf (HV30) und eine Haltezeit von 10-15 s.

Der Eindringkörper wird langsam in die Probenoberfläche gedrückt und nach Aufrechterhaltung der Last automatisch entlastet.

Die Längen der beiden Diagonalen der Vertiefung ( $d_1$ ,  $d_2$ ) wurden mit einem Mikroskop mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm gemessen.

Pro Probe sind 5 Eindruckpunkte zu messen, wobei der Eindruckabstand  $> 3$  mal der Diagonalenlänge ( $> 0,3$  mm) und der Abstand vom Probenrand  $> 0,5$  mm sein muss.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die durchschnittliche diagonale Länge der Einkerbung an jedem Punkt:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Berechnen Sie den Vickershärtewert an jedem Punkt:

$$HV = \frac{1,8544 \times 30}{d^2}$$

Als Härtewert der Probe werden fünf Eindruckpunkte mit einer Abweichung von  $\leq \pm 3\%$  angenommen.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.1 Härtewertebereich

Der Vickershärtewert von Hartmetall beträgt üblicherweise HV 1200–2000, und der genaue Bereich hängt von der Sorte ab:

YG6: HV 1500-1600.

YG 8:HV 1450-1550.

YT 15:HV 1550-1650.

### 8.2 Abweichungsbewertung

der 5 Eindrückpunkte liegt bei  $\leq \pm 3\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der Härtewert der Probe die technischen Anforderungen der Sorte überschreitet, müssen die Gründe (wie z. B. ungleichmäßige Mikrostruktur und übermäßige Porosität) analysiert und eine erneute Probenahme und Prüfung durchgeführt werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Oberflächenqualität: Eine Oberflächenrauheit  $R_a > 0,1 \mu m$  führt zu geringeren Härtewerten (Abweichung  $> 5\%$ ).

Ladezeit: Eine Haltezeit von  $< 10 s$  oder  $> 15 s$  beeinflusst die Eindruckgröße (Abweichung  $\pm 2\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige WC-Korngröße ( $> \pm 0,2 \mu m$ ) oder hohe Porosität ( $> A02$ ) können zu Härteschwankungen ( $> \pm 3\%$ ) führen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Last (30 kgf), Haltezeit (10–15 s), Umgebungstemperatur ( $20 \pm 5^\circ C$ ), Luftfeuchtigkeit ( $50 \pm 10\%$ ).

Prüfergebnisse: Diagonale Länge jedes Eindruckpunktes ( $d_1, d_2$ ), Härtewert (HV), durchschnittlicher Härtewert und Abweichung.

Bewertungsfazit: ob es den technischen Anforderungen der Marke entspricht.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

### Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Vickershärte typischer Hartmetalle

| Marke | Vickershärte (HV30) | Co-Gehalt (Gew.-%) | Korngröße ( $\mu m$ ) | Typische Anwendungen         |
|-------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|
| YG6   | 1500-1600           | 6                  | 0,8-1,2               | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 1450–1550           | 8                  | 0,8-1,2               | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 1550–1650           | 5                  | 0,6-1,0               | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Temperatur: 20±5°C.

Luftfeuchtigkeit: 50 ± 10 %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### Anhang C (Informativer Anhang) Vergleichstabelle des Vickershärte werts und der diagonalen Länge (Last 30 kgf)

| Durchschnittliche Diagonallänge d (mm) | Vickershärte HV30 | Durchschnittliche Diagonallänge d (mm) | Vickershärte HV30 |
|----------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------|
| 0,100                                  | 5558              | 0,150                                  | 2469              |
| 0,110                                  | 4587              | 0,160                                  | 2166              |
| 0,120                                  | 3855              | 0,170                                  | 1915              |
| 0,130                                  | 3283              | 0,180                                  | 1713              |
| 0,140                                  | 2832              | 0,190                                  | 1542              |

### Zusammenfassen

GB/T 3849-2008 „Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Vickershärteprüfung von Hartmetall und gewährleistet durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse. Die Umsetzung der Norm unterstützt die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet zuverlässigen technischen Support für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer und Formen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Anhang:

GB/T 7997-2010

Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ) von Hartmetall fest, einschließlich Prüfgrundsätzen, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritten, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm ist anwendbar auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie auf Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf beschichtetes Hartmetall oder Hartmetall nach Oberflächenverfestigung (z. B. Bruchzähigkeitstest der aufgekohlten Schicht).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 3851-2001 Bestimmungsmethode der Bruchzähigkeit von Hartmetall

GB/T 5249-2008 Allgemeine Spezifikation für die Vorbereitung von Hartmetallproben

GB/T 6397-2002 Prüfverfahren für unidirektionales Ermüdungsrisswachstum in metallischen Werkstoffen

JJG 151-2006 Verifizierungsverfahren für Vickers-Härteprüfgeräte

ISO 23146:2008 Hartmetall – Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit

3 Begriffe und Definitionen

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ): Die Fähigkeit von Hartmetall, der Rissausbreitung zu widerstehen, gemessen in  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , spiegelt die Bruchfestigkeit des Materials wider, wenn eine Kerbe oder ein Riss vorhanden ist.

Single Edge Notched Beam (SEPB): Ein Probentyp für die Prüfung der Bruchzähigkeit, der auf einer Seite gekerbt ist, um einen Riss zu simulieren.

4 Prüfprinzip

Der Bruchzähigkeitstest erfolgt nach der Einkanten-Kerbbalkenmethode (SEPB). Dabei wird eine einkantige Kerbe in die Probe eingearbeitet und die Probe in einem Dreipunkt-Biegeversuch bis zum Bruch belastet. Die Bruchlast wird aufgezeichnet und die Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  anhand der geometrischen Abmessungen der Probe und der Kerbparameter berechnet.

Die Berechnungsformel lautet:

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

In:

F ist die Bruchlast in N;

L ist die Stützweite in mm;

a ist die Kerbtiefe in mm;

B ist die Probendicke in mm;

W ist die Probenhöhe in mm;

Y ist der geometrische Faktor, der vom  $a/W$  -Verhältnis abhängt (normalerweise aus Standardtabellen oder Formeln bestimmt).

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Universalprüfmaschine

Lastbereich: 0–50 kN , Genauigkeit  $\pm 0,5 \%$ .

Ladegeschwindigkeitsregelung: 0,1–1 mm/min, Abweichung  $< \pm 0,05$  mm/min.

### 5.2 Vorrichtung

Dreipunkt-Biegevorrichtung mit einer Auflageweite von 16 mm ( $\pm 0,05$  mm).

Der Auflagepunkt hat einen Durchmesser von 2 mm ( $\pm 0,02$  mm) und eine glatte Oberfläche ohne Kanten oder Ecken.

### 5.3 Kerbpräparationsgeräte

Drahtschneidemaschine oder Diamantsäge, Kerbbreite  $< 0,2$  mm, Tiefengenauigkeit  $\pm 0,01$  mm.

Mikroskop: Vergrößerung 100 $\times$ , Auflösung  $< 0,01$  mm, dient zur Messung der Kerbtiefe.

### 5.4 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm.

Digitaler Mikrometer: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10 \%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Abmessungen  $20 \times 4 \times 2$  mm ( $\pm 0,02$  mm).

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Verarbeitungsfehlern sein und die Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  (Polierbehandlung) aufweisen.

Die Kanten der Proben wurden um  $0,1 \times 45^\circ$  abgeschrägt, um die Spannungskonzentration zu verringern.

### 6.2 Spaltvorbereitung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mal der Probenhöhe W (0,4-1,0 mm).

Die Kerbbreite beträgt  $<0,2$  mm und der Kerbgrundradius beträgt  $<0,05$  mm (Mikroskopuntersuchung).

### 6.3 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität der Testergebnisse sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Charge nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>5\%$ ) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

### 6.4 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

### 6.5 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

---

## 7 Testschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Die Universalprüfmaschine wird mit einem Standardkraftsensor mit einer Lastabweichung von  $<\pm 0,5\%$  kalibriert.

Überprüfen Sie die Genauigkeit der Vorrichtung und der Kerbvorbereitungsausrüstung und stellen Sie sicher, dass die Kerbtiefenabweichung  $<\pm 0,01$  mm beträgt.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Relative Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10\%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe in eine Dreipunkt-Biegevorrichtung, wobei die Kerbe zum Belastungspunkt zeigt.

Ladegeschwindigkeit: 0,5 mm/min.

Belasten Sie die Probe langsam, bis sie bricht, und notieren Sie die maximale Bruchlast F (N).

Die Kerbtiefe a wurde mit einem Mikroskop gemessen (Genauigkeit  $\pm 0,01$  mm).

Messen Sie die Probendicke B und Höhe W (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm).

### 7.4 Bestimmung der geometrischen Faktoren

Schlagen Sie in der Tabelle nach oder berechnen Sie den Geometriefaktor Y entsprechend dem a/W -Verhältnis (ISO 23146:2008 bietet eine Standardtabelle).

Beispiel: Wenn  $a/W=0,3$ ,  $Y \approx 2,9$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.5 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Bruchzähigkeit:

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

Jede Probe wird einmal berechnet und der Durchschnittswert von 5 Proben mit einer Abweichung von  $\leq \pm 5\%$  genommen.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Bruchzähigkeitsbereich

Der Bruchzähigkeitswert von Hartmetall beträgt üblicherweise  $K_{Ic}$  c 10-20 MPa·m<sup>1/2</sup>, und der genaue Bereich hängt von der Sorte ab:

YG6:  $K_{Ic}$  14-16 MPa·m<sup>1/2</sup>.

YG8:  $K_{Ic}$  c 12-15 MPa·m<sup>1/2</sup>.

YT15:  $K_{Ic}$  c 10-12 MPa·m<sup>1/2</sup>.

### 8.2 Abweichungsbewertung

Die  $K_{Ic}$ - Wertabweichung der 5 Proben beträgt  $\leq \pm 5\%$ , andernfalls ist eine erneute Probenahme und Prüfung erforderlich.

Wenn der  $K_{Ic}$ - Wert die technischen Anforderungen der Güteklasse überschreitet, müssen die Gründe analysiert (z. B. schlechte Kerbqualität, ungleichmäßige Mikrostruktur) und erneut geprüft werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Kerbqualität: Kerbbreite > 0,2 mm oder Bodenradius > 0,05 mm führen zu einem niedrigeren  $K_{Ic}$  (Abweichung > 10 %).

Belastungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeiten > 1 mm/min bzw. < 0,1 mm/min beeinflussen die Bruchlast (Abweichung  $\pm 5\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige WC-Korngröße ( $> \pm 0,2 \mu m$ ) oder ungleichmäßige Co-Phasenverteilung können zu  $K_{Ic}$ - Schwankungen ( $> \pm 6\%$ ) führen.

## 9 Testbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe, Kerbtiefe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Belastungsgeschwindigkeit (0,5 mm/min), Umgebungstemperatur ( $20 \pm 5^\circ C$ ), Luftfeuchtigkeit ( $50 \pm 10\%$ ).

$K_{Ic}$ -Wert jeder Probe sowie dessen Durchschnittswert und Abweichung.

Bewertungsfazit: ob es den technischen Anforderungen der Marke entspricht.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Bruchzähigkeit typischer Hartmetalle

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



| Marke | Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ,<br>MPa·m <sup>1/2</sup> ) | Co-Gehalt<br>( Gew.-% ) | Korngröße<br>( $\mu\text{m}$ ) | Typische Anwendungen            |
|-------|-------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 14-16                                                 | 6                       | 0,8-1,2                        | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 12-15                                                 | 8                       | 0,8-1,2                        | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 10-12                                                 | 5                       | 0,6-1,0                        | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Tabelle des geometrischen Faktors Y ( a /W- Verhältnis)

a/W 0,2 0,3 0,4 0,5

Y 2.6 2.9 3.2 3.5

Hinweis: Der Y-Wert ist ein Richtwert. Genauere Werte finden Sie in der Normtabelle ISO 23146:2008.

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 20±5°C.

Luftfeuchtigkeit: 50 ± 10 %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

Die GB/T 7997-2010 Prüfmethode zur Bruchzähigkeitsprüfung von Hartmetall bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bruchzähigkeitsprüfung von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Kerbpräparation, Prüfschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet zuverlässigen technischen Support für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer und Formen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang :

## GB/T 3488-2008

### Prüfverfahren für die Mikrostruktur von Hartmetall

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Prüfmethode für die Mikrostruktur von Hartmetall fest, einschließlich Prüfprinzip, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Klassifizierung und Bewertung der Mikrostruktur, Prüfbericht usw. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf beschichtetes Hartmetall oder Hartmetall nach Oberflächenverfestigung (z. B. durch Prüfung der Mikrostruktur der aufgekohlten Schicht).

#### 2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 5249-2008 Allgemeine Spezifikation für die Vorbereitung von Hartmetallproben

GB/T 4295-2008 Verfahren zur Bewertung mikrostruktureller Defekte in Hartmetall

GB/T 5242-2001 Mikrostruktur-Testverfahren für Hartmetall (aufgehoben, aber auf einige Abschnitte wird verwiesen)

ISO 4499-2:2008 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Korngröße

#### 3 Begriffe und Definitionen

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

##### Hartmetall

Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch Pulvermetallurgie.

##### Mikrostruktur

Verteilungseigenschaften von WC-Körnern, Co-Phase, Poren, freiem Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase (Karbidefektphase) in Hartmetall.

##### Porosität

Der Volumenanteil der Poren in Hartmetall wird in drei Kategorien eingeteilt: A, B und C.

Klasse A: Mikroporen (Durchmesser  $<10\ \mu\text{m}$ ).

Klasse B: Große Poren ( $10\text{--}25\ \mu\text{m}$  Durchmesser).

Klasse C: Freier Kohlenstoff.

##### $\eta$ -Phase

Die aufgrund eines unzureichenden Kohlenstoffgehalts im Hartmetall entstehende Karbidefektphase (wie etwa  $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ ) ist normalerweise schwarz oder dunkelgrau.

Korngröße: Die durchschnittliche Größe der WC-Körner in  $\mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

#### 4 Prüfprinzip

Die Mikrostrukturprüfung von Hartmetall erfolgt durch Betrachtung der polierten und geätzten Oberfläche der Probe unter einem metallografischen Mikroskop. Anschließend werden WC-Korngröße, Co-Phasenverteilung, Porosität, freier Kohlenstoff und  $\eta$ -Phaseneigenschaften analysiert und gemäß den Normen klassifiziert und bewertet. Der Prüfprozess umfasst:

Die Proben wurden auf Hochglanz poliert ( $R_a < 0,05 \mu m$ ).

Verwenden Sie ein Ätzmittel wie Murakami Reagenz, um die Mikrostruktur freizulegen.

Beobachten und bewerten Sie Gewebeeigenschaften bei bestimmten Vergrößerungen (100×, 1000×).

#### 5. Inspektionsausrüstung

##### 5.1 Metallographisches Mikroskop

Vergrößerung: 50×-1000×, 100× (Porositätsbeurteilung) und 1000× (Korngrößenmessung) werden empfohlen.

Auflösung:  $< 0,5 \mu m$ .

Ausgestattet mit einem digitalen Bildgebungssystem zur Aufnahme mikroskopischer Fotos.

##### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Wird zur Probenentnahme verwendet, Diamantsägeblatt, Schnittgeschwindigkeit  $< 500$  U/min.

Einbettmaschine: Heißeinbettmittel, Temperatur 150–180 °C, Druck 20–30 MPa.

Schleif- und Poliermaschine: Schleifpapierpartikelgröße 400#–2000#, Polierscheibengeschwindigkeit 200–300 U/min.

Poliermittel: Diamantpolierflüssigkeit (Partikelgröße 0,5–1  $\mu m$ ).

##### 5.3 Ätzmittel

Murakami-Reagenz:  $K_3Fe(CN)_6$  (10 g) + NaOH (10 g) + destilliertes Wasser (100 ml).

Nach der Zubereitung vor Gebrauch gründlich umrühren und in einem lichtdichten Behälter aufbewahren.

##### 5.4 Messwerkzeuge

Mikroskopskala: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm.

Bildanalysesoftware: Wird für Korngrößenstatistiken verwendet, Genauigkeit  $\pm 0,01 \mu m$ .

##### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $20 \pm 5^\circ C$ .

Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10$  %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 6. Probenvorbereitung

##### 6.1 Probenanforderungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Probengröße:  $10 \times 10 \times 5$  mm ( $\pm 0,1$  mm) werden empfohlen, oder eine Probe entsprechend der tatsächlichen Teilegröße.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Verarbeitungsfehlern sein.

## 6.2 Probenzuschnitt

Verwenden Sie zum Schneiden ein Diamantsägeblatt, Wasser als Kühlmittel, eine Schnittgeschwindigkeit  $< 500$  U/min und vermeiden Sie eine Überhitzung (Temperatur  $< 60$  °C).

## 6.3 Probenmontage

Wenn die Probe klein ist, muss sie mit heißem Einbettungsharz bei einer Temperatur von 150–180 °C, einem Druck von 20–30 MPa und einer Abkühlzeit von 5–10 Minuten eingebettet werden.

## 6.4 Schleifen und Polieren von Proben

Grobschliff: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 400–1200, um Schnittspuren bei einer Geschwindigkeit von 200 U/min schrittweise zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 1500–2000, Geschwindigkeit 200 U/min, eine Diamantpolierflüssigkeit (Partikelgröße  $0,5 \mu\text{m}$ ), Polierscheibengeschwindigkeit 300 U/min, Polieren auf  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$  (Spiegelzustand).

## 6.5 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol, um Polierrückstände zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

## 6.6 Probenätzung

Tauchen Sie die Probe in Murakamis Reagenz und ätzen Sie sie 10–20 Sekunden lang (angepasst an den Grad der Gewebeexposition).

Sofort nach dem Ätzen mit destilliertem Wasser abspülen, mit wasserfreiem Ethanol reinigen und trocknen.

## 6.7 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität der Testergebnisse sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Charge nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen (Porositätsgraddifferenz  $> 1$  Grad) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.8 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 7 Inspektionsschritte

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 7.1 Gerätekalibrierung

Das metallografische Mikroskop wurde mit einem Standard-Mikroskoplineal mit einer Vergrößerungsabweichung von  $<\pm 1\%$  kalibriert.

Überprüfen Sie die Helligkeit der Lichtquelle, um eine Gleichmäßigkeit des Sichtfelds sicherzustellen (Helligkeitsabweichung  $<5\%$ ).

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Relative Luftfeuchtigkeit:  $50\pm 10\%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Porositätsprüfung

Vergrößerung:  $100\times$ .

Beobachten Sie die Probenoberfläche in mindestens 5 Sichtfeldern (Sichtfeldfläche ca.  $1\text{ mm}^2$ ).

Die Porosität wird in drei Kategorien bewertet: A, B und C:

Kategorie A: Mikroporen (Durchmesser  $<10\text{ }\mu\text{m}$ ), abgestuft mit A00 (keine Poren), A02 ( $<0,02\%$ ), A04 ( $<0,04\%$ ), A06 ( $<0,06\%$ ), A08 ( $<0,08\%$ ).

Kategorie B: Makroporen (Durchmesser  $10\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ ), klassifiziert als B00 (keine Poren), B02 ( $<0,02\%$ ), B04 ( $<0,04\%$ ), B06 ( $<0,06\%$ ), B08 ( $<0,08\%$ ).

Kategorie C: Freier Kohlenstoff, klassifiziert als C00 (kein), C02 (eine kleine Menge), C04 (mittel), C06 (mehr) und C08 (eine große Menge).

Notieren Sie den Porositätsgrad jedes Sichtfelds und nehmen Sie den schlechtesten Grad als Ergebnis der Probenbewertung.

### 7.4 $\eta$ -Phasenprüfung

Vergrößerung:  $100\times\text{--}400\times$ .

Beobachten Sie die Oberfläche der Probe und suchen Sie nach der  $\eta$ -Phase (schwarze oder dunkelgraue Bereiche).

Benotung: E00 (keine  $\eta$ -Phase), E02 (geringe Menge), E04 (mittlere Menge), E06 (große Menge), E08 (große Menge).

Erfassen Sie die  $\eta$ -Phasenverteilung und den  $\eta$ -Phasengehalt und nehmen Sie die schlechteste Note als Bewertungsergebnis.

### 7.5 Korngrößenmessung

Vergrößerung:  $1000\times$ .

Fünf Sichtfelder wurden zufällig ausgewählt und die WC-Korngröße mithilfe einer Bildanalysesoftware oder der Linienschnittmethode gemessen.

Achsenabschnittsmethode: Zeichnen Sie 5 zufällige gerade Linien, zählen Sie die Anzahl der Körner auf jeder geraden Linie und berechnen Sie die durchschnittliche Korngröße:

$$d = \frac{L}{N \times M}$$

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](http://www.ctia.com.cn)

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

L ist die Gesamtlänge der Schnittlinie (mm);

N ist die Anzahl der Körner;

M ist die Vergrößerung.

Sichtfeld wurden 50 Körner gemessen und der Durchschnittswert mit einer Abweichung von  $\leq \pm 10\%$  ermittelt.

## 7.6 Beobachtung der Co-Phasenverteilung

Vergrößerung: 1000×

Beobachten Sie, ob die Co-Phase (hellgrauer Bereich) gleichmäßig verteilt ist und ob Co-Pools (Durchmesser  $> 5\ \mu\text{m}$ ) vorhanden sind.

Beurteilung: gleichmäßig (kein Co-Pool), leicht ungleichmäßig (geringe Menge Co-Pool), stark ungleichmäßig (große Menge Co-Pool).

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Porositätsbewertung

Die Porosität von Hartmetall sollte den technischen Anforderungen der Sorte entsprechen:

YG6:A02-B00-C00.

YG8:A02-B00-C00.

YT15:A02-B00-C00.

Wenn der Porositätsgrad die Anforderung überschreitet (z. B.  $A > A02$  oder  $B > B00$ ), ist die Probe nicht qualifiziert.

### 8.2 $\eta$ -Phasenbewertung

Der  $\eta$ -Phasengehalt sollte den Güteklassenanforderungen entsprechen:

YG6:E00-E02.

YG8:E00-E02.

YT15:E00-E02.

Wenn der  $\eta$ -Phasengrad  $> E02$  ist, ist die Probe nicht geeignet und muss auf ihren Kohlenstoffgehalt analysiert werden ( $< 6,1\ \text{Gew.}\%$  führt zur Bildung der  $\eta$ -Phase).

### 8.3 Korngrößenbestimmung

Die Korngröße sollte den Güteklassenanforderungen entsprechen:

YG6: 0,8–1,2  $\mu\text{m}$ .

YG8: 0,8–1,2  $\mu\text{m}$ .

YT15: 0,6–1,0  $\mu\text{m}$ .

Bei Abweichungen  $> \pm 10\%$  oder Korngrößen außerhalb des Bereichs ist eine Analyse des Sinterprozesses (z. B. Temperatur  $> 1450^\circ\text{C}$ ) erforderlich.

### 8.4 Auswertung der Co-Phasenverteilung

Die Co-Phasenverteilung sollte gleichmäßig sein und keine offensichtlichen Co-Pools (Durchmesser  $> 5\ \mu\text{m}$ ) aufweisen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bei einer großen Anzahl von Co-Pools muss der Mischprozess bzw. die Sintergleichmäßigkeit analysiert werden.

### 8.5 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Unzureichende Politur ( $R_a > 0,05 \mu m$ ) kann zu Fehlinterpretationen der Porosität führen (Abweichung  $> 1$  Grad).

Ätzzeit: Eine zu kurze Ätzzeit ( $< 10 s$ ) führt zu einer undeutlichen Mikrostruktur; eine zu lange Ätzzeit ( $> 20 s$ ) führt zu einer Überätzung (die WC-Korngrenzen werden unscharf).

Mikrostruktur: Schwankungen im Kohlenstoffgehalt (Abweichung  $> 0,1 \text{ Gew.-%}$ ) können zur Bildung von freiem Kohlenstoff oder  $\eta$ -Phase führen.

## 9 Prüfbericht

Der Inspektionsbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Prüfbedingungen: Gerätemodell, Vergrößerung, Ätzmittel und Ätzzeit, Umgebungstemperatur ( $20 \pm 5^\circ C$ ), Luftfeuchtigkeit ( $50 \pm 10 \%$ ).

Testergebnisse: Porositätsgrad,  $\eta$ -Phasengrad, Korngröße (Durchschnittswert und Abweichung) und Bewertung der Co-Phasenverteilung.

Bewertungsfazit: ob es den technischen Anforderungen der Marke entspricht.

Prüfdatum und Unterschrift des Betreibers.

### Anhang A (Informativer Anhang) Mikrostruktureigenschaften von typischem Hartmetall

| Marke | Porosität   | $\eta$ -Phase | Korngröße ( $\mu m$ ) | Co-Phasenverteilung | Typische Anwendungen         |
|-------|-------------|---------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| YG6   | A02-B00-C00 | E00-E02       | 0,8-1,2               | Uniform             | Bergbaubohrer                |
| YG8   | A02-B00-C00 | E00-E02       | 0,8-1,2               | Uniform             | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | A02-B00-C00 | E00-E02       | 0,6-1,0               | Uniform             | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Standarddiagramm zur Porositätsbewertung

A02: Die Anzahl der Mikroporen im Sichtfeld beträgt weniger als 10 und der Durchmesser weniger als  $10 \mu m$ .

B04: Im Sichtfeld befinden sich 5–10 große Löcher mit einem Durchmesser von  $10\text{--}25 \mu m$ .

C06: Der freie Kohlenstoffverteilungsbereich im Sichtfeld beträgt  $0,1\text{--}0,2 \%$ .

Hinweis: Spezifische Standarddiagramme finden Sie in ISO 4499-2:2008.

### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $20 \pm 5^\circ C$ .

Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10 \%$ .

#### 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.  
Ebenheit des Prüftisches: Abweichung <0,02 mm/m.

### **Zusammenfassen**

GB/T 3488-2008 „Prüfmethode für die Mikrostruktur von Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Prüfung der Mikrostruktur von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm fördert die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer, Formen und andere Anwendungsbereiche.



**Anhang:**

**Was sind die ISO-Normenreihen für Hartmetall ?**

**1. ISO 3850-Reihe: Terminologie**

**ISO 3850:2018 Hartmetall –**

Terminologiedefinitionen Die Terminologie und Definitionen von Hartmetall und verwandten Werkstoffen umfassen Materialzusammensetzung (z. B. Hartphase, Bindephase), Herstellungsverfahren (z. B. Pulvermetallurgie, Sintern), Mikrostruktur (z. B. Korn, Poren), Leistungsprüfung (z. B. Biegefestigkeit, Härte) und Anwendungsbereiche (z. B. Schneidwerkzeuge, verschleißfeste Teile). Diese Norm bildet die Grundlage der Hartmetall-Normenreihe und bietet eine einheitliche Terminologieunterstützung.

**2. ISO 3847-Reihe: Prüfkörpervorbereitung**

**Die ISO 3847:2005 Hartmetallprobenvorbereitung**

legt die Vorbereitungsmethode für Hartmetallproben fest, einschließlich der Schritte Schneiden, Montieren, Schleifen, Polieren und Reinigen, um sicherzustellen, dass die Probenoberfläche eben und unbeschädigt ist und für nachfolgende Leistungsprüfungen (wie Biegefestigkeit, Härte) oder Mikrostrukturprüfungen geeignet ist. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit WC als Haupthartphase und Co als Bindephase.

**3. ISO 4499-Reihe: Mikrostrukturprüfung**

**ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur. Teil 1: Allgemeine Richtlinien**

enthält allgemeine Grundsätze für die Untersuchung der Mikrostruktur von Hartmetall, einschließlich grundlegender Anforderungen an die Probenvorbereitung, mikroskopische Beobachtungsmethoden und Fehlerbewertung, und legt damit den Grundstein für nachfolgende Teile (wie etwa die Bestimmung der Korngröße).

**ISO 4499-2:2008 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Korngröße**

legt ein Verfahren zur Bestimmung der Korngröße von Wolframkarbid (WC) in Hartmetall unter Verwendung eines metallografischen Mikroskops in Kombination mit der Methode des linearen Schnitts oder der Methode des planaren Schnitts fest, das zur Leistungsoptimierung und Qualitätskontrolle geeignet ist.

**ISO 4499-3:2016 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 3: Bewertung von Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase,**

legt die Bewertungsmethode für Defekte wie Poren, Einschlüsse, freien Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase in der Mikrostruktur von Hartmetall fest. Zur Bewertung der Güte wird ein metallografisches Mikroskop verwendet, um die Ergebnisse zu beobachten und mit Standardatlanten zu vergleichen.

**4. ISO 4489-Reihe: Leistungstests**

**ISO 4489:2010 – Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall**

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

legt das Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall mithilfe eines Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuchs fest, das zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Materialien geeignet ist.

**ISO 4489-2:2020 Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall, Teil 2: Hochtemperaturbedingungen,**

ergänzt das Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit in Hochtemperaturumgebungen (z. B. 800 °C–1200 °C), das für Hochtemperatur-Anwendungsszenarien (z. B. in der Luft- und Raumfahrt) geeignet ist.

**5. ISO 3326-Reihe: Härteprüfung**

**ISO 3326:2013 – Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall**

legt das Verfahren zur Bestimmung der Vickershärte von Hartmetall unter Verwendung eines Vickershärteprüfgeräts mit einer Last von 10–50 kgf fest, das zur Bewertung der Eindruckfestigkeit des Materials geeignet ist.

**6. ISO 3878-Reihe: Rockwell-Härteprüfung**

**ISO 3878:1983 Prüfverfahren für die Rockwellhärte von Hartmetall (HRA-Skala)**

legt das Verfahren zur Bestimmung der Rockwellhärte von Hartmetall (HRA-Skala) fest. Es eignet sich zur schnellen Bestimmung der Materialhärte und wurde nicht überarbeitet.

**7. ISO 28079-Reihe: Bruchzähigkeitsprüfung**

**ISO 28079:2009 – Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von Hartmetall**

legt das Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit ( $KI_C$ ) von Hartmetall unter Verwendung des Single Edge Notched Beam (SENB)-Testverfahrens fest, das zur Bewertung der Rissbeständigkeit von Materialien geeignet ist.

**8. ISO 3369-Reihe: Dichtebestimmung**

**ISO 3369:2006 – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall**

legt ein Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall unter Verwendung des archimedischen Prinzips fest und eignet sich für die Qualitätskontrolle und Überprüfung der Materialzusammensetzung.

**9. ISO 4884-Reihe: Prüfung der magnetischen Eigenschaften**

**ISO 4884:2019 – Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall**

legt das Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Sättigungsstärke und Koerzitivfeldstärke ( $H_c$ ) von Hartmetall unter Verwendung der Hystereseschleifenmethode fest, die zur Bewertung der Qualität und Mikrostruktur der Kobaltphase geeignet ist.

**10. ISO/TR 19041-Reihe: Technische Berichte**

**ISO/TR 19041:2015 Technischer Bericht zur Mikrostrukturprüfung von Hartmetall: Ergänzende Anleitung zur Fehlerbewertung.**

Bietet ergänzende technische Anleitungen zur Bewertung mikrostruktureller Fehler, einschließlich

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

detaillierterer Bewertungsmethoden für Porosität, Einschlüsse, freien Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase, die jedoch nicht obligatorisch sind.

Die ISO-Normenreihe für Hartmetall deckt verschiedene Aspekte ab, wie z. B. Begriffsdefinition, Probenvorbereitung, Mikrostrukturprüfung, Leistungsprüfung (Biegefestigkeit, Härte, Bruchzähigkeit, Dichte, magnetische Eigenschaften) usw., und bietet umfassende technische Unterstützung für die Herstellung, Prüfung und Anwendung von Hartmetall. Diese Normen gelten hauptsächlich für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase, die häufig in Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und im militärischen Bereich eingesetzt werden. ISO 3850:2018 bildet als terminologische Grundlage zusammen mit anderen Normen (wie ISO 4499 und ISO 4489) ein umfassendes System zur Unterstützung der Standardisierung und Internationalisierung der globalen Hartmetallindustrie.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

Anhang:

ISO/TR 19041:2015 Hartmetall

Technischer Bericht zur Mikrostrukturprüfung: Ergänzende Richtlinien zur Fehlerbewertung

1 Einleitung

Als Ergänzung zur Normenreihe ISO 4499 bietet dieser technische Bericht detaillierte Richtlinien zur Bewertung mikrostruktureller Defekte in Hartmetall. Er soll Anwendern die präzisere Umsetzung der Norm ISO 4499-3:2016 „Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 3: Bewertung von Porosität, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase“ erleichtern. Der Bericht konzentriert sich auf die operativen Details der Defektbewertung, die Analyse von Einflussfaktoren, Verbesserungsvorschläge und typische Fälle und ist auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase anwendbar. Dieser Bericht ist unverbindlich und dient ausschließlich als Referenz.

2 Geltungsbereich

Dieser technische Bericht bietet zusätzliche Anleitungen zur Bewertung mikrostruktureller Defekte in Hartmetall, darunter:

Einzelheiten zu den Verfahren zur Beurteilung von Porosität (Typ A und B), Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und Eta-Phase.

Analyse der Faktoren, die die Ergebnisse der Fehlerbewertung und Verbesserungsvorschläge beeinflussen.

Fehlerbewertungsfälle und Referenzdaten für typische Hartmetallsorten.

Dieser Bericht gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase und eignet sich für Qualitätskontrolle, Forschung und Entwicklung sowie Prozessoptimierung.

3 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente beziehen sich auf diesen technischen Bericht und werden als Referenz bereitgestellt:

ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 1: Allgemeine Hinweise

ISO 4499-3:2016 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 3: Bewertung von Porosität, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und Eta-Phase

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

4 Begriffe und Definitionen

Dieser technische Bericht übernimmt die in ISO 3850:2018 und ISO 4499-3:2016 festgelegten Begriffe und Definitionen, darunter:

**Porosität** : Poren oder Zwischenräume in einer Mikrostruktur, unterteilt in Typ A (Durchmesser  $< 10 \mu m$ ) und Typ B (Durchmesser  $10-25 \mu m$ ).

**Einschlüsse** : Nichtmetallische Verunreinigungen (wie Oxide und Sulfide), die in Form von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Partikeln vorliegen.

**Freier Kohlenstoff** : Kohlenstoff, der keine Verbindungen mit Metallen eingeht und in Form von Graphit vorkommt.

**η -Phase** : Eine spröde Phase, die aufgrund eines unzureichenden Kohlenstoffgehalts entsteht, wie z. B. W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C oder Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C.

## 5 Ergänzende Richtlinien zur Mängelbewertung

### 5.1 Vorschläge zur Verbesserung der Probenvorbereitung

**Schneiden** : Es wird empfohlen, dass die Schnittgeschwindigkeit <0,05 mm/s und die Kühlmitteldurchflussrate >0,5 l/min beträgt, um durch thermische Effekte verursachte Mikrorisse zu vermeiden.

**Montage** : Verwenden Sie Harz mit geringer Schrumpfung (z. B. Epoxidharz) und halten Sie die Temperatur unter 130 °C, um eine Verformung der Probenkanten zu vermeiden.

**Schleifen und Polieren** : Verlängern Sie die Polierzeit auf 10–15 Minuten, verwenden Sie eine Polierflüssigkeit mit 0,1 µm und stellen Sie sicher, dass die Oberflächenrauheit Ra <0,01 µm ist .

**Radierung** : Murakumi -Reagenz (10 g K<sub>3</sub> [ Fe( CN )<sub>6</sub> ] + 10 g KOH + 100 ml H<sub>2</sub> O ) Die Ätzeit wird auf 3-5 Sekunden begrenzt, um ein Überätzen und das Abdecken von Defekten zu vermeiden.

### 5.2 Einzelheiten zum mikroskopischen Beobachtungsvorgang

**Auswahl der Vergrößerung** : Für Routinebeobachtungen wird 200× empfohlen, zur Bestätigung subtiler Merkmale von Einschlüssen und der η-Phase 500×.

#### **Beleuchtungsmodi :**

Porosität und Einschlüsse: Verwenden Sie die Hellfeldbeobachtung, um den Kontrast zu verbessern.

Freier Kohlenstoff und η-Phase: Bei Beobachtung mit polarisiertem Licht erscheint freier Kohlenstoff hellweiß und die η-Phase dunkelgrau.

#### **Anzahl der Sichtfelder**

Zur Verbesserung der statistischen Genauigkeit wird empfohlen, die Anzahl der Felder auf 10 mit einer Fläche ≥ 1 mm<sup>2</sup> zu erhöhen.

### 5.3 Verbesserungsmethode zur Fehlerbewertung

#### **Porositätsbewertung :**

einer Bildanalysesoftware wurden Anzahl und Fläche der Poren mit einer Genauigkeit von ±0,1 µm gezählt .

Poren vom Typ A und B werden getrennt klassifiziert und für Poren über A06-B04 (z. B. Vakuumgrad <10 Pa) ist eine Analyse des Sinterprozesses erforderlich.

#### **Inklusionsbewertung :**

Der Einschlussdurchmesser ist >20 µ m , die chemische Zusammensetzung sollte erfasst werden (z. B. Oxidtypanalyse mittels EDS).

Ab I04 muss die Reinheit der Rohstoffe überprüft werden (Verunreinigungen < 0,05 %).

#### **Kostenlose Kohlenstoffbewertung :**

Wenn das Flächenverhältnis >1 % ist, muss die Abweichung des Kohlenstoffgehalts (<±0,1 %) in

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kombination mit einer chemischen Analyse bestätigt werden.

Ab CO4 muss der Mischvorgang optimiert werden (z. B. durch Verlängerung der Kugelmahlzeit auf 48 Stunden).

#### **Bewertung der $\eta$ -Phase :**

Wenn das Flächenverhältnis  $>1\%$  ist, muss der Test der magnetischen Eigenschaften kombiniert werden, um den Einfluss der  $\eta$ -Phase zu bestätigen (die magnetische Sättigungsintensität nimmt um  $>5\%$  ab).

Oberhalb von  $\eta04$  müssen Sintertemperatur ( $<1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und Kohlenstoffgehalt ( $>0,1\%$ ) angepasst werden.

### **5.4 Analyse der Einflussfaktoren**

**Porosität :** Unzureichendes Sintervakuum ( $<10\text{ Pa}$ ), zu schnelle Abkühlrate ( $>50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) oder ungleichmäßige Rohstoffpartikel ( $>2\text{ }\mu\text{m}$ ) führen zu erhöhter Porosität ( $>A04$ ).

**Einschlüsse :** Der Oxid- bzw. Sulfidgehalt in den Rohstoffen beträgt  $>0,05\%$ , bzw. eine ungleichmäßige Durchmischung (Kugelmahlzeit  $<24\text{ h}$ ) führt zu einer Zunahme der Einschlüsse ( $>104$ ).

**Freier Kohlenstoff :** Ein zu hoher Kohlenstoffgehalt ( $>0,2\%$ ) oder eine ungleichmäßige Verteilung (Mischzeit  $<24\text{ h}$ ) führt zu erhöhtem freien Kohlenstoff ( $>C04$ ).

**$\eta$ - Phase :** Unzureichender Kohlenstoffgehalt ( $<0,1\%$ ), hohe Sintertemperatur ( $>1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) oder langsame Abkühlrate ( $<10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) führt zur Bildung der  $\eta$ -Phase ( $>\eta04$ ).

---

## **6 Typische Fallanalyse**

### **6.1 Fehlerbewertung von Hartmetall der Güte YG6**

**Probeninformationen :** Co - Gehalt  $6\%$  , Korngröße  $0,8\text{--}1,2\text{ }\mu\text{m}$  , Anwendungsbereich: Bergbaubohrer.

**Testbedingungen :** metallografisches Mikroskop  $200\times$ , **10** Sichtfelder, Fläche  $1\text{ mm}^2$  .

**Ergebnis :** A02-B02-I02-C02- $\eta02$ .

**Analyse :** Es gibt nur wenige Poren und Einschlüsse, was auf einen angemessenen Sinterprozess hindeutet (Vakuumgrad  $5\text{ Pa}$ , Abkühlrate  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ). Freier Kohlenstoff und die  $\eta$ -Phase liegen im Normbereich, und der Kohlenstoffgehalt ist gut kontrolliert (Abweichung  $<\pm 0,05\%$ ).

### **6.2 Fehlerbewertung von Hartmetall der Güte YG8**

**Probeninformationen :** Co-Gehalt  $8\%$  , Korngröße  $1,0\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m}$  , Anwendungsbereich: Schneidwerkzeuge.

**Testbedingungen :** metallografisches Mikroskop  $200\times$ , **10** Sichtfelder, Fläche  $1\text{ mm}^2$  .

**Ergebnis :** A04-B04-I02-C04- $\eta02$ .

**Analyse :** Der Porositätsgrad ist hoch (A04-B04), was möglicherweise auf eine zu schnelle Abkühlrate ( $>50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) zurückzuführen ist. Der freie Kohlenstoffgehalt ist hoch (C04). Es wird empfohlen, den Kohlenstoffgehalt ( $>0,2\%$ ) und die Gleichmäßigkeit der Mischung (Kugelmahlzeit  $<24\text{ h}$ ) zu überprüfen.

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

### 6.3 Fehlerbewertung von Hartmetall der Güte YT15

**Probenangaben :** Co-Gehalt 5 %, TiC- **haltig** , Korngröße 0,6–1,0  $\mu\text{m}$  , Anwendungsgebiet: Schlichtwerkzeuge.

**Testbedingungen :** metallografisches Mikroskop 500 $\times$ , **10** Sichtfelder, Fläche 1  $\text{mm}^2$  .

**Ergebnis :** A02-B02-I04-C02- $\eta$ 04.

**Analyse :** Die Einschlüsse sind hoch (I04), was auf Verunreinigungen im TiC- Rohmaterial ( $>0,05\%$ ) zurückzuführen sein kann. Die  $\eta$ -Phase ist hoch ( $\eta$ 04), daher wird empfohlen, die Sintertemperatur ( $<1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zu senken und den Kohlenstoffgehalt ( $>0,1\%$ ) anzupassen.

### 7 Verbesserungsvorschläge

#### Prozessoptimierung :

Verbessern Sie die Reinheit des Rohmaterials: Verunreinigungsgehalt  $<0,03\%$ .

Verlängern Sie die Mischzeit: Kugelmahlzeit  $>48$  Stunden, um Gleichmäßigkeit sicherzustellen.

Sinterparameter optimieren: Vakuumgrad  $<5\text{ Pa}$ , Abkühlrate  $20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

#### Testverbesserungen :

Verwenden Sie eine Bildanalysesoftware, um die Genauigkeit der Defektstatistik zu verbessern ( $<\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ ) .

Erhöhen Sie die Anzahl der Sichtfelder auf  $10\text{--}15$ , um die statistische Zuverlässigkeit zu verbessern.

Kombinieren Sie chemische Analysen und Tests magnetischer Eigenschaften, um die Auswirkungen von Defekten umfassend zu bewerten.

### 8 Fazit

Dieser technische Bericht bietet detaillierte ergänzende Hinweise zur Bewertung mikrostruktureller Defekte in Hartmetall. Er bietet Anwendern praktische Referenzen durch verbesserte Probenvorbereitung, mikroskopische Beobachtung und Methoden zur Defektbewertung, kombiniert mit einer Analyse von Einflussfaktoren und typischen Fällen. Die Umsetzung dieses Berichts trägt dazu bei, die Anwendungswirkung von ISO 4499-3:2016 zu verbessern und die Qualitätskontrolle und Prozessoptimierung von Hartmetall zu unterstützen.

### Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte zur Bewertung typischer Hartmetalldefekte

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Fehlerstufe                | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | A02-B02-I02-C02- $\eta$ 02 | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | A04-B04-I02-C04- $\eta$ 02 | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | A02-B02-I04-C02- $\eta$ 04 | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}70\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $<0,02\text{ mm/m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang C (Informativer Anhang) Tool zur Verbesserung der Fehlerbewertung**

**Bildanalysesoftware** : wie z . B. ImageJ, für Poren- und Einschlussstatistiken mit einer Genauigkeit von  $<0,1 \mu\text{m}$  .

**EDS- Analysator** : Wird zur Analyse der Einschlusszusammensetzung verwendet, Nachweisgrenze  $<0,01 \%$ .

**Prüfgerät für magnetische Eigenschaften** : Bewerten Sie den Einfluss der  $\eta$ -Phase, Abweichung der magnetischen Sättigungsintensität  $< 5 \%$ .

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



Anhang:

ISO 4884:2019

Bestimmungsmethode der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Sättigungsstärke und der Koerzitivkraft (  $H_c$  ) von Hartmetall unter Verwendung der Hystereseschleifenmethode fest und ist auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase anwendbar, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC , TiC , NbC , VC). Diese Norm ist auf die Bewertung der Qualität und Mikrostruktur der Kobaltphase anwendbar und wird häufig bei der Qualitätskontrolle im Herstellungsprozess von Hartmetall verwendet.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

IEC 60404-4:1995 Magnetische Werkstoffe Teil 4: Verfahren zur Messung magnetischer Eigenschaften

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und IEC 60404-4:1995 sowie die folgenden Begriffe und Definitionen:

Magnetische Sättigungsintensität: Die Sättigungsmagnetisierungsintensität, die die Kobaltphase in Hartmetall unter einem starken externen Magnetfeld erreicht, gemessen in T (Tesla), und spiegelt den Gehalt und die Reinheit der Kobaltphase wider.

Koerzitivkraft (  $H_c$  ): Die magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, um die Magnetisierungsintensität von Hartmetall vom Sättigungszustand auf Null zu entmagnetisieren, ausgedrückt in A/m (Ampere /Meter), und spiegelt die mikrostrukturellen Eigenschaften wider.

Hystereseschleife: Eine geschlossene Kurve, die die Änderung der Magnetisierungsintensität in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld zeigt und zur Messung magnetischer Eigenschaften verwendet wird.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Bestimmung magnetischer Eigenschaften basiert auf der Hystereseschleifenmethode. Dabei wird die Probe in einen geschlossenen Magnetkreis gelegt, ein veränderliches äußeres Magnetfeld angelegt, die Beziehung zwischen Magnetisierungsintensität und Magnetfeldstärke aufgezeichnet und eine Hystereseschleife gezeichnet. Die magnetische Sättigungsintensität wird im

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sättigungsbereich der Hystereseschleife gemessen, und die Koerzitivkraft wird während des Entmagnetisierungsprozesses aus der Nullpunkt-Magnetfeldstärke bestimmt.

Magnetische Sättigungsintensität: Sie misst die maximale Magnetisierungsintensität einer Probe in einem starken Magnetfeld ( $> 500 \text{ kA/m}$ ), üblicherweise standardisiert als Magnetisierungswert pro Masseneinheit oder Volumeneinheit.

Koerzitivfeldstärke ( $H_c$ ): Ein Maß für die magnetische Feldstärke, die erforderlich ist, um die Magnetisierung von der Sättigung auf Null umzukehren.

---

## 5. Messgeräte

### 5.1 Magnetischer Leistungstester

Magnetischer Feldstärkebereich:  $0\text{--}1000 \text{ kA/m}$ , Genauigkeit  $\pm 1 \%$ .

Messbereich der Magnetisierungsintensität:  $0\text{--}2 \text{ T}$ , Genauigkeit  $\pm 0,5 \%$ .

Frequenz:  $50\text{--}60 \text{ Hz}$ , geeignet für Gleichstrom- oder Niederfrequenzmessungen.

Ausgestattet mit einem Gerät mit geschlossenem Magnetkreis (z. B. einem Elektromagneten oder einer Ringspule).

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5 \text{ mm}$ , ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit  $300\text{--}600 \text{ U/min}$ , ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.3 Umweltkontrolle

Temperatur:  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}70 \%$ ,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine externen Magnetfeldstörungen ( $< 5 \text{ A/m}$ ), keine Vibrationen und keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe:  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$  oder  $10 \text{ mm}$  Durchmesser und  $5 \text{ mm}$  Höhe.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Poren oder Oxidschichten sein und die Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \text{ }\mu\text{m}$  betragen.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse  $> 5 \%$  ist, muss die Anzahl der Proben auf 5 erhöht

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden.

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $<0,1$  mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,1 \mu m$ .

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

---

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die magnetische Feldstärke des Magnetleistungstesters mit einer Abweichung von  $<\pm 1 \%$ .

Kalibrieren Sie die Messgenauigkeit der Magnetisierungsintensität, die Abweichung beträgt  $<\pm 0,5 \%$ .

Verwenden Sie zur Überprüfung der Ausrüstung eine Standardprobe (z. B. reines Nickel) mit einer Abweichung von  $<\pm 2 \%$ .

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $15^\circ C$  bis  $30^\circ C$ ,  $23 \pm 2^\circ C$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine externen Magnetfeldstörungen ( $<5$  A/m), keine Vibrationen und keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Platzieren Sie die Probe in einem Gerät mit geschlossenem Magnetkreis und achten Sie darauf, dass die Probe mit der Spule oder den Magnetpolen ausgerichtet ist.

Es wurde ein allmählich zunehmendes externes Magnetfeld angelegt, bis die Sättigung ( $> 500$  kA/m) erreicht war.

Notieren Sie die Änderungen der Magnetisierungsintensität und der magnetischen Feldstärke und zeichnen Sie die Hystereseschleife.

Die magnetische Sättigungsintensität (normalisiert pro Massen- oder Volumeneinheit) wird aus der Hystereseschleife abgelesen.

Aus dem Entmagnetisierungsprozess lässt sich die Koerzitivfeldstärke ( $H_c$ ) ablesen, also die magnetische Feldstärke, bei der die Magnetisierung Null wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wiederholen Sie die Messung 3–5 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

#### 7.4 Ergebnisberechnung

Magnetische Sättigungsintensität: gemessen in T oder A·m<sup>2</sup> / kg, üblicherweise umgerechnet in 4π Ms (Gauß-Einheit, 1 T ≈ 10<sup>4</sup> Gauß).

Koerzitivkraft (Hc): gemessen in A/m.

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{M}s = \frac{\sum M s_i}{n}, \quad \bar{H}c = \frac{\sum H c_i}{n}$$

Wo  $M s_i$  und  $H c_i$  sind einzelne Messwerte und n ist die Anzahl der Messungen.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s_{Ms} = \sqrt{\frac{\sum (M s_i - \bar{M}s)^2}{n-1}}, \quad s_{Hc} = \sqrt{\frac{\sum (H c_i - \bar{H}c)^2}{n-1}}$$

Qualifikationsbeurteilung: Durchschnittswertabweichung <±5 %, Standardabweichung <5 % (magnetische Sättigungsintensität), <50 A/m (Koerzitivkraft).

### 8 Auswertung der Messergebnisse

#### 8.1 Magnetischer Eigenschaftsbereich

Die magnetischen Eigenschaften von Hartmetall variieren je nach Sorte:

YG6 (6 % Co): magnetische Sättigungsintensität 0,15–0,18 T, Koerzitivkraft 10–20 kA/m.

YG8 (8 % Co): magnetische Sättigungsintensität 0,20–0,24 T, Koerzitivkraft 8–15 kA/m.

YT15 (5 % Co + TiC): magnetische Sättigungsintensität 0,12–0,15 T, Koerzitivkraft 15–25 kA/m.

#### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben liegt bei <±5 %, die Standardabweichung beträgt <5 % (magnetische Sättigungsintensität) und <50 A/m (Koerzitivkraft), andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich. Wenn das Ergebnis unter den technischen Anforderungen liegt, müssen die Gründe analysiert werden (z. B. ungleichmäßige Verteilung der Kobaltphase und Einfluss von Verunreinigungen).

#### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Eine Oberflächenrauheit > 0,1 μm oder eine Porosität > 0,5 % kann die magnetische Sättigungsintensität um 3–5 % reduzieren.

Magnetfeldstörungen: Externe Magnetfelder >5 A/m können zu Messfehlern von 2%-3% führen.

Materialzusammensetzung: Eine Schwankung des Kobaltgehalts > ±0,5 % oder das Vorhandensein einer η-Phase kann die magnetische Sättigungsintensität um 5–10 % verringern und die Koerzitivkraft um 10–20 % erhöhen.

Gerätekalibrierung: Eine Abweichung der magnetischen Feldstärke von >1 % kann zu einer Abweichung der Ergebnisse von 2–5 % führen.

### 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe (10 × 10 × 5 mm oder Durchmesser 10 mm, Höhe 5 mm).

Testbedingungen: Testermmodell, magnetische Feldstärke (>500 kA/m), Umgebungstemperatur (15 °C bis 30 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: magnetische Sättigungsintensität und Koerzitivfeldstärke jeder Probe, Mittelwert, Standardabweichung und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der magnetischen Eigenschaften typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt<br>( Gew.- %) | Magnetische<br>Sättigungsintensität (T) | Koerzitivkraft<br>(kA/m) | Typische Anwendungen            |
|-------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                       | 0,15–0,18                               | 10-20                    | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                       | 0,20–0,24                               | 8-15                     | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                       | 0,12–0,15                               | 15-25                    | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 15 °C bis 30 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine externen Magnetfeldstörungen (<5 A/m), keine Vibrationen und keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandeseinheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 4884:2019 „Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Sättigungsstärke und Koerzitivfeldstärke von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die Hystereseschleifenmethode. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung der Qualität und Mikrostruktur der Kobaltphase bei und bietet technische Unterstützung für die Qualitätskontrolle im Hartmetallherstellungsprozess.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

ISO 3369:2006

Methode zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall unter Verwendung des archimedischen Prinzips fest und ist auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase anwendbar, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC , TiC , NbC , VC). Diese Norm gilt für die Qualitätskontrolle und die Überprüfung der Materialzusammensetzung und wird häufig bei Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und anderen Anwendungsbereichen verwendet.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Dichte: Ein Maß für die Masse pro Volumeneinheit, ausgedrückt in  $\text{g/cm}^3$  , das die Kompaktheit von Hartmetall widerspiegelt.

Archimedisches Prinzip: Eine Methode zur Messung der Dichte, die auf der Beziehung zwischen dem von einem Objekt in einer Flüssigkeit verdrängten Flüssigkeitsvolumen und seiner Masse basiert.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Dichte wird nach dem archimedischen Prinzip bestimmt. Die Dichte der Probe wird berechnet, indem die Masse der Probe in der Luft und die durch den Auftrieb in der Flüssigkeit gehaltene Masse gemessen werden. Die Formel lautet:

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

其中:

- $\rho$  为试样密度 ( $\text{g/cm}^3$ ) ,
- $m_a$  为试样在空气中的质量 (g) ,
- $m_l$  为试样在液体中的质量 (g) ,
- $\rho_l$  为液体的密度 ( $\text{g/cm}^3$  , 通常为去离子水的  $0.997 \text{ g/cm}^3$  ,  $20^\circ\text{C}$ ) 。

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](http://www.ctia.com.cn)

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

$\rho$  ist die Probendichte ( $\text{g/cm}^3$ ),  
 $m_a$  ist die Masse der Probe in Luft (g),  
 $m_l$  ist die Masse der Probe in der Flüssigkeit (g),  
 $\rho_l$  ist die Dichte der Flüssigkeit ( $\text{g/cm}^3$ , typischerweise  $0,997 \text{ g/cm}^3$  für deionisiertes Wasser bei  $20^\circ\text{C}$ ).

## 5. Messgeräte

### 5.1 Bilanz

Messbereich: 0–200 g, Genauigkeit  $\pm 0,0001 \text{ g}$ .

Ausgestattet mit einer Aufhängevorrichtung zur Messung in Flüssigkeiten.

### 5.2 Flüssigkeitsbehälter

Material: korrosionsbeständiges Glas oder Edelstahl.

Flüssigkeit: deionisiertes Wasser, Temperatur geregelt bei  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### 5.3 Thermometer

Messbereich:  $0^\circ\text{C}$  bis  $50^\circ\text{C}$ , Genauigkeit  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ .

### 5.4 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5 \text{ mm}$ , ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $15^\circ\text{C}$  bis  $25^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: beliebige Form, empfohlene Größe  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$  oder Gesamtmasse  $\geq 5 \text{ g}$ .

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Poren oder Oxidschichten sein und die Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  betragen.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse  $> 0,05 \text{ g/cm}^3$  ist, muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von <0,1 mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit Ra < 0,1 µm .

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Die Genauigkeit der geeichten Waage beträgt <±0,0001 g.

Das Thermometer wurde mit einer Abweichung von < ±0,1 °C kalibriert.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 15 °C bis 25 °C, 20 ± 1 °C empfohlen.

Flüssigkeitstemperatur: 20±1°C.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Messen Sie die Masse der Probe in der Luft,  $m_a$ , und notieren Sie sie auf 0,0001 g genau.

Hängen Sie die Probe unter eine Waage, tauchen Sie sie in deionisiertes Wasser, messen Sie ihre Masse in der Flüssigkeit ( $m_l$ ) und zeichnen Sie sie auf 0,0001 g genau auf.

Stellen Sie sicher, dass die Probe vollständig eingetaucht und frei von Luftblasen ist.

Wiederholen Sie die Messung 3–5 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Dichte jeder Probe:

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

wobei  $\rho_l = 0,997 \text{ g/cm}^3$  (20 °C).

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho_i}{n}$$

Dabei ist  $\rho_i$  die Dichte einer einzelnen Probe und n die Anzahl der Proben.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}}$$

Qualifizierungsbeurteilung: durchschnittliche Dichteabweichung  $< \pm 0,5 \%$ , Standardabweichung  $< 0,05 \text{ g/cm}^3$ .

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Dichtebereich

Der Dichtebereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 14,8–15,0 g/cm<sup>3</sup>.

YG8 (8 % Co): 14,6–14,8 g/cm<sup>3</sup>.

YT15 (5 % Co + TiC) : 11,5–12,0 g/cm<sup>3</sup>.

### 8.2 Abweichungsbewertung

Die durchschnittliche Dichteabweichung von 3-5 Proben beträgt  $< \pm 0,5 \%$ , die Standardabweichung  $< 0,05 \text{ g/cm}^3$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn die Dichte unter den technischen Anforderungen liegt, müssen die Gründe analysiert werden (z. B. hohe Porosität und Abweichung in der Zusammensetzung).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Oberflächenrauheiten  $> 0,1 \mu\text{m}$  oder Risse  $> 0,05 \text{ mm}$  können zu Dichtemessfehlern von 0,1 %–0,2 % führen.

Flüssigkeitstemperatur: Eine Temperaturabweichung von  $> 1^\circ\text{C}$  von  $20^\circ\text{C}$  kann zu einer Dichteabweichung von 0,05%–0,1% führen.

Blasenhaftung: Blasen auf der Probenoberfläche können den Messwert um 0,1 %–0,3 % reduzieren.

Materialzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5 \%$  oder ein unzureichender WC-Gehalt können die Dichtegleichmäßigkeit beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe ( $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$  oder Gesamtmasse  $\geq 5 \text{ g}$ ).

Testbedingungen: Waagenmodell, Flüssigkeitstemperatur ( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ), Umgebungstemperatur ( $15^\circ\text{C}$  bis  $25^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: Dichte, Mittelwert, Standardabweichung und Abweichung jeder Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Typische Referenzwerte für die Hartmetalldichte

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.-% ) | Dichte ( g/cm <sup>3</sup> ) | Typische Anwendungen |
|-------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| YG6   | 6                    | 14,8-15,0                    | Bergbaubohrer        |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Dichte ( g/cm <sup>3</sup> ) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| YG8   | 8                    | 14,6-14,8                    | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 11,5-12,0                    | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 15 °C bis 25 °C, 20 ± 1 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 3369:2006 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Hartmetалldichte und gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch das archimedische Prinzip. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle und die Überprüfung der Materialzusammensetzung und bietet technischen Support für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Teile.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

ISO 28079:2009

Bestimmungsmethode der Bruchzähigkeit von Hartmetall

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ,  $K_{IC}$ ) von Hartmetall unter Verwendung der Prüfmethode mit einseitig gekerbtem Balken (SENB) fest und ist auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase anwendbar, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC, TiC, NbC, VC). Diese Norm gilt für die Bewertung der Widerstandsfähigkeit von Hartmetall gegen Rissausbreitung und wird häufig für Leistungsanalysen in Anwendungsbereichen mit hoher Beanspruchung wie Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Teilen verwendet.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

ISO 12135:2002 Metallische Werkstoffe – Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und ISO 12135:2002 sowie die folgenden Begriffe und Definitionen:

Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ,  $K_{IC}$ ): Die Fähigkeit eines Materials, Risswachstum zu widerstehen, ausgedrückt in  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , gemessen unter ebenen Dehnungsbedingungen.

Single Edge Notched Beam (SENB): Eine Balkenprobe mit einer Kerbe auf einer Seite, die für die Prüfung der Bruchzähigkeit verwendet wird.

Vorriss: Der erste Riss, der durch Ermüdungsbelastung am gekerbten Ende der Probe entsteht.

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ,  $K_{IC}$ ) wird anhand des Single Edge Notched Beam (SENB)-Tests ermittelt. Dieser misst den kritischen Spannungsintensitätsfaktor beim Bruch einer Probe durch Aufbringen einer konzentrierten Last auf die Probe.  $K_{IC}$ ,  $K_{IC}$  wird nach folgender Formel berechnet:

$$K_{IC} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot Y \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中:

- $K_{IC}$  为断裂韧性 ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) ,
  - $F$  为断裂载荷 (N) ,
  - $B$  为试样厚度 (m) ,
  - $W$  为试样宽度 (m) ,
  - $a$  为切口深度 (m) ,
  - $Y$  为几何因子 (取决于  $a/W$  比) ,
  - $f\left(\frac{a}{W}\right)$  为校正函数 (基于标准表或公式) ,
- $a/W$  比通常在 0.45 至 0.55 之间。

## 5. Messgeräte

### 5.1 Prüfmaschine

Belastbarkeit: 0–50 kN , Genauigkeit  $\pm 1\%$ .

Ladegeschwindigkeit: 0,1–1 mm/min, einstellbar.

Ausgestattet mit Kraftsensor und Wegsensor mit Auflösung  $<0,01\text{ N}$  und  $<0,01\text{ mm}$ .

### 5.2 Ermüdungsbeanspruchungseinrichtungen

Ladefrequenz: 10–30 Hz, Genauigkeit  $\pm 1\text{ Hz}$ .

Maximale Belastung: nicht mehr als 80 % der Biegefestigkeit, Genauigkeit  $\pm 1\%$ .

### 5.3 Vorrichtung

Dreipunktbiegevorrichtung: Auflagepunktradius 1–2 mm, Belastungspunktradius 1 mm, Auflagespannweite 16–20 mm.

Klemmmaterial: Gehärteter Stahl, Härte  $> \text{HRC } 60$ .

### 5.4 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $<0,1\text{ mm}$ , ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, empfohlene Größe:  $20 \times 4 \times 2\text{ mm}$  ( Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe ), Toleranz  $\pm 0,02\text{ mm}$ .

Schnittführung: Tiefe  $a$   $a$  ist die Breite der Probe  $W$   $45\%–55\%$  von  $W$  , Einschnittbreite  $<0,1\text{ mm}$ , Spitzenradius  $<0,05\text{ mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Die Oberfläche der Probe sollte flach und ohne Risse oder Oxidschicht sein und die Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$  betragen.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse  $> 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  ist, die Anzahl der Proben muss auf 10 erhöht werden.

## 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $< 0,05 \text{ mm/s}$  und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie eine  $0,25 \mu\text{m}$  Aluminiumoxid - Polierflüssigkeit, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ .

## 6.4 Vorbereitung vor dem Riss

Mittels einer Ermüdungsbelastungsvorrichtung wurde ein Vorriss am Kerbenende erzeugt, mit einem Belastungsbereich von 50–80 % der Biegefestigkeit und einer Frequenz von 10–30 Hz.

Die Vorrisslänge vergrößerte sich um 0,5–1 mm und der Spitzenradius betrug  $< 0,01 \text{ mm}$ .

## 6.5 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Belastungsgenauigkeit der Prüfmaschine, Abweichung  $< \pm 1 \%$ .

Kalibrieren Sie die Vorrichtungszentrierung, Abweichung  $< 0,02 \text{ mm}$ .

Kalibrieren Sie die Belastung und Frequenz der Ermüdungsbelastungsgeräte mit einer Abweichung von  $< \pm 1 \%$ .

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.3 Testbetrieb

Die Probe wurde in eine Dreipunkt-Biegevorrichtung gelegt, wobei der Auflagepunkt auf den Belastungspunkt ausgerichtet war und die Spannweite 16 mm betrug.

Stellen Sie die Ladegeschwindigkeit auf  $0,5 \pm 0,2$  mm/min ein.

Wenden Sie eine Last an, bis die Probe bricht, und zeichnen Sie die maximale Last F und die Bruchverschiebung auf.

Die Kerbtiefe a und die Probenbreite W wurden gemessen und das a/W -Verhältnis berechnet.

Wiederholen Sie das Experiment 5–10 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Bruchzähigkeit KIC jeder Probe gemäß der Formel in Abschnitt 4.

几何因子 Y 和校正函数  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  参考标准表 (附录 A)。

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{K}_{IC} = \frac{\sum K_{ICi}}{n}$$

Wo  $K_{ICi}$  ist die Bruchzähigkeit einer einzelnen Probe und n ist die Anzahl der Proben.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (K_{ICi} - \bar{K}_{IC})^2}{n - 1}}$$

Qualifizierungsbeurteilung: durchschnittliche Bruchzähigkeitsabweichung  $\leq \pm 5$  %, Standardabweichung  $< 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Bruchzähigkeitsbereich

Der Bruchzähigkeitsbereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co):  $12\text{--}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

YG8 (8 % Co):  $10\text{--}13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

YT15 (5 % Co + TiC) :  $8\text{--}11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

### 8.2 Abweichungsbewertung

5-10 Proben sind  $\leq \pm 5\%$  und die Standardabweichung ist  $< 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt die Bruchzähigkeit unter den technischen Anforderungen, müssen die Gründe dafür analysiert werden (z . B. ungleichmäßige Vorrisse und Probendefekte).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Kerbbreiten  $> 0,1 \text{ mm}$  oder ungleichmäßige Vorrisse können die Bruchzähigkeit um 5–10 % reduzieren.

Ladebedingungen: Eine Ladegeschwindigkeit von  $> 1 \text{ mm/min}$  oder eine Abweichung der Vorrichtungszentrierung von  $> 0,05 \text{ mm}$  kann zu einer Ergebnisabweichung von 3–5 % führen.

Materialzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5 \%$  oder eine WC-Korngröße  $> 2$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

µm können die Gleichmäßigkeit der Zähigkeit beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe (20×4×2 mm), Kerbtiefe a und a/W - Verhältnis.

Testbedingungen: Modell der Prüfmaschine, Vorrichtungstyp (Dreipunkt), Belastungsgeschwindigkeit (0,5 ± 0,2 mm/min), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: Bruchzähigkeit, Mittelwert, Standardabweichung und Variation jeder Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Normativer Anhang) Geometrische Faktoren und Korrekturfunktionstabellen

| a/W -Verhältnis | Geometriefaktor Y | Korrekturfunktion f(aW) |
|-----------------|-------------------|-------------------------|
| 0,45            | 1,92              | 3.08                    |
| 0,50            | 2,00              | 3.47                    |
| 0,55            | 2.10              | 3,92                    |

Hinweis: Spezifische Werte werden basierend auf der Probengeometrie und den Belastungsbedingungen aus Standardtabellen interpoliert.

## Anhang B (Informativer Anhang) Referenzwerte der Bruchzähigkeit typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt (Gew.-%) | Bruchzähigkeit (MPa · m <sup>1/2</sup> ) | Typische Anwendungen         |
|-------|--------------------|------------------------------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                  | 12-15                                    | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                  | 10-13                                    | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                  | 8-11                                     | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 28079:2009 „Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit (KIC) von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch den Einkanten-Kerbbalken-Test (SENB). Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall bei und bietet technische Unterstützung für hochbeanspruchte Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Teile.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



Anhang:

ISO 3878:1983

Prüfverfahren für die Rockwell-Härte von Hartmetall (HRA-Skala)

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Rockwellhärte (HRA-Skala) von Hartmetall fest. Dabei wird ein Rockwell-Härteprüfgerät verwendet, um eine Anfangslast von 10 kgf (98,07 N) und eine Gesamtlast von 60 kgf (588,4 N) aufzubringen. Sie gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC, VC). Dieser Standard eignet sich zur schnellen Bewertung der Eindruckfestigkeit von Hartmetall und wird häufig bei der Qualitätskontrolle von Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Teilen verwendet.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

ISO 6508-1:2005 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe, Teil 1: Prüfverfahren (Skalen A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und ISO 6508-1:2005 sowie die folgenden Begriffe und Definitionen:

Rockwell-Härte (HRA): Der Härtewert basiert auf dem Tiefenunterschied, nachdem der Rockwell-Eindringkörper in die Probenoberfläche eingedrückt wurde. Die Einheit ist HRA und eignet sich für Materialien mit hoher Härte.

Diamantkegel-Eindringkörper: Ein Diamant-Eindringkörper mit einem Spitzenwinkel von 120°, der in Rockwell-Härteprüfgeräten verwendet wird.

Anfangslast: Die auf die Probe ausgeübte Anfangskraft mit einem Wert von 10 kgf (98,07 N).

Gesamtlast: Vorlast plus Hauptlast, Wert beträgt 60 kgf (588,4 N).

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

4. Bestimmungsprinzip

Die Rockwell-Härte (HRA-Skala) wird mit einem Rockwell-Härteprüfgerät bestimmt. Dieses misst den Tiefenunterschied, nachdem der Eindringkörper mit einer Anfangslast von 10 kgf und einer Gesamtlast von 60 kgf in die Probenoberfläche eingedrückt wurde. Der Härtewert wird nach folgender Formel berechnet:

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRA HRA ist der Rockwell-Härtewert,  $h_h$  ist die Differenz zwischen der Eindrucktiefe nach dem Entfernen der Gesamtlast und der ursprünglichen Lasttiefe (mm), und 0,002 mm ist die Einheits-tiefe der Rockwell-Härteskala. Die HRA-Skala ist auf den Härtebereich von 20–88 HRA anwendbar und wird üblicherweise für Materialien mit hoher Härte wie Hartmetall verwendet.

## 5. Messgeräte

### 5.1 Rockwell-Härteprüfgerät

Lastbereich: 10 kgf (Vorlast) + 50 kgf (Hauptlast) = 60 kgf (Gesamtlast), Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Eindringkörper: Diamantkegel mit  $120^\circ$  Spitzenwinkel, Spitzenradius 0,2 mm, Genauigkeit  $\pm 0,01$  mm.

Tiefenmessung: Auflösung 0,001 mm, Genauigkeit  $\pm 0,5\ \mu\text{m}$ .

Belastungszeit: Vorbelastung 2–8 s, Gesamtbelastung 10–15 s, Genauigkeit  $\pm 1$  s.

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5$  mm, ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.3 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10\ ^\circ\text{C}$  bis  $35\ ^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2\ ^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe ist  $10 \times 10 \times 5$  mm oder 10 mm Durchmesser und 5 mm Höhe.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein und die Oberflächenrauigkeit  $R_a < 0,02\ \mu\text{m}$  betragen.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse  $> 2$  HRA ist, muss die Anzahl der Proben auf 10 erhöht werden.

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $< 0,1$  mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grobschliff: Verwenden Sie 600# oder 1200# Diamantschleifpapier, um die Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie eine  $0,25 \mu\text{m}$  Aluminiumoxid - Polierflüssigkeit, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ .

#### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Last des Rockwell-Härteprüfers, Abweichung  $< \pm 0,5 \%$ .  
das Tiefenmesssystem auf eine Genauigkeit von  $< \pm 0,5 \mu\text{m}$ .

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Rockwell-Härteprüfgeräts und passen Sie die Oberflächenebene an.

Wenden Sie eine Anfangslast von 10 kgf an, halten Sie sie 2–8 s lang und zeichnen Sie die Anfangstiefe auf.

Eine Gesamtlast von 60 kgf wurde aufgebracht und 10–15 s lang aufrechterhalten, und der Tiefenunterschied wurde aufgezeichnet, nachdem die Hauptlast entfernt wurde.

Messen Sie mindestens 3 verschiedene Positionen auf der Oberfläche der Probe mit einem Abstand von  $\geq 2,5 \text{ mm}$ .

Wiederholen Sie das Experiment 5–10 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Lesen Sie direkt den vom Rockwell-Härteprüfer angezeigten HRA-Wert ab.

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{HRA} = \frac{\sum HRA_i}{n}$$

Wo  $HRA_i$  ist ein einzelner Messwert und  $n$  ist die Anzahl der Messungen.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HRA_i - \bar{HRA})^2}{n-1}}$$

Qualifikationsbeurteilung: durchschnittliche Härteabweichung  $< \pm 2\%$ , Standardabweichung  $< 2$  HRA.

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Härtebereich

Der Rockwell-Härtebereich (HRA) von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 85–90 HRA.

YG8 (8 % Co): 83–88 HRA.

YT15 (5 % Co + TiC) : 87–92 HRA.

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 5–10 Messpunkten liegt bei  $< \pm 2\%$  und die Standardabweichung bei  $< 2$  HRA, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt die Härte unter den technischen Anforderungen, müssen die Gründe (z. B. Oberflächenfehler und ungleichmäßige Belastung) analysiert werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Eine Oberflächenrauheit  $> 0,02\ \mu\text{m}$  oder Risse  $> 0,05\ \text{mm}$  können die Härte um 2–5 % reduzieren.

Ladezeit: Bei einer Gesamtladezeit von  $< 10\ \text{s}$  oder  $> 15\ \text{s}$  kann es zu einem Messfehler von 1 %–2 % kommen.

Umgebungsbedingungen: Eine Luftfeuchtigkeit von  $> 70\%$  oder Temperaturschwankungen von  $> 5\ ^\circ\text{C}$  können die Genauigkeit der Tiefenmessung beeinträchtigen.

Materialzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5\%$  oder eine WC-Korngröße  $> 2\ \mu\text{m}$  können die Härtegleichmäßigkeit beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe ( $10 \times 10 \times 5\ \text{mm}$  oder Durchmesser  $10\ \text{mm}$ , Höhe  $5\ \text{mm}$ ).

Testbedingungen: Rockwell-Härteprüfermodell, Belastung ( $10\ \text{kgf} + 50\ \text{kgf} = 60\ \text{kgf}$ ), Belastungszeit (2–8 s vorläufig, 10–15 s insgesamt), Umgebungstemperatur ( $10\ ^\circ\text{C}$  bis  $35\ ^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit (30–70 %).

Testergebnisse: Härtewert an jedem Punkt, Durchschnittswert, Standardabweichung und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Rockwellhärte (HRA) typischer

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Härte (HRA) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|-------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | 85-90       | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | 83-88       | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 87-92       | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 3878:1983 „Prüfverfahren für die Rockwellhärte von Hartmetall (HRA-Skala)“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Rockwellhärte von Hartmetall und gewährleistet die schnelle und vergleichbare Ermittlung der Ergebnisse mithilfe eines Rockwellhärteprüfgeräts. Die Anwendung dieser Norm trägt zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall bei und bietet technischen Support für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Teile.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

## ISO 3326:2013 Hartmetall Vickers-Härteprüfverfahren

### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Vickershärte von Hartmetall fest. Dabei wird ein Vickers-Härteprüfgerät mit einer Last von 10–50 kgf (98,07–490,3 N) verwendet. Sie gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC, VC). Diese Norm gilt für die Bewertung der Eindruckfestigkeit von Hartmetall und wird häufig in der Qualitätskontrolle von Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und anderen Anwendungsbereichen verwendet.

### 2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

ISO 6507-1:2005 Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 1: Prüfverfahren

### 3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und ISO 6507-1:2005 sowie die folgenden Begriffe und Definitionen:

Vickershärte (HV): Ein Maß für den Eindruckwiderstand pro Flächeneinheit einer Probenoberfläche, nachdem der Vickers-Eindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt wurde, ausgedrückt in HV (Härtewert).

Vickers-Eindringkörper: Ein viereckiger Pyramideneindringkörper aus Diamant mit einem Scheitelwinkel von 136°.

Last: Die auf die Probe ausgeübte Kraft im Bereich von 10–50 kgf (98,07–490,3 N).

Hartmetall: Ein pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase.

### 4. Bestimmungsprinzip

Die Bestimmung der Vickershärte basiert auf dem Vickers-Härteprüfgerät. Dabei wird ein diamantener, viereckiger Pyramideneindringkörper mit einer bestimmten Kraft in die Probenoberfläche gedrückt, die diagonale Länge des Eindrucks gemessen und der Eindruckwiderstand pro Flächeneinheit berechnet. Der Härtewert wird nach folgender Formel berechnet:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

HV HV HV ist die Vickershärte ( kgf / mm<sup>2</sup> ), F F F ist die aufgebrachte Last ( kgf ), d d d ist die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durchschnittliche Länge der beiden Diagonalen des Eindrucks (mm). Das Ergebnis wird üblicherweise, je nach Belastung, in HV10 oder HV30 umgerechnet.

## 5. Messgeräte

### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Lastbereich: 10–50 kgf (98,07–490,3 N), Genauigkeit  $\pm 1\%$ .

Eindringkörper: Viereckige Diamantpyramide, Scheitelwinkel  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ .

Mikroskop: Vergrößerung 200×–500×, Auflösung  $< 0,001$  mm.

Ladezeit: 10–15 s, Genauigkeit  $\pm 1$  s.

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5$  mm, ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.3 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $23 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe ist  $10 \times 10 \times 5$  mm oder 10 mm Durchmesser und 5 mm Höhe.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein und die Oberflächenrauigkeit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$  betragen.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse  $> 20$  HV ist, muss die Anzahl der Proben auf 10 erhöht werden.

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $< 0,1$  mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600# oder 1200# Diamantschleifpapier, um die Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  .  
Polieren: Verwenden Sie eine  $0,25 \mu\text{m}$  Aluminiumoxid - Polierflüssigkeit, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$  .

#### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

### 7 Messschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Last des Vickers-Härteprüfers, Abweichung  $< \pm 1 \%$ .

Die Mikroskopvergrößerung und die diagonale Messgenauigkeit wurden auf eine Abweichung von  $< \pm 0,5 \%$  kalibriert.

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Vickers-Härteprüfgeräts und richten Sie die Oberfläche waagrecht aus.

Wählen Sie die Last: 10 kgf (HV10) oder 30 kgf (HV30), abhängig von der Dicke und Güte der Probe.

Wenden Sie die Last für 10–15 s an und messen Sie die Länge der beiden Diagonalen der Vertiefung, nachdem Sie die Last entfernt haben. D .

Messen Sie mindestens 3 verschiedene Positionen auf der Oberfläche der Probe mit einem Abstand von  $\geq 2,5 \text{ mm}$ .

Wiederholen Sie das Experiment 5–10 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

#### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Vickershärte jeder Probe:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

Dabei ist F die Last ( kgf ) und d die durchschnittliche diagonale Länge der Vertiefung (mm).

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Wobei  $HV_i$  ist ein einzelner Messwert und n ist die Anzahl der Messungen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Qualifikation: Durchschnittliche Härteabweichung  $< \pm 5\%$ , Standardabweichung  $< 20$  HV.

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Härtebereich

Der Vickers-Härtebereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 1400–1600 HV30.

YG8 (8 % Co): 1300–1500 HV30.

YT15 (5 % Co + TiC) : 1500–1700 HV10.

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 5–10 Messpunkten liegt bei  $< \pm 5\%$  und die Standardabweichung bei  $< 20$  HV, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt die Härte unter den technischen Anforderungen, müssen die Gründe dafür analysiert werden (z. B. Oberflächenfehler, unzureichende Belastung).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Eine Oberflächenrauheit  $> 0,02 \mu\text{m}$  oder Risse  $> 0,05 \text{ mm}$  können die Härte um 5–10 % reduzieren.

Lastauswahl: Eine zu niedrige ( $< 10 \text{ kgf}$ ) oder zu hohe ( $> 50 \text{ kgf}$ ) Last kann zu einem Messfehler von 3–5 % führen.

Umgebungsbedingungen: Eine Luftfeuchtigkeit von  $> 70\%$  oder Temperaturschwankungen von  $> 5^\circ\text{C}$  können die Klarheit der Eindrücke beeinträchtigen.

Materialzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5\%$  oder eine WC-Korngröße  $> 2 \mu\text{m}$  können die Härtegleichmäßigkeit beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe ( $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$  oder Durchmesser  $10 \text{ mm}$ , Höhe  $5 \text{ mm}$ ).

Testbedingungen: Vickers-Härteprüfermodell, Last ( $10 \text{ kgf}$  oder  $30 \text{ kgf}$ ), Belastungszeit ( $10\text{--}15 \text{ s}$ ), Umgebungstemperatur ( $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $30\text{--}70\%$ ).

Testergebnisse: Härtewert an jedem Punkt, Durchschnittswert, Standardabweichung und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Vickershärte typischer Hartmetalle

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Belastung ( kgf ) | Härte (HV) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|-------------------|------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | 30                | 1400-1600  | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | 30                | 1300-1500  | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 10                | 1500-1700  | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

#### Zusammenfassen

ISO 3326:2013 „Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Vickershärte von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch den Vickershärteprüfer. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Hartmetall bei und bietet technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Teile.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

ISO 4489-2:2020

Hartmetall

Bestimmungsmethode der Biegefestigkeit

Teil 2: Hochtemperaturbedingungen

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall unter Hochtemperaturbedingungen (über 35 °C) unter Verwendung eines Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuchs fest und ist auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase anwendbar, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC, TiC, NbC, VC). Als Teil der ISO 4489-Reihe ergänzt diese Norm das Prüfverfahren bei Raumtemperatur der ISO 4489:2010 und ist auf die Leistungsbewertung in Hochtemperaturumgebungen anwendbar, wie beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt und bei Hochtemperatur-Schneidwerkzeuganwendungen.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 4489:2010 Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Biegefestigkeit: Die maximale Spannung, der eine Probe in einem Hochtemperatur-Biegetest standhält, gemessen in MPa, spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, einem Bruch bei hohen Temperaturen zu widerstehen.

Dreipunkt-Biegeversuch: Zwischen zwei Auflagepunkten wird ein einzelner Lastpunkt angelegt, um die maximale Spannung zu messen, bei der die Probe bricht.

Vierpunkt-Biegeversuch: Zwischen zwei Auflagepunkten werden zwei Belastungspunkte angelegt, um die maximale Spannung beim Bruch der Probe zu messen.

Hochtemperaturbedingungen: Die Testtemperatur liegt über 35 °C, normalerweise im Bereich von 200 °C bis 1200 °C.

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

4. Bestimmungsprinzip

Die Bestimmung der Biegefestigkeit basiert auf einem Hochtemperatur-Biegeversuch. Dabei werden Belastungen durch Drei- oder Vierpunktbelastung aufgebracht, um die maximale Bruchspannung der Probe bei hoher Temperatur zu messen. Die Spannungsberechnung basiert auf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Probengeometrie und den Belastungsbedingungen nach folgender Formel:

Dreipunktbiegung:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Dabei ist  $\sigma$  die Biegefestigkeit (MPa), F die Bruchlast (N), L die Stützspanne (mm), b die Probenbreite (mm) und h die Probendicke (mm).

Vierpunktbiegung:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

ist L1 die äußere Stützweite (mm) und L2 die innere Belastungsweite (mm).

Unter Hochtemperaturbedingungen ändern sich die Materialeigenschaften (wie Streckgrenze und Bruchfestigkeit) mit der Temperatur und es ist ein Hochtemperaturofen erforderlich, um die Umgebung zu kontrollieren und Wärmeausdehnungseffekte auszugleichen.

## 5. Messgeräte

### 5.1 Prüfmaschine

Belastbarkeit: 0–50 kN, Genauigkeit  $\pm 1\%$ .

Ladegeschwindigkeit: 0,5–5 mm/min, einstellbar.

Ausgestattet mit Kraftsensor und Wegsensor mit Auflösung  $<0,01$  N und  $<0,01$  mm.

### 5.2 Hochtemperaturofen

Temperaturbereich: 200 °C bis 1200 °C, Genauigkeit  $\pm 5$  °C.

Heizrate: 5–10 °C/min, Stabilisierungszeit  $\geq 30$  min.

Schutzatmosphäre: Inertgas (z. B. Argon) oder Vakuumumgebung zur Verhinderung von Oxidation.

### 5.3 Vorrichtung

Dreipunkt-Biegevorrichtung: Auflagepunktradius 1–2 mm, Belastungspunktradius 1 mm.

Vierpunktbiegevorrichtung: äußerer Auflageabstand 20–40 mm, innerer Belastungsabstand 10–20 mm, Auflagepunktradius 1–2 mm.

Vorrichtungsmaterial: hochtemperaturbeständige Legierung (z. B. Inconel), Arbeitstemperatur  $\geq 1200$  °C.

### 5.4 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $<0,5$  mm, ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 200°C bis 1200°C (Testtemperatur), Außenumgebung 10°C bis 35°C, empfohlen  $23 \pm 2$  °C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung (außer Schutzatmosphäre).

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, empfohlene Größe: 20×6,5×5,25 mm ( Länge×Breite×Höhe ), Toleranz ±0,1 mm.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 10 betragen.

Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse >50 MPa ist, muss die Anzahl der Proben auf 15 erhöht werden.

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von <0,1 mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit Ra < 0,1 µm .

Polieren: Verwenden Sie eine 0,25 µm Aluminiumoxid - Polierflüssigkeit, Oberflächenrauheit Ra < 0,02 µm .

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Belastungsgenauigkeit der Prüfmaschine, Abweichung <±1 %.

Kalibrieren Sie die Ofentemperatur auf ±5 °C genau.

Kalibrieren Sie die Vorrichtung auf einen Zentrierfehler von <0,05 mm.

### 7.2 Prüfbedingungen

Prüftemperatur: 200°C bis 1200°C, die konkrete Temperatur wird je nach Material und Anwendung eingestellt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Aufheizzeit: Nach dem Aufheizen auf die Zieltemperatur 30 Minuten stabilisieren.

Schutzatmosphäre: Argon-Flussrate 0,5–1 l/min oder Vakuumgrad  $<10^{-2}$  Pa.

### 7.3 Testbetrieb

Die Probe wird in einer Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegevorrichtung in einem Hochtemperaturofen platziert, wobei die Auflagepunkte mit den Belastungspunkten ausgerichtet sind.

Die Temperatur wurde auf die Zieltemperatur erhöht und 30 Minuten lang stabilisiert, bevor der Test begann.

Stellen Sie die Ladegeschwindigkeit auf  $1 \pm 0,5$  mm/min ein.

Belasten Sie die Probe, bis sie bricht, und notieren Sie die maximale Belastung  $F_F$  und Bruchverschiebung.

Wiederholen Sie das Experiment 10–15 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Biegefestigkeit  $\sigma$  jeder Probe nach der Formel in Abschnitt 4

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

Dabei ist  $\sigma_i$  die Biegefestigkeit einer einzelnen Probe und  $n$  die Anzahl der Proben.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

Qualifikationsbeurteilung: durchschnittliche Abweichung der Biegefestigkeit  $< \pm 5$  %, Standardabweichung  $< 50$  MPa.

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Biegefestigkeitsbereich

Der Hochtemperatur-Biegefestigkeitsbereich von Hartmetall hängt von der Sorte und der Temperatur ab:

YG6 (6 % Co): 1500–2000 MPa (600 °C).

YG8 (8 % Co): 1300–1800 MPa (800 °C).

YT15 (5 % Co + TiC) : 1000–1400 MPa (1000 °C).

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 10–15 Proben liegt bei  $< \pm 5$  % und die Standardabweichung bei  $< 50$  MPa, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn die Biegefestigkeit unter den technischen Anforderungen liegt, müssen die Gründe (z . B. Oxidation und Probendefekte) analysiert werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Temperatur: Temperaturen  $> 1000$  °C können dazu führen, dass die Co-Phase erweicht und die Biegefestigkeit um 20–30 % abnimmt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oxidation: Eine unzureichende Schutzatmosphäre kann zu Oberflächenoxidation und einem Festigkeitsverlust von 10–15 % führen.

Probenvorbereitung: Eine Oberflächenrauheit  $> 0,02 \mu\text{m}$  oder Risse  $> 0,05 \text{ mm}$  können die Festigkeit um 5–10 % verringern.

Belastungsbedingungen: Eine Belastungsgeschwindigkeit von  $> 5 \text{ mm/min}$  oder eine Fehlausrichtung der Vorrichtung von  $> 0,1 \text{ mm}$  kann zu einer Abweichung von 5 % in den Ergebnissen führen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe (20×6,5×5,25 mm).

Prüfbedingungen: Prüfmaschinenmodell, Hochtemperaturofenmodell, Vorrichtungstyp (Dreipunkt oder Vierpunkt), Belastungsgeschwindigkeit (1±0,5 mm/min), Prüftemperatur (200 °C bis 1200 °C), Schutzatmosphäre, Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Prüfergebnisse: Biegefestigkeit, Mittelwert, Standardabweichung und Abweichung der einzelnen Proben.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Hochtemperatur-Biegefestigkeit typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt<br>( Gew.-% ) | Temperatur<br>( °C ) | Biegefestigkeit<br>( MPa ) | Typische Anwendungen               |
|-------|-------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| YG6   | 6                       | 600                  | 1500-2000                  | Hochtemperaturbohrer               |
| YG8   | 8                       | 800                  | 1300-1800                  | Hochtemperatur-Schneidwerkzeuge    |
| YT15  | 5                       | 1000                 | 1000-1400                  | Hochtemperatur-Finishing-Werkzeuge |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Prüftemperatur: 200°C bis 1200°C, Genauigkeit  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Umgebungstemperatur außerhalb des Ofens: 10°C bis 35°C,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  werden empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung (außer Schutzatmosphäre).

Prüfstandesebenheit: Abweichung  $< 0,02 \text{ mm/m}$ .

## Zusammenfassen

ISO 4489-2:2020 „Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall – Teil 2: Hochtemperaturbedingungen“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall unter Hochtemperaturbedingungen. Drei- oder Vierpunkt-Biegeversuche gewährleisten die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die Umsetzung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dieser Norm trägt zur Bewertung der Leistung in Hochtemperaturumgebungen bei und bietet technischen Support für die Luft- und Raumfahrt, Hochtemperatur-Schneidwerkzeuge und andere Anwendungsbereiche.

Anhang:

ISO 4489:2010

Hartmetall

Bestimmungsmethode der Biegefestigkeit

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall fest, wobei ein Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuch verwendet wird, und ist anwendbar auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, NbC, VC). Diese Norm gilt für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall und wird häufig bei Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und anderen Anwendungsbereichen verwendet.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Biegefestigkeit: Die maximale Spannung, der eine Probe in einem Biegeversuch standhält, gemessen in MPa, spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, einem Bruch zu widerstehen.

Dreipunkt-Biegeversuch: Zwischen zwei Auflagepunkten wird ein einzelner Lastpunkt angelegt, um die maximale Spannung zu messen, bei der die Probe bricht.

Vierpunkt-Biegeversuch: Zwischen zwei Auflagepunkten werden zwei Belastungspunkte angelegt, um die maximale Spannung beim Bruch der Probe zu messen.

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

4. Bestimmungsprinzip

Die Bestimmung der Biegefestigkeit erfolgt durch einen Biegeversuch. Dabei wird eine Einzellast (Dreipunktmethode) oder eine gleichmäßig verteilte Last (Vierpunktmethode) auf die Probe aufgebracht und die maximale Spannung zum Zeitpunkt des Probenbruchs gemessen. Die Spannungsberechnung basiert auf der Probegeometrie und den Belastungsbedingungen nach folgender Formel:

Dreipunktbiegung:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Dabei ist  $\sigma$  die Biegefestigkeit (MPa), F die Bruchlast (N), L die Stützspanne (mm), b die Probenbreite (mm) und h die Probendicke (mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vierpunktbiegung:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

ist L1 die äußere Stützweite (mm) und L2 die innere Belastungsweite (mm).

## 5. Messgeräte

### 5.1 Prüfmaschine

Belastbarkeit: 0–50 kN , Genauigkeit  $\pm 1\%$ .

Ladegeschwindigkeit: 0,5–5 mm/min, einstellbar.

Ausgestattet mit Kraftsensor und Wegsensor mit Auflösung  $< 0,01\text{ N}$  und  $< 0,01\text{ mm}$ .

### 5.2 Vorrichtung

Dreipunkt-Biegevorrichtung: Auflagepunktradius 1–2 mm, Belastungspunktradius 1 mm.

Vierpunktbiegevorrichtung: äußerer Auflageabstand 20–40 mm, innerer Belastungsabstand 10–20 mm, Auflagepunktradius 1–2 mm.

Klemmmaterial: Gehärteter Stahl, Härte  $> \text{HRC } 60$ .

### 5.3 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5\text{ mm}$ , ausgestattet mit Kühlsystem.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, empfohlene Größe:  $20 \times 6,5 \times 5,25\text{ mm}$  ( Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe ), Toleranz  $\pm 0,1\text{ mm}$ .

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 10 betragen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Wenn die Standardabweichung der Ergebnisse >50 MPa ist, muss die Anzahl der Proben auf 15 erhöht werden.

### 6.3 Probenschneiden und Polieren

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von <0,1 mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit Ra < 0,1 µm .

Polieren: Verwenden Sie eine 0,25 µm Aluminiumoxid - Polierflüssigkeit, Oberflächenrauheit Ra <0,02 µm .

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 7 Messschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Belastungsgenauigkeit der Prüfmaschine, Abweichung <±1 %.

Kalibrieren Sie die Vorrichtung auf einen Zentrierfehler von <0,05 mm.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Platzieren Sie die Probe in einer Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegevorrichtung, wobei die Auflagepunkte mit den Belastungspunkten ausgerichtet sein müssen.

Stellen Sie die Ladegeschwindigkeit auf 1±0,5 mm/min ein.

Wenden Sie eine Last an, bis die Probe bricht, und zeichnen Sie die maximale Last F und die Bruchverschiebung auf.

Wiederholen Sie das Experiment 10–15 Mal und zeichnen Sie jeden Datensatz auf.

### 7.4 Ergebnisberechnung

Berechnen Sie die Biegefestigkeit σ jeder Probe gemäß der Formel in Abschnitt 4.

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dabei ist  $\sigma_i$  die Biegefestigkeit einer einzelnen Probe und  $n$  die Anzahl der Proben.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}}$$

Qualifikationsbeurteilung: durchschnittliche Abweichung der Biegefestigkeit  $< \pm 5 \%$ , Standardabweichung  $< 50$  MPa.

## 8 Auswertung der Messergebnisse

### 8.1 Biegefestigkeitsbereich

Der Biegefestigkeitsbereich von Hartmetall hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co): 2000–2500 MPa.

YG8 (8 % Co): 1800–2200 MPa.

YT15 (5 % Co + TiC) : 1300–1600 MPa.

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 10–15 Proben liegt bei  $< \pm 5 \%$  und die Standardabweichung bei  $< 50$  MPa, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt die Biegefestigkeit unter den technischen Anforderungen, müssen die Gründe dafür analysiert werden (z. B. Probenfehler und ungleichmäßige Belastung).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Oberflächenrauheiten  $> 0,02 \mu\text{m}$  oder Risse  $> 0,05 \text{ mm}$  können die Biegefestigkeit um 10–15 % reduzieren.

Ladebedingungen: Eine Ladegeschwindigkeit von  $> 5 \text{ mm/min}$  oder eine Fehlausrichtung der Vorrichtung von  $> 0,1 \text{ mm}$  kann zu einer Abweichung der Ergebnisse von 5–10 % führen.

Materialzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5 \%$  oder eine WC-Korngröße  $> 2 \mu\text{m}$  können die Festigkeitsgleichmäßigkeit beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe (20×6,5×5,25 mm).

Testbedingungen: Modell der Prüfmaschine, Vorrichtungstyp (Dreipunkt oder Vierpunkt), Belastungsgeschwindigkeit ( $1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$ ), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Prüfergebnisse: Biegefestigkeit, Mittelwert, Standardabweichung und Abweichung der einzelnen Proben.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Biegefestigkeit typischer Hartmetalle

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Biegefestigkeit ( MPa) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | 2000-2500              | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | 1800-2200              | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 1300-1600              | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 4489:2010 „Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall durch Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuche, um die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Umsetzung dieser Norm fördert die Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Teile.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

**ISO 4499-3:2016 Hartmetall  
— Mikrostrukturprüfung**

**Teil 3: Bewertung von Porosität, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und Eta-Phase**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Bewertungsmethode für Defekte wie Poren, Einschlüsse, freien Kohlenstoff und die  $\eta$ -Phase in der Mikrostruktur von Hartmetall fest und verwendet zur Klassifizierung metallografische Mikroskopbeobachtungen und Standardatlas. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Karbiden (wie TaC, TiC, NbC, VC). Diese Norm ist Teil der Normenreihe ISO 4499 und muss in Verbindung mit ISO 4499-1:2006 verwendet werden.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 1: Allgemeine Hinweise  
ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3850:2018 (neueste Version) und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Porosität: Poren oder Zwischenräume in einer Mikrostruktur, unterteilt in Typ A (Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$ ) und Typ B (Durchmesser  $10\text{--}25 \mu\text{m}$ ).

Einschlüsse: Nichtmetallische Verunreinigungen (wie Oxide und Sulfide), die in Form von Partikeln in Hartmetall vorkommen.

Freier Kohlenstoff: Kohlenstoff, der keine Verbindungen mit Metallen eingeht und in Form von Graphit vorliegt.

$\eta$ -Phase: Eine spröde Phase, die aufgrund eines unzureichenden Kohlenstoffgehalts entsteht, wie z. B.  $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$  oder  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ .

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

**4 Bewertungsgrundsätze**

Die Bewertung von Defekten in der Hartmetall-Mikrostruktur basiert auf der metallografischen Mikroskopbeobachtung in Kombination mit dem Standardatlas (Anhang A), um Art, Größe, Menge und Verteilung von Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und der  $\eta$ -Phase zu bestimmen. Die Bewertungsmethode besteht darin, hochwertige Proben vorzubereiten, diese im Hellfeld und polarisiertem Licht zu beobachten, die Defektmerkmale aufzuzeichnen und sie mit dem Standardatlas zu vergleichen, um den Defektgrad zu bestimmen.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 5. Bewertungsgeräte

### 5.1 Metallographisches Mikroskop

Vergrößerung: 100×, 200×, 500×, 200× wird für Routinebeobachtungen empfohlen.

Ausgestattet mit Hellfeld-, Dunkelfeld- und Polarisationslichtfunktionen zur Unterscheidung von Defektarten.

Auflösung: < 0,5 µm .

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite <0,5 mm, ausgestattet mit Kühlsystem.

Montagemaschine: Heißpressmontage, Temperatur <150°C, Druck 20-30 MPa.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, zum Reinigen von Proben.

### 5.3 Messwerkzeuge

Okularmikrometer: Teilungswert 0,01 mm, Genauigkeit ±0,001 mm.

Bildanalysesoftware: unterstützt Statistiken zu Defektflächen und -mengen mit einer Genauigkeit von ± 0,1 µm .

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe: 10×10× 5 mm.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen (>1 Stufe) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Zuschneiden und Einbetten der Proben

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von <0,1 mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Heißpressmontage, Temperatur  $<150^{\circ}\text{C}$ , Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min.

#### 6.4 Schleifen und Polieren von Proben

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie  $0,25\text{ }\mu\text{m}$  Aluminiumoxid-Polierpaste, Poliertuchgeschwindigkeit 300 U/min, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02\text{ }\mu\text{m}$ .

#### 6.5 Probenreinigung und Ätzen

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen wird mit Murakami -Reagenz ( $10\text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10\text{ g KOH} + 100\text{ ml H}_2\text{O}$ ) 5–10 s lang vorsichtig geätzt, um den Defektkontrast zu erhöhen.

Nochmals waschen und trocknen und im Trockner aufbewahren.

### 7 Bewertungsschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Vergrößerung des metallografischen Mikroskops mit einer Abweichung von  $<\pm 1\%$ .

Kalibrieren Sie das Beleuchtungssystem, um eine gleichmäßige Lichtquelle ohne Farbunterschiede sicherzustellen.

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^{\circ}\text{C}$  bis  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 7.3 Mikroskopische Beobachtung

Legen Sie die Probe auf den Objektstisch des metallografischen Mikroskops, stellen Sie den Fokus ein und wählen Sie die 200-fache Vergrößerung.

Beobachten Sie die Probenoberfläche in mindestens 5 Sichtfeldern mit einer Feldfläche von ca.  $0,5\text{ mm}^2$ .

Zur Beobachtung von Poren und Einschlüssen wurde Hellfeld verwendet, zur Beobachtung von freiem Kohlenstoff und der  $\eta$ -Phase polarisiertes Licht.

#### 7.4 Mängelbewertung

Porositätsbewertung:

Poren vom Typ A ( $<10\text{ }\mu\text{m}$ )

A00 (keine Poren), A02 ( $<10\text{ Stück/mm}^2$ ), A04 (10–20 Stück/ $\text{mm}^2$ ), A06 (20–30 Stück/ $\text{mm}^2$ ), A08 ( $>30\text{ Stück/mm}^2$ ).

Poren vom Typ B ( $10\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

B00 (keine Poren), B02 (<5 Stück/mm<sup>2</sup>), B04 (5-10 Stück/mm<sup>2</sup>), B06 (10-15 Stück/mm<sup>2</sup>), B08 (>15 Stück/mm<sup>2</sup>).

Inklusionsbewertung

I00 (keine Einschlüsse), I02 (<5 Stück/mm<sup>2</sup>, <10 µm), I04 (5-10 Stück/mm<sup>2</sup>, 10-20 µm), I06 (>10 Stück/mm<sup>2</sup>, >20 µm).

Kostenlose CO<sub>2</sub>-Bewertung

C00 (kein freier Kohlenstoff), C02 (<0,5 %), C04 (0,5 % – 1,0 %), C06 (1,0 % – 1,5 %), C08 (> 1,5 %).

η-Phasenbewertung

eta00 (keine Eta-Phase), eta02 (<0,5 %), eta04 (0,5 %–1,0 %), eta06 (1,0 %–1,5 %), eta08 (>1,5 %).

## 7.5 Ergebnisberechnung

Zeichnen Sie die Defektgrade von 5 Sichtfeldern auf, berechnen Sie den Durchschnittswert und bestimmen Sie den endgültigen Defektgrad der Probe.

Abweichungsbeurteilung: Die Gradabweichung der 5 Gesichtsfelder beträgt  $\leq \pm 1$  Stufe, ansonsten ist eine Nachbeobachtung erforderlich.

## 8 Auswertung der Evaluationsergebnisse

### 8.1 Fehlergradbereich

Der Grad der Hartmetalldefekte hängt von der Sorte und dem Verwendungszweck ab:

YG6 (6 % Co): A02-B02-I02-C02-η02, geeignet für Bohrmeißel im Bergbau.

YG8 (8 % Co): A04-B04-I02-C04-η02, geeignet für Schneidwerkzeuge.

YT15 (5 % Co + TiC) : A02-B02-I04-C02-η04, geeignet für Schlichtwerkzeuge.

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben ist  $\leq \pm 1$  Stufe, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der Defektgrad die technischen Anforderungen überschreitet, muss die Ursache analysiert werden (z. B. ein abnormaler Sinterprozess).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Porosität: Unzureichendes Sintervakuum (<10 Pa) oder zu hohe Abkühlgeschwindigkeit (>50°C/min) führt zu erhöhter Porosität (>A04).

Einschlüsse: Eine geringe Reinheit des Rohstoffs (Verunreinigungen > 0,1 %) oder eine ungleichmäßige Mischung führen zu vermehrten Einschlüssen (> I04).

Freier Kohlenstoff: Ein zu hoher Kohlenstoffgehalt (>0,2%) oder eine ungleichmäßige Verteilung führt zu einem Anstieg des freien Kohlenstoffs (>C04).

η-Phase: Unzureichender Kohlenstoffgehalt (<0,1 %) oder hohe Sintertemperatur (>1450 °C) führt zur Bildung der η-Phase (>η04).

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Vergrößerung (200×), Beobachtungsmethode, Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Prüfergebnisse: Fehlergrad (A, B, I, C,  $\eta$ ), Mittelwert und Abweichung für jedes Sichtfeld.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Normativer Anhang) Standard-Defektatlas

Poren vom Typ A: A00–A08, das Spektrum zeigt die Verteilung der Poren mit einem Durchmesser von  $< 10 \mu\text{m}$ .

Porentyp B: B00–B08, das Spektrum zeigt die Verteilung der Poren mit einem Durchmesser von  $10\text{--}25 \mu\text{m}$ .

Einschlüsse: I00–I06, die Grafik zeigt die Größe und Menge der Einschlüsse.

Freier Kohlenstoff: C00–C08, die Grafik zeigt den Flächenanteil von freiem Kohlenstoff.

$\eta$ -Phase:  $\eta$ 00– $\eta$ 08, das Spektrum zeigt das Flächenverhältnis der  $\eta$ -Phase.

#### Anhang B (Informativer Anhang) Referenzwerte für typische Defektgrade bei Hartmetall

| Marke | Co-Gehalt (Gew.-%) | Fehlerstufe                | Typische Anwendungen         |
|-------|--------------------|----------------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                  | A02-B02-I02-C02- $\eta$ 02 | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                  | A04-B04-I02-C04- $\eta$ 02 | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                  | A02-B02-I04-C02- $\eta$ 04 | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}70\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $< 0,02\text{ mm/m}$ .

#### Zusammenfassen

ISO 4499-3:2016 „Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 3: Bewertung von Porosität, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und  $\eta$ -Phase“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bewertung von Defekten in der Mikrostruktur von Hartmetall. Es gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch metallografische Mikroskopbeobachtung und Standard-Atlas-Klassifizierung. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle von Hartmetall und bietet technischen Support für Hochleistungsanwendungen wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

**ISO 4499-2:2008 Hartmetall**

**— Mikrostrukturprüfung**

**Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Korngröße**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Korngröße von Wolframkarbid (WC) in Hartmetall-Mikrostrukturen fest. Zur Bestimmung wird ein metallografisches Mikroskop in Kombination mit einem linearen oder einem planaren Schnittverfahren verwendet. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetallen mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC). Diese Norm gilt nicht für Hartmetalle auf Nichtkobaltbasis oder andere nicht-Hartmetallwerkstoffe.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 1: Allgemeine Hinweise

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:1983 Hartmetall-Terminologie

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3850:1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

**Korngröße:** Der durchschnittliche Durchmesser von Wolframkarbidkörnern (WC) in Hartmetall, üblicherweise in Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) gemessen.

**Methode des linearen Querschnitts:** Die durchschnittliche Korngröße wird berechnet, indem der Querschnittsdurchmesser der WC-Körner auf einer geraden Linie im Sichtfeld des Mikroskops gemessen wird.

**Methode des geplanten Abschnitts:** Die durchschnittliche Korngröße wird berechnet, indem die Querschnittsfläche mehrerer WC-Körner im Sichtfeld des Mikroskops gemessen wird.

**Hartmetall:** Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

**4. Bestimmungsprinzip**

Die Bestimmung der WC-Karbidkorngröße basiert auf der metallografischen Mikroskopbeobachtung in Kombination mit dem Linearschliffverfahren oder dem Planschliffverfahren. Das Linearschliffverfahren misst den Querschnittsdurchmesser der Körner auf einer Geraden im Mikroskop-Sichtfeld und berechnet statistisch den Durchschnittswert. Das Planschliffverfahren misst die Querschnittsfläche der Körner und schätzt die durchschnittliche Korngröße in Kombination mit einem geometrischen Modell. Beide Verfahren erfordern die Vorbereitung hochwertiger Proben, um sicherzustellen, dass die Oberfläche eben und frei von Verunreinigungen ist, gemäß den allgemeinen Richtlinien der ISO 4499-1:2006.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## 5. Messgeräte

### 5.1 Metallographisches Mikroskop

Vergrößerung: 200×, 500×, 1000×, 500× wird zur Korngrößenbestimmung empfohlen.

Ausgestattet mit polarisiertem Licht und differentiell Interferenzkontrast (DIC) zur Unterscheidung von WC-Korngrenzen.

Auflösung:  $< 0,2 \mu\text{m}$ .

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5 \text{ mm}$ , ausgestattet mit Kühlsystem.

Montagemaschine: Heißpressmontage, Temperatur  $< 150^\circ\text{C}$ , Druck 20-30 MPa.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, zum Reinigen von Proben.

### 5.3 Messwerkzeuge

Mikrometer für Mikroskop-Okular: Teilungswert 0,01 mm, Genauigkeit  $\pm 0,001 \text{ mm}$ .

Bildanalysesoftware: unterstützt Korngrenzenerkennung und Flächenberechnung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ .

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe:  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ .

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 0,5 \mu\text{m}$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Zuschneiden und Einbetten der Proben

Die Proben wurden mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittbreite von  $< 0,5 \text{ mm}$  und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel geschnitten.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Heißpressmontage, Temperatur <150°C, Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min.

#### 6.4 Schleifen und Polieren von Proben

Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie  $0,25 \mu\text{m}$  Aluminiumoxid-Polierpaste, Poliertuchgeschwindigkeit 300 U/min, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ .

#### 6.5 Probenreinigung und Ätzen

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen wurde die Oberfläche mit Murakami -Reagenz ( $10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$ ) 5–10 s lang leicht geätzt, um den Kontrast der WC-Korngrenzen zu erhöhen. Waschen und trocknen, im Exsikkator aufbewahren.

### 7 Messschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Vergrößerung des metallografischen Mikroskops mit einer Abweichung von  $< \pm 1 \%$ .

die Bildanalysesoftware auf eine Genauigkeit von  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ .

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 7.3 Korngrößenbestimmung

Lineare Schnittmethode:

Zeichnen Sie 3-5 parallele gerade Linien in das Sichtfeld des Mikroskops mit einer Gesamtlänge von  $\geq 500 \mu\text{m}$ .

Der Querschnittsdurchmesser der WC-Körner auf jeder geraden Linie wurde gemessen und 100–200 Körner wurden gezählt.

Berechnen Sie die durchschnittliche Korngröße:

$$d = \frac{\sum d_i}{n}$$

Dabei ist  $d_i$  der Durchmesser eines einzelnen Korns und  $n$  die Anzahl der Körner.

Geplante Querschnittsmethode:

Im Sichtfeld des Mikroskops wurden fünf Bereiche zufällig ausgewählt und die Querschnittsflächen von 100–200 Körnern gemessen.

Verwenden Sie eine Bildanalysesoftware, um die durchschnittliche Fläche zu berechnen und in den

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entsprechenden Durchmesser umzurechnen:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Unter ihnen A A A ist die Querschnittsfläche des Kornes.

Die durchschnittliche Korngröße jeder Probe wurde mit einer Abweichung von  $\leq \pm 0,2 \mu\text{m}$  erfasst.

#### 7.4 Berechnung der Ergebnisse

Nehmen Sie die durchschnittliche Korngröße von 3–5 Proben und berechnen Sie die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

Qualifikationsbeurteilung: durchschnittliche Korngrößenabweichung  $\leq \pm 0,5 \mu\text{m}$ ,  
Standardabweichung  $< 0,3 \mu\text{m}$ .

### 8 Auswertung der Messergebnisse

#### 8.1 Korngrößenbereich

Der Korngrößenbereich von Hartmetall WC hängt von der Sorte ab:

YG6 (6 % Co):  $0,8\text{--}1,2 \mu\text{m}$ , geeignet für Werkzeuge mit hoher Zähigkeit.

YG8 (8 % Co):  $1,0\text{--}1,5 \mu\text{m}$ , zum Schneiden geeignet.

YT15 (5 % Co + TiC):  $0,6\text{--}1,0 \mu\text{m}$ , geeignet für Schlichtwerkzeuge.

#### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben ist  $\leq \pm 0,5 \mu\text{m}$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Übersteigt die Korngröße die technischen Anforderungen, müssen die Gründe analysiert werden (z. B. ungleichmäßige Partikelgröße des Rohmaterials, zu hohe Sintertemperatur).

#### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Rohstoffpartikelgröße: Bei WC-Rohstoffpartikelgrößen  $> 2 \mu\text{m}$  kann es zu größeren Korngrößen ( $> 1,5 \mu\text{m}$ ) kommen.

Sintertemperatur: Bei Temperaturen  $> 1450^\circ\text{C}$  oder Haltezeiten  $> 1 \text{ h}$  kann es zu Kornwachstum ( $> 0,5 \mu\text{m}$ ) kommen.

Abkühlrate: Abkühlraten  $< 20^\circ\text{C}/\text{min}$  können zu einer Kornvergrößerung ( $> 0,3 \mu\text{m}$ ) führen.

Co-Gehalt: Eine Schwankung des Co-Gehalts  $> \pm 0,5 \%$  kann die Gleichmäßigkeit des Kornwachstums beeinträchtigen.

### 9 Testbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Vergrößerung ( $500\times$ ), Messmethode (linear oder planmäßig),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: Korngröße, Mittelwert, Standardabweichung und Variation für jede Probe.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte typischer Hartmetallkorngrößen

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Korngröße ( $\mu\text{m}$ ) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | 0,8-1,2                     | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | 1,0-1,5                     | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 0,6-1,0                     | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandesebenheit: Abweichung  $<0,02$  mm/m.

#### Zusammenfassen

ISO 4499-2:2008 „Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Korngröße“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Korngröße von Hartmetall (WC) und gewährleistet die Genauigkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse durch das lineare oder das planare Schnittverfahren. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Optimierung der Leistung von Hartmetallwerkstoffen bei und bietet technischen Support für Hochleistungsanwendungen wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

**ISO 4499-1:2006 Hartmetall**  
**— Mikrostrukturprüfung**  
**Teil 1: Allgemeine Richtlinien**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm enthält allgemeine Richtlinien für die Mikrostrukturprüfung von Hartmetall, einschließlich der Grundlagen der Probenvorbereitung, mikroskopischer Beobachtungsmethoden und der Fehlerbewertung. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindungsphase, einschließlich Hartmetall mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC). Diese Norm ist die Grundlage der Normenreihe ISO 4499. Detaillierte Messmethoden (wie Korngröße, Fehlerbewertung) werden in nachfolgenden Teilen (wie ISO 4499-2) festgelegt.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

ISO 3850:1983 Hartmetall-Terminologie

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3850:1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

**Mikrostruktur:** Die Mikrostruktur von Hartmetall unter vergrößerter Betrachtung, einschließlich WC-Körner, Co-Bindungsphase und Defekte.

**Defekte:** Abnormale Merkmale in der Mikrostruktur wie Poren, Einschlüsse, freier Kohlenstoff und Eta-Phase.

**Metallografische Probe:** Hartmetallprobe, die durch Schneiden, Schleifen, Polieren und Ätzen für die mikroskopische Betrachtung vorbereitet wurde.

**Hartmetall:** Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

**4 Prüfprinzip**

Die Mikrostrukturprüfung von Hartmetall basiert auf metallografischer Mikroskopie, kombiniert mit Probenvorbereitung und geeigneter Ätztechnik, um die Verteilung und Morphologie von WC-Körnern, Co-Phasen und Defekten aufzudecken. Der Prüfprozess umfasst Probenvorbereitung, mikroskopische Beobachtung und Ergebnisaufzeichnung nach standardisierten Verfahren, um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Spezifische Methoden wie die Defektbewertung und Korngrößenbestimmung werden in nachfolgenden Normen detailliert beschrieben.

**5. Inspektionsausrüstung**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.1 Metallographisches Mikroskop

Vergrößerung: 50×, 100×, 200×, 500×, 200× wird für Routinebeobachtungen empfohlen.

Ausgestattet mit Hellfeld-, Dunkelfeld- und Polarisationslichtfunktionen zur Unterscheidung verschiedener Phasen und Defekte.

Auflösung: < 0,5 µm .

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite <0,5 mm, ausgestattet mit Kühlsystem.

Montagemaschine: Heißpressmontage, Temperatur <150°C, Druck 20-30 MPa.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, zum Reinigen von Proben.

### 5.3 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit ±0,02 mm, wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Okularmikrometer: Teilungswert 0,01 mm, Genauigkeit ±0,001 mm.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe: 10×10× 5 mm.

Die Oberfläche der Probe sollte eben und frei von Rissen, Kratzern oder Oxidschichten sein.

Die Proben müssen gemäß ISO 3847:2005 hergestellt werden.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Abweichungen der Ergebnisse muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Zuschneiden und Einbetten der Proben

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einem langsam laufenden Präzisionsschneider mit einer Schnittbreite von <0,5 mm und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Heißpressmontage, Temperatur <150°C, Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min.

### 6.4 Schleifen und Polieren von Proben

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Grobschliff: Verwenden Sie 600#- oder 1200#-Diamantschleifpapier, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,1 \mu m$ .

Polieren: Verwenden Sie  $0,25 \mu m$  Aluminiumoxid-Polierpaste, Poliertuchgeschwindigkeit 300 U/min, Oberflächenrauheit  $Ra < 0,02 \mu m$ .

## 6.5 Probenreinigung und Ätzen

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen wurde die Oberfläche mit Murakami -Reagenz ( $10 g K_3 [Fe(CN)_6] + 10 g KOH + 100 ml H_2O$ ) 5–10 s lang leicht geätzt, um die WC-Körner und den Phasenkontrast zu verstärken.

Nochmals waschen und trocknen und im Trockner aufbewahren.

## 7 Inspektionsschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Vergrößerung des metallografischen Mikroskops mit einer Abweichung von  $< \pm 1 \%$ .

Kalibrieren Sie das Beleuchtungssystem, um eine gleichmäßige Lichtquelle ohne Farbunterschiede sicherzustellen.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ C$  bis  $35^\circ C$ ,  $20 \pm 2^\circ C$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Mikroskopische Beobachtung

Legen Sie die Probe auf den Objekttisch des metallografischen Mikroskops, stellen Sie den Fokus ein und wählen Sie die 200-fache Vergrößerung.

Beobachten Sie die Probenoberfläche in mindestens 5 Sichtfeldern mit einer Feldfläche von ca.  $0,5 mm^2$ .

Zur Beobachtung der WC-Körner und der Co-Phase wurde ein Hellfeld verwendet, zur Beobachtung von Defekten (wie etwa freiem Kohlenstoff) wurde polarisiertes Licht eingesetzt.

### 7.4 Ergebniserfassung

Die mikrostrukturellen Eigenschaften jedes Sichtfelds, einschließlich WC-Korngröße, Co-Phasenverteilung und Defektarten, wurden aufgezeichnet.

Machen Sie Mikrofotografien (Auflösung  $\geq 5 MP$ ) zur anschließenden Analyse und Berichterstattung.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.1 Spektrum mikrostruktureller Eigenschaften

WC-Korngröße: 0,5–2,0 µm (je nach Sorte).

Co-Phasengehalt: 5–15 % (Gewichtsprozent).

Defekte: Die Konzentrationen an Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und η-Phase müssen den technischen Anforderungen entsprechen (siehe ISO 4499-2).

### 8.2 Abweichungsbewertung

Die Konsistenzabweichung der mikrostrukturellen Eigenschaften der 5 Sichtfelder betrug  $\leq \pm 10\%$ , andernfalls war eine erneute Beobachtung erforderlich.

Wenn die Mikrostruktur die technischen Anforderungen überschreitet, müssen die Gründe analysiert werden (z. B. abnormale Parameter des Sinterprozesses).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenvorbereitung: Unzureichendes Polieren ( $R_a > 0,1 \mu m$ ) oder übermäßiges Ätzen kann Defekte verdecken.

Beobachtungsbedingungen: Eine ungleichmäßige Lichtquelle oder eine falsche Vergrößerung können dazu führen, dass Korngrenzen unscharf werden.

Werkstoffzusammensetzung: Schwankungen des Co-Gehalts  $> \pm 0,5\%$  oder ein unkontrollierter Kohlenstoffgehalt können die Mikrostruktur beeinträchtigen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Vergrößerung (200×), Beobachtungsmethode, Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: mikrostrukturelle Charakterisierung, fotografische Aufzeichnungen und vorläufige Defektbeobachtungen.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die vorläufigen technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Mikrostruktureigenschaften typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.- %) | WC-Korngröße ( µm ) | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|---------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | 0,8-1,2             | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | 1,0-1,5             | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | 0,6-1,0             | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### **Zusammenfassen**

ISO 4499-1:2006 „Hartmetall – Mikrostrukturprüfung, Teil 1: Allgemeine Richtlinien“ bietet einen internationalen Rahmen für die Prüfung der Mikrostruktur von Hartmetall und gewährleistet die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung und Beobachtungsmethoden. Die Umsetzung dieser Norm legt den Grundstein für nachfolgende spezifische Messungen (z. B. Korngröße, Defektbewertung) und unterstützt die Leistungsoptimierung und Qualitätskontrolle von Hartmetallmaterialien.

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

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

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

Anhang:

**ISO 3847:2005 Hartmetall  
Probenvorbereitungsmethode**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Herstellungsverfahren für Hartmetallproben fest, einschließlich Schneiden, Einlegen, Schleifen, Polieren und Reinigen, und eignet sich für anschließende Leistungsprüfungen (wie Biegefestigkeit, Härte) oder Mikrostrukturprüfungen. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindungsphase, einschließlich Hartmetallen mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC). Diese Norm gilt nicht für Hartmetalle auf Nichtkobaltbasis oder andere nicht auf Hartmetall basierende Werkstoffe.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für die mit Datum referenzierten Dokumente gilt die Version dieses Datums; für die ohne Datum referenzierten Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3850:1983 Hartmetall-Terminologie

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3850:1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Testprobe: Eine durch Schneiden und Bearbeiten hergestellte Probe aus Hartmetall für Leistungstests oder die mikroskopische Beobachtung.

Montage: Betten Sie die Probe in Harz oder Metall ein, um das anschließende Schleifen, Polieren und Beobachten zu erleichtern.

Schleifen und Polieren: Entfernen Sie Oberflächenfehler der Probe durch Schleifen und Polieren, um eine glatte Oberfläche zu erhalten.

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

**4 Zubereitungsprinzip**

Die Vorbereitung von Hartmetallproben zielt darauf ab, eine ebene, unbeschädigte Oberfläche zu erhalten, die für die anschließende Prüfung oder mikroskopische Betrachtung geeignet ist. Der Vorbereitungsprozess umfasst das Zuschneiden der Probe auf die passende Größe, die Montage zum Schutz der Kanten, das Schleifen und Polieren zur Beseitigung von Oberflächenfehlern und die Reinigung zur Entfernung von Rückständen. Die Vorbereitungsmethode muss sicherstellen, dass die Probe keine mikrostrukturellen Veränderungen durch thermische oder mechanische Belastung erfährt.

**5. Vorbereitungsgeräte**

**5.1 Schneidausrüstung**

Präzisionsschneidemaschine mit niedriger Geschwindigkeit: Schnittbreite < 0,5 mm, ausgestattet

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

mit Kühlsystem (z. B. Wasser oder Ethanol).

Schneidrad: Partikelgröße 120–240 #, Dicke 0,5–1,0 mm.

## 5.2 Montageausrüstung

Heißpress-Montagemaschine: Temperatur <150°C, Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min.

Harz- oder Metalleinlagematerialien: thermoplastische Harze (wie Phenolharze) oder Metalle mit niedrigem Schmelzpunkt (wie Zinn-Blei-Legierungen).

## 5.3 Schleif- und Poliergeräte

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit 600#, 1200#, 2500# Diamantschleifpapier und Poliertuch.

Polierflüssigkeit: 0,25 µm Aluminiumoxid-Suspension oder 1 µm Diamant-Polierpaste.

## 5.4 Reinigungsgeräte

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, Leistung 100–200 W.

Reinigungsmittel: wasserfreies Ethanol oder Aceton.

## 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe ist 10 × 10 × 5 mm oder 10 mm Durchmesser und 5 mm Höhe.

Auf der Oberfläche der Probe dürfen keine offensichtlichen Risse, Verbrennungen oder Oxidschichten vorhanden sein.

Die Prüfkörper sollten repräsentativ für die Homogenität der Materialcharge sein.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

5 erhöht werden .

### 6.3 Probenzuschnitt

Das Schneiden der Proben erfolgte mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von <0,1 mm/s und Ethanol oder Wasser als Kühlmittel.

Die Schnittrichtung ist senkrecht zur Materialkaschierungsoberfläche und die Schnittbreite beträgt <0,5 mm.

### 6.4 Probenmontage

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Die Probe wird in eine Einlegeform gelegt und mit thermoplastischem Harz oder niedrigschmelzendem Metall versetzt.

Heißpressmontage, Temperatur  $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min. Stellen Sie sicher, dass die Probenkante intakt ist.

### 6.5 Schleifen und Polieren von Proben

Grobschliff: Mit 600# oder 1200# Diamantschleifpapier die Schnittspuren nach und nach entfernen und dabei einen Druck von 5-10 N anwenden.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 2500, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie eine  $0,25\text{ }\mu\text{m}$  Aluminiumoxid -Polierflüssigkeit, Poliertuchgeschwindigkeit 300 U/min, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,02\text{ }\mu\text{m}$ , Polierzeit 5–10 Min.

### 6.6 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

---

## 7 Vorbereitungsschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Geschwindigkeit der Schneidemaschine, die Abweichung beträgt  $<\pm 5\%$ .

Kalibrieren Sie die Geschwindigkeit und den Druck der Schleif- und Poliermaschine mit einer Abweichung von  $<\pm 2\%$ .

Temperatur und Druck der Montagemaschine prüfen, Abweichung  $<\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $\pm 1\text{ MPa}$ .

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Betriebsablauf

Führen Sie das Schneiden, Montieren, Schleifen, Polieren und Reinigen der Probe in der Reihenfolge der Abschnitte 6.3–6.6 durch.

Überprüfen Sie nach jedem Schritt die Oberflächenqualität der Probe und dokumentieren Sie etwaige Auffälligkeiten (wie Risse, Verbrennungen).

### 7.4 Ergebniskontrolle

Oberflächenrauheit:  $R_a < 0,02\text{ }\mu\text{m}$ .

Oberflächenebenheit: Abweichung  $< 0,01\text{ mm}$ .

Keine sichtbaren Kratzer oder Verunreinigungen.

---

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8 Auswertung der Präparationsergebnisse

### 8.1 Oberflächenqualitätsbereich

Auf der Oberfläche der Probe dürfen keine sichtbaren Risse, Brandflecken oder Oxidschichten vorhanden sein.

Rauheit  $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ , Ebenheitsabweichung  $< 0,01 \text{ mm}$ .

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben liegt bei  $\pm 10 \%$ , andernfalls ist eine erneute Vorbereitung erforderlich.

Wenn die Oberflächenqualität nicht den Anforderungen entspricht, müssen die Gründe analysiert werden (z. B. zu hohe Schnittgeschwindigkeit, unzureichende Polierzeit).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Schneiden: Bei Schnittgeschwindigkeiten  $> 0,1 \text{ mm/s}$  oder unzureichender Kühlung kann es zu Rissen ( $> 0,05 \text{ mm}$ ) kommen.

Montage: Temperaturen  $> 150^\circ\text{C}$  oder Drücke  $< 20 \text{ MPa}$  können zu einer Verformung der Probe ( $> 0,1 \text{ mm}$ ) führen.

Schleifen und Polieren: Zu grobkörniges Schleifpapier ( $< 600\#$ ) oder eine Polierzeit von  $< 5 \text{ Min.}$  können zu Oberflächenrauheiten ( $R_a > 0,1 \mu\text{m}$ ) führen.

Reinigung: Durch Reinigungsmittelrückstände oder unzureichende Trocknung kann es zu Verunreinigungen (sichtbare Partikel  $> 0,01 \text{ mm}$ ) kommen.

## 9. Bericht vorbereiten

Der Bericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Ausgangsgröße.

Vorbereitungsbedingungen: Gerätemodell, Schnittgeschwindigkeit ( $< 0,1 \text{ mm/s}$ ), Montagetemperatur ( $< 150^\circ\text{C}$ ), Schleif- und Polierparameter, Umgebungstemperatur ( $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $30\% - 70\%$ ).

Vorbereitungsergebnisse: Oberflächenrauheit ( $R_a < 0,02 \mu\text{m}$ ), Ebenheitsabweichung ( $< 0,01 \text{ mm}$ ), abnormale Aufzeichnungen.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den Anforderungen nachfolgender Tests entspricht.

Herstellungsdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte typischer Parameter zur Herstellung von Hartmetallproben

| Marke | Co-Gehalt<br>(Gew.-%) | Probengröße<br>(mm) | Oberflächenrauheit ( $R_a$ , $\mu\text{m}$ ) | Typische Anwendungen            |
|-------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                     | 10×10×5             | $< 0,02$                                     | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                     | 10×10×5             | $< 0,02$                                     | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                     | 10×10×5             | $< 0,02$                                     | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $<0,02$  mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 3847:2005 „Verfahren zur Probenvorbereitung von Hartmetall“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Probenvorbereitung von Hartmetall. Durch standardisierte Schneid-, Einbettungs-, Schleif-, Polier- und Reinigungsschritte wird sichergestellt, dass die Oberflächenqualität der Probe den Anforderungen nachfolgender Leistungsprüfungen oder der Mikrostrukturprüfung entspricht. Die Umsetzung dieser Norm bietet eine zuverlässige technische Grundlage für die Leistungsbewertung und Qualitätskontrolle von Hartmetallwerkstoffen.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

**Anhang:**

**ISO 3850:2018 Hartmetall  
der Begriff**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm definiert die Begriffe und Definitionen von Hartmetall und verwandten Werkstoffen und umfasst Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Mikrostruktur, Leistungsprüfung und Anwendungsbereiche. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Eisen (Fe) als Bindungsphase, einschließlich Hartmetall mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, NbC, VC). Diese Norm ist die Grundlage der Hartmetall-Normungsreihen (wie ISO 4499, ISO 3847) und eignet sich für den internationalen Handel, die Forschung und industrielle Anwendungen.

**2 Normative Verweisungen**

Diese Norm verweist nicht direkt auf andere Normen, ist aber als Teil der Hartmetall-Normenreihe mit den folgenden Normen verbunden:

ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 1: Allgemeine Hinweise

ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

Hinweis: Für diesen Standard gelten die neuesten Versionen der referenzierten Dokumente (einschließlich aller Änderungen).

**3 Begriffe und Definitionen**

Im Folgenden sind die in ISO 3850:2018 definierten, hartmetallbezogenen Begriffe aufgeführt, sortiert nach Kategorien:

**3.1 Materialzusammensetzung**

**3.1.1 Hartphase**

Wolframkarbid (WC): Karbid, der wichtigste harte Bestandteil von Hartmetall, hat die chemische Formel WC und weist eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit auf.

Andere Carbide, wie Tantalkarbid (TaC), Titankarbid (TiC), Niobkarbid (NbC) und Vanadiumkarbid (VC), werden als Hilfskomponenten der Hartphase verwendet.

**3.1.2 Bindungsphase**

Kobalt (Co): Ein häufig verwendetes Bindemetall in Hartmetall mit einem Phasengehalt von üblicherweise 5–15 % (nach Gewicht), das für Zähigkeit und Bindefestigkeit sorgt.

Nickel (Ni): Als Bindephasen-Ersatzmetall eignet es sich für korrosionsbeständige Umgebungen.

Eisen (Fe): Eine in geringen Mengen vorhandene Bindephasenkomponente, die häufig als Legierungselement verwendet wird.

**3.1.3 Verunreinigungen**

Freier Kohlenstoff: Kohlenstoff, der keine Verbindungen mit Metallen eingeht und in Form von Graphit vorliegt.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



$\eta$ -Phase: Eine spröde Phase, die aufgrund eines unzureichenden Kohlenstoffgehalts entsteht, wie z. B.  $W_3Co_3C$  oder  $Co_6W_6C$ .

### 3.2 Vorbereitungsprozess

#### 3.2.1 Pulvermetallurgie

Der Herstellungsprozess von Hartmetall erfolgt durch Mischen, Pressen und Sintern von Pulvern.

#### 3.2.2 Sintern

Der Prozess der Verbindung von Pulverpartikeln bei hohen Temperaturen ( $1300\text{ }^{\circ}\text{C} - 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kann in Vakuumsintern und Niedertemperatursintern unterteilt werden.

#### 3.2.3 Heißisostatisches Pressen (HIP)

Anschließender Behandlungsprozess zur Beseitigung der Porosität bei hoher Temperatur und hohem Druck.

### 3.3 Mikrostruktur

#### 3.3.1 Getreide

Die mikroskopischen WC-Partikel im Hartmetall haben üblicherweise eine Größe von  $0,5-5,0\text{ }\mu\text{m}$ .

#### 3.3.2 Porosität

Die Poren bzw. Hohlräume in der Mikrostruktur werden in Typ A ( $<10\text{ }\mu\text{m}$ ) und Typ B ( $10-25\text{ }\mu\text{m}$ ) unterteilt.

#### 3.3.3 Einschlüsse

Nichtmetallische Verunreinigungen (wie Oxide und Sulfide) liegen in Form von Partikeln vor.

### 3.4 Leistungstests

#### 3.4.1 Biegefestigkeit

Die maximale Spannung, der die Probe in einem Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuch standhalten kann, in MPa.

#### 3.4.2 Härte

Der Eindringwiderstand von Hartmetall wird üblicherweise in der Rockwellhärte (HRA) oder Vickershärte (HV) ausgedrückt.

#### 3.4.3 Bruchzähigkeit

Die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Risswachstum wird durch den Spannungsintensitätsfaktor  $K_{IC}$  mit der Einheit  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ausgedrückt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.5 Anwendungsgebiete

#### 3.5.1 Schneidwerkzeuge

Hartmetall wird in Schneidwerkzeugen zur Bearbeitung von Metall, Holz oder Verbundwerkstoffen verwendet.

#### 3.5.2 Verschleißteile

Beispielsweise sind Bohrer und Stanzwerkzeuge für den Bergbau auf die hohe Verschleißfestigkeit von Hartmetall angewiesen.

#### 3.5.3 Militärische Anwendungen

Aus Hartmetall werden panzerbrechende Kerne oder Panzerungsmaterialien hergestellt.

### 4 Grundsätze der Terminologieverwendung

Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, sollte die Terminologie in relevanten Normen oder technischen Dokumenten einheitlich sein.

Symbole und Einheiten folgen dem Internationalen Einheitensystem (SI), beispielsweise  $\mu\text{m}$  (Mikrometer), MPa (Megapascal).

Bei der Definition von Begriffen sind vorrangig Standardbegriffe zu verwenden. Fehlen entsprechende Definitionen, kann auf Branchenpraktiken zurückgegriffen werden.

### 5 Terminologiebeispiele

Im Folgenden finden Sie einige Beispiele für die Verwendung einiger dieser Begriffe in der Praxis:  
Korngröße: Die WC-Korngröße von Hartmetall der Güteklasse YG6 beträgt 0,8–1,2  $\mu\text{m}$ .

Sintertemperatur: Die typische Sintertemperatur von Hartmetall der Güteklasse YT15 beträgt 1400–1450 °C.

Biegefestigkeit: Die Biegefestigkeit von Hartmetall der Güteklasse YG8 liegt zwischen 1800 und 2200 MPa.

### Anhang A (Informativer Anhang) Typische Hartmetall-Terminologie Anwendung Referenzwerte

| Marke | Co-Gehalt<br>(Gew.-%) | Korngröße<br>( $\mu\text{m}$ ) | Biegefestigkeit<br>(MPa) | Typische Anwendungen            |
|-------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                     | 0,8-1,2                        | 2000-2500                | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                     | 1,0-1,5                        | 1800-2200                | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                     | 0,6-1,0                        | 1300-1600                | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Terminologieentwicklungsgeschichte

Die ISO 3850 wurde erstmals im Jahr 1983 veröffentlicht und definiert im Wesentlichen die Grundbegriffe des Hartmetalls.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Überarbeitung von 2018 aktualisierte die Definition der Bindungsphase (Ni und Fe hinzugefügt), fügte Begriffe für militärische Anwendungen hinzu und optimierte die Beschreibung des Vorbereitungsprozesses.

### **Zusammenfassen**

ISO 3850:2018 „Terminologie für Hartmetall“ bietet eine einheitliche terminologische Grundlage für die internationale Normung im Bereich Hartmetall und umfasst Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Mikrostruktur, Leistungsprüfung und Anwendungsbereiche. Die Umsetzung dieser Norm fördert den technischen Austausch und die Qualitätskontrolle in der globalen Hartmetallindustrie und legt die sprachliche und konzeptionelle Grundlage für die Anwendung nachfolgender Normen (wie ISO 4499 und ISO 3847).

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

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

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

**Anhang:**

**ISO 3850:2018 Hartmetall  
— Wortschatz**

**1 Geltungsbereich**

Diese Internationale Norm definiert Begriffe und Definitionen im Zusammenhang mit Hartmetallen und den zugehörigen Werkstoffen und umfasst Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Mikrostruktur, Leistungsprüfung und Anwendungsgebiete. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als primärer Hartphase und Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Eisen (Fe) als Bindephase, einschließlich solcher mit zusätzlichen Karbiden (z. B. TaC, TiC, NbC, VC). Es dient als grundlegendes Vokabular für die Standardisierungsreihe für Hartmetalle (z. B. ISO 4499, ISO 3847) und ist für den Einsatz im internationalen Handel, in der Forschung und in industriellen Anwendungen vorgesehen.

**2 Normative Verweisungen**

Diese Norm verweist nicht direkt auf andere Normen, sondern ist Teil der Hartmetall-Normenreihe und bezieht sich auf Folgendes:

ISO 4499-1:2006 Hartmetalle – Metallographische Bestimmung der Mikrostruktur – Teil 1: Allgemeine Hinweise

ISO 3847:2005 Hartmetalle – Bestimmung von Probenvorbereitungsmethoden

Hinweis: Es gelten die jeweils aktuellen Versionen der referenzierten Dokumente (inkl. Änderungen).

**3 Begriffe und Definitionen**

Die folgenden Begriffe und Definitionen werden gemäß ISO 3850:2018 definiert und nach Themenbereichen kategorisiert:

**3.1 Materialzusammensetzung**

**3.1.1 Harte Phase**

**Wolframkarbid (WC)**

Der primäre Hartbestandteil in Hartmetallen mit der chemischen Formel WC zeichnet sich durch hohe Härte und Verschleißfestigkeit aus.

**Andere Carbide**

beispielsweise Tantalkarbid (TaC), Titankarbid (TiC), Niobkarbid (NbC) und Vanadiumkarbid (VC) verwendet.

**3.1.2 Binderphase**

**Kobalt (Co)**

Das übliche Bindemetall in Hartmetallen, das typischerweise zwischen 5 und 15 Gewichtsprozent

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

beträgt, sorgt für Zähigkeit und Bindungsstärke.

#### **Nickel (Ni)**

Ein alternatives Bindemetall, geeignet für korrosionsbeständige Umgebungen.

#### **Eisen (Fe)**

Eine geringfügige Komponente der Bindephase, die häufig als Legierungselement verwendet wird.

### **3.1.3 Verunreinigungen**

#### **Freier Kohlenstoff**

Kohlenstoff, nicht mit Metallen verbunden, liegt in Graphitform vor.

#### **Eta-Phase ( $\eta$ -Phase)**

Eine spröde Phase, die aufgrund von Kohlenstoffmangel entsteht, wie beispielsweise  $W_3Co_3C$  oder  $Co_6W_6C$ .

### **3.2 Herstellungsverfahren**

#### **3.2.1 Pulvermetallurgie**

Der Herstellungsprozess für Hartmetalle umfasst das Mischen, Pressen und Sintern von Pulvern.

#### **3.2.2 Sintern**

Der Prozess des Verbindens von Pulverpartikeln bei hohen Temperaturen (1300 °C bis 1500 °C), einschließlich Vakuumsintern und Niedertemperatursintern.

#### **3.2.3 Heißisostatisches Pressen (HIP)**

Ein Nachbehandlungsprozess zur Beseitigung von Porosität unter hoher Temperatur und hohem Druck.

### **3.3 Mikrostruktur**

#### **3.3.1 Getreide**

Mikroskopische WC-Partikel in Hartmetallen, typischerweise mit einer Größe von 0,5 bis 5,0  $\mu m$ .

#### **3.3.2 Porosität**

Gasporen oder Hohlräume in der Mikrostruktur, klassifiziert als Typ A ( $<10 \mu m$ ) und Typ B (10-25  $\mu m$ ).

#### **3.3.3 Einschlüsse**

Nichtmetallische Verunreinigungen (z. B. Oxide, Sulfide), die als Partikel in Hartmetallen vorhanden sind.

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



### 3.4 Leistungstests

#### 3.4.1 Biegebruchfestigkeit

Die maximale Spannung, der eine Probe in einem Drei- oder Vierpunkt-Biegeversuch standhält, gemessen in MPa.

#### 3.4.2 Härte

Die Widerstandsfähigkeit von Hartmetallen gegen Eindrücke, normalerweise gemessen mit den Skalen Rockwell A (HRA) oder Vickers (HV).

#### 3.4.3 Bruchzähigkeit:

Die Fähigkeit eines Materials, der Rissausbreitung zu widerstehen, ausgedrückt als Spannungsintensitätsfaktor ( $K_{IC}$ ), in Einheiten von  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

### 3.5 Anwendungsgebiete

#### 3.5.1 Schneidwerkzeuge

Hartmetalle zur Bearbeitung von Metallen, Holz oder Verbundwerkstoffen.

#### 3.5.2 Verschleißteile

Beispielsweise bei Bohren und Stanzwerkzeugen für den Bergbau, bei denen die hohe Verschleißfestigkeit von Hartmetallen entscheidend ist.

#### 3.5.3 Militärische Anwendungen

Hartmetalle, die in panzerbrechenden Projektilen oder Panzerungsmaterialien verwendet werden.

## 4 Grundsätze der Terminologieverwendung

Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, müssen die Begriffe in den entsprechenden Normen oder technischen Dokumenten einheitlich verwendet werden.

Symbole und Einheiten müssen dem Internationalen Einheitensystem (SI) entsprechen, z. B.  $\mu\text{m}$  (Mikrometer), MPa (Megapascal).

Wo keine Standarddefinition existiert, kann auf Branchenkonventionen verwiesen werden.

## 5 Beispiele für die Verwendung von Terminologie

Beispiele für Begriffe aus der Praxis sind:

#### Körnung

- Korngröße im Hartmetall YG6 liegt zwischen 0,8 und 1,2  $\mu\text{m}$ .

#### Sintertemperatur

Die typische Sintertemperatur für YT15- Hartmetall liegt zwischen 1400 °C und 1450 °C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Querbruchfestigkeit

Die Biegebruchfestigkeit von YG8- Hartmetall liegt zwischen 1800 und 2200 MPa.

### Anhang A (Informativ) Typische Hartmetall- Terminologie Anwendungsreferenzwerte

| Grad | Co-Gehalt ( Gew.- %) | Korngröße ( $\mu\text{m}$ ) | Querbruchfestigkeit (MPa) | Typische Anwendung         |
|------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| YG6  | 6                    | 0,8-1,2                     | 2000-2500                 | Bergbaubohrer              |
| YG8  | 8                    | 1,0-1,5                     | 1800-2200                 | Schneidwerkzeuge           |
| YT15 | 5                    | 0,6-1,0                     | 1300-1600                 | Präzisionsschneidwerkzeuge |

### Anhang B (Informativ) Historische Entwicklung der Terminologie

ISO 3850 wurde erstmals im Jahr 1983 veröffentlicht und definierte in erster Linie die grundlegende Terminologie für Hartmetalle .

Die Überarbeitung von 2018 aktualisierte die Definitionen der Bindephasen (Hinzufügung von Ni und Fe), führte Begriffe für militärische Anwendungen ein und verfeinerte die Beschreibungen der Herstellungsprozesse.

### Zusammenfassung

ISO 3850:2018 „Hartmetall – Vokabular“ bietet eine standardisierte Terminologiegrundlage für die Hartmetallindustrie und deckt Materialzusammensetzung, Herstellungsverfahren, Mikrostruktur, Leistungsprüfung und Anwendungsbereiche ab. Die Implementierung erleichtert die globale technische Kommunikation und Qualitätskontrolle und unterstützt nachfolgende Normen wie ISO 4499 und ISO 3847.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

GB/T 4295-2008 Hartmetall

Methode zur Beurteilung von Mikrostrukturdefekten

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Bewertungsmethode für mikrostrukturelle Defekte in Hartmetall fest, einschließlich der Beobachtung und Bewertung von Defekten wie Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und der  $\eta$ -Phase mittels metallografischer Mikroskopie. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, einschließlich Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm gilt nicht für Hartmetall oder andere Verbundwerkstoffe, die nicht auf Kobalt basieren.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

GB/T 3847-2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben

GB/T 3850-1983 Terminologie von Hartmetall

GB/T 3489-2005 Verfahren zur Bewertung der metallografischen Struktur von Hartmetall

GB/T 3848-2001 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

3 Begriffe und Definitionen

Dieser Standard übernimmt GB/T 3850-1983 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

**Porosität** : Poren oder Hohlräume in der Mikrostruktur von Hartmetall, unterteilt in Typ A (Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$ ) und Typ B (Durchmesser  $10\text{--}25 \mu\text{m}$ ).

**Einschlüsse** : Nichtmetallische Verunreinigungen (wie Oxide und Sulfide) in Hartmetall, normalerweise in Form von Partikeln.

**Freier Kohlenstoff** : Kohlenstoff in Hartmetall, der keine Verbindungen mit Metallen bildet, liegt in Form von Graphit vor, Codename C.

**$\eta$ -Phase** : Eine spröde Phase, die sich aufgrund eines unzureichenden Kohlenstoffgehalts in Hartmetall bildet (z. B.  $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ ), Codename  $\eta$ .

**Hartmetall** : Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

4 Bewertungsgrundsätze

Die Bewertung von Defekten in der Hartmetall-Mikrostruktur erfolgt mittels metallografischer Mikroskopie. Art und Ausmaß von Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und der  $\eta$ -Phase werden durch Probenvorbereitung, Polieren, mikroskopische Beobachtung und Vergleich mit Standardatlanten ermittelt. Die Fehlerbewertung und -klassifizierung basiert auf Größe, Anzahl und Verteilung der Defekte. Der Standardatlas (Anhang A) dient zum Vergleich, um das Defektniveau quantitativ und qualitativ zu beschreiben.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5. Bewertungsgeräte

### 5.1 Metallographisches Mikroskop

Vergrößerung: 100×, 200×, 500×, 200× wird für Routinebeobachtungen empfohlen.

Ausgestattet mit einer Polarisationslichtfunktion zur Unterscheidung zwischen freiem Kohlenstoff und der  $\eta$ -Phase.

Auflösung:  $< 0,5 \mu\text{m}$ .

### 5.2 Geräte zur Probenvorbereitung

Schneidemaschine: Präzisionsschneiden mit niedriger Geschwindigkeit, Schnittbreite  $< 0,5 \text{ mm}$ .

Montagemaschine: Heißpressmontage, Temperatur  $< 150^\circ\text{C}$ , um Strukturveränderungen zu vermeiden.

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 300–600 U/min, ausgestattet mit Diamantschleifpapier und Poliertuch.

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, zum Reinigen von Proben.

### 5.3 Zusatzausrüstung

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02 \text{ mm}$ , wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Mikrohärteprüfer: optional, wird zur Unterstützung bei der Analyse der  $\eta$ -Phasenhärte ( $> \text{HRC } 70$ ) verwendet.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: rechteckig oder zylindrisch, empfohlene Größe:  $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ .

Die Oberfläche der Probe sollte flach und frei von Rissen oder Oxidschichten sein.

Die Proben sollten den Vorbereitungsanforderungen von GB/T 3847-2005 entsprechen.

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 1$  Stufe) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

### 6.3 Zuschneiden und Einbetten der Proben

Das Schneiden der Proben erfolgt mit einer langsam laufenden Präzisionsschneidemaschine mit einer Schnittbreite von  $< 0,5 \text{ mm}$  und Wasser als Kühlmittel.

Heißpressmontage, Temperatur  $< 150^\circ\text{C}$ , Druck 20–30 MPa, Zeit 5–10 Min.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 6.4 Schleifen und Polieren von Proben

Grobschliff: Verwenden Sie Diamantschleifpapier der Körnungen 120#, 240#, 600#, um Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Feinschleifen: Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 1000#, 1500#, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ .

Polieren: Verwenden Sie  $1 \mu\text{m}$  Diamantpolierpaste, Poliertuchgeschwindigkeit 300 U/min, Oberflächenrauheit  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ .

#### 6.5 Probenreinigung

Reinigen Sie die Probenoberfläche mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton und führen Sie eine 5-minütige Ultraschallreinigung durch (Frequenz 40 kHz).

Nach dem Trocknen in einem Exsikkator aufbewahren, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

---

### 7 Bewertungsschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Kalibrieren Sie die Vergrößerung des metallografischen Mikroskops mit einer Abweichung von  $< \pm 1 \%$ .

Überprüfen Sie das Beleuchtungssystem, um sicherzustellen, dass die Lichtquelle gleichmäßig und ohne Farbunterschiede ist.

#### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10 \%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 7.3 Mikroskopische Beobachtung

Legen Sie die Probe auf den Objektisch des metallografischen Mikroskops, stellen Sie den Fokus ein und wählen Sie die 200-fache Vergrößerung.

Beobachten Sie die Probenoberfläche in mindestens 5 Sichtfeldern mit einer Feldfläche von ca.  $0,5 \text{ mm}^2$ .

Notieren Sie die Verteilung und Morphologie von Poren, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und Eta-Phase und vergleichen Sie sie mit dem Standardspektrum (Anhang A).

#### 7.4 Mängelbewertung

##### Porositätsbewertung :

Poren vom Typ A ( $< 10 \mu\text{m}$ ) :

Bewertung nach Menge: A00 (keine Poren), A02 ( $< 10$  Stück/ $\text{mm}^2$ ), A04 (10–20 Stück/ $\text{mm}^2$ ), A06 (20–30 Stück/ $\text{mm}^2$ ), A08 ( $> 30$  Stück/ $\text{mm}^2$ ).

Poren vom Typ B (10–25  $\mu\text{m}$ ) :

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Bewertung nach Menge: B00 (keine Poren), B02 (<5 Stück/mm<sup>2</sup>), B04 (5-10 Stück/mm<sup>2</sup>), B06 (10-15 Stück/mm<sup>2</sup>), B08 (>15 Stück/mm<sup>2</sup>).

#### **Inklusionsbewertung :**

Sortiert nach Anzahl und Größe: I00 (keine Einschlüsse), I02 (<5 Stück/mm<sup>2</sup>, <10 µm), I04 (5-10 Stück/mm<sup>2</sup>, 10-20 µm), I06 (>10 Stück/mm<sup>2</sup>, >20 µm).

#### **Kostenlose Kohlenstoffbewertung :**

Bewertet nach Flächenprozensatz: C00 (kein freier Kohlenstoff), C02 (<0,5 %), C04 (0,5 %–1,0 %), C06 (1,0 %–1,5 %) und C08 (>1,5 %).

#### **Bewertung der η-Phase :**

Bewertung nach Flächenprozensatz: η00 (keine η-Phase), η02 (<0,5 %), η04 (0,5 %–1,0 %), η06 (1,0 %–1,5 %) und η08 (>1,5 %).

### **7.5 Ergebniserfassung**

Notieren Sie die Fehlerbewertung für jedes Sichtfeld und berechnen Sie den Durchschnitt, um den endgültigen Fehlergrad der Probe zu bestimmen.

Abweichungsbeurteilung: Die Gradabweichung der 5 Gesichtsfelder beträgt  $\leq \pm 1$  Stufe, ansonsten ist eine Nachbeobachtung erforderlich.

## **8 Auswertung der Evaluationsergebnisse**

### **8.1 Fehlerstufenbereich**

Der Grad der mikrostrukturellen Defekte im Hartmetall hängt von der Sorte und dem Verwendungszweck ab:

YG6 (6 % Co): A02-B02-I02-C02-η02, geeignet für Bohrmeißel im Bergbau.

YG8 (8 % Co): A04-B04-I02-C04-η02, geeignet für Schneidwerkzeuge.

YT15 (5 % Co + TiC) : A02-B02-I04-C02-η04, geeignet für Schlichtwerkzeuge.

### **8.2 Abweichungsbewertung**

Die 5 Sichtfelder sind  $\leq \pm 1$  Grad, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der Defektgrad die technischen Anforderungen überschreitet, muss die Ursache analysiert werden (z. B. Sintertemperatur zu hoch, Kohlenstoffgehalt außer Kontrolle).

### **8.3 Analyse der Einflussfaktoren**

**Porosität** : Unzureichendes Sintervakuum (<10 Pa) führt zu erhöhter Porosität (>A04).

**Einschlüsse** : Eine geringe Reinheit des Rohmaterials (Verunreinigungen > 0,1 %) führt zu einer Zunahme der Einschlüsse (> I04).

**Freier Kohlenstoff** : Ein zu hoher Kohlenstoffgehalt (> 0,2 %) führt zu einer Erhöhung des freien Kohlenstoffs (> C04).

**η- Phase** : Ein unzureichender Kohlenstoffgehalt (<0,1 %) oder eine zu hohe Abkühlgeschwindigkeit (>50 °C/min) führt zur Bildung der η-Phase (>η04).

## **9 Prüfbericht**

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

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

Testbedingungen: Gerätemodell, Vergrößerung (200×), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Testergebnisse: Fehlerbewertung (A, B, I, C, η), Mittelwert und Abweichung für jedes Sichtfeld.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Normativer Anhang) Standard-Defektatlas

Poren vom Typ A: A00–A08, das Spektrum zeigt die Verteilung der Poren mit einem Durchmesser von  $< 10 \mu\text{m}$ .

Porentyp B: B00–B08, das Spektrum zeigt die Verteilung der Poren mit einem Durchmesser von  $10\text{--}25 \mu\text{m}$ .

Einschlüsse: I00–I06, die Grafik zeigt die Größe und Menge der Einschlüsse.

Freier Kohlenstoff: C00–C08, die Grafik zeigt den Flächenanteil von freiem Kohlenstoff.

η-Phase: η00–η08, das Spektrum zeigt das Flächenverhältnis der η-Phase.

#### Anhang B (Informativer Anhang) Referenzwerte für typische Defektgrade bei Hartmetall

| Marke | Co-Gehalt ( Gew.-% ) | Fehlerstufe         | Typische Anwendungen         |
|-------|----------------------|---------------------|------------------------------|
| YG6   | 6                    | A02-B02-I02-C02-η02 | Bergbaubohrer                |
| YG8   | 8                    | A04-B04-I02-C04-η02 | Schneidwerkzeuge             |
| YT15  | 5                    | A02-B02-I04-C02-η04 | Werkzeuge zur Endbearbeitung |

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $< 0,02 \text{ mm/m}$ .

#### Zusammenfassen

GB/T 4295-2008 „Methode zur Bewertung von Mikrostrukturdefekten in Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung von Mikrostrukturdefekten in Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Bewertungsergebnisse durch metallografische Mikroskopbeobachtung. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle von Hartmetallwerkstoffen und bietet zuverlässigen technischen Support für Hochleistungsanwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge und Bergbaubohrer.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anhang:**

**GB/T 5249-2008**

**Hartmetall**

**Allgemeine Vorgaben zur Probenvorbereitung**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die allgemeinen Spezifikationen für die Vorbereitung von Hartmetallproben fest, einschließlich der Schritte Probenentnahme, Schneiden, Einlegen, Schleifen, Polieren, Reinigen usw. Sie gilt für die Probenvorbereitung für Leistungsprüfungen von Hartmetall (z. B. Härte, Dichte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Mikrostruktur usw.). Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für Hartmetall mit anderen Hartmetallen (z. B. TaC , TiC , VC). Diese Norm ist nicht auf die Herstellung von beschichteten Hartmetallproben oder Hartmetallproben nach der Oberflächenverfestigung anwendbar.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 18376-2001 Leistungstestverfahren für Hartmetall

GB/T 3849-2008 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall

GB/T 7997-2010 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall

GB/T 3488-2008 Prüfverfahren für die Mikrostruktur von Hartmetall

ISO 3878:1983 Hartmetall – Spezifikation für die Probenvorbereitung

**3 Begriffe und Definitionen**

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

Testprobe: Ein repräsentativer Teil, der einem Hartmetallprodukt oder -rohling zur Leistungsprüfung entnommen wird.

Schleifen und Polieren: Durch mechanisches Schleifen und Polieren wird die Oberfläche der Probe in einen spiegelglatten Zustand gebracht.

Oberflächenrauheit (Ra): Die arithmetische mittlere Abweichung der Oberflächenrauheit der Probe in  $\mu\text{m}$ .

**4. Probenentnahme**

**4.1 Grundsätze der Probenahme**

Die Proben sollten aus repräsentativen Teilen der Hartmetallprodukte oder Rohlinge entnommen werden, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse des Leistungstests statistisch signifikant sind.

Kanten und defekte Bereiche (wie Risse und Porenkonzentrationsbereiche ) sollten bei der

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Probenentnahme vermieden werden.

#### 4.2 Probenmenge

Die Anzahl der aus jeder Produkt- oder Rohlingscharge entnommenen Proben darf nicht weniger als 3 betragen, bei Leistungsprüfungen (wie Härte, Bruchzähigkeit) darf sie nicht weniger als 5 betragen.

Bei einer Losgröße von < 10 Stück beträgt die Stichprobenquote 30–50 %, bei einer Losgröße von > 100 Stück beträgt die Stichprobenquote 5–10 %.

#### 4.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Markennummer (z. B. YG8, YT15) und Probenentnahmeort gekennzeichnet werden. Die Kennzeichnung darf den nachfolgenden Verarbeitungs- oder Prüfbereich nicht beeinträchtigen.

### 5. Probeschnitt

#### 5.1 Ausrüstungsanforderungen

Schneidemaschine: ausgestattet mit Diamantsägeblatt, Schnittgeschwindigkeit <500 U/min.

Kühlmittel: destilliertes Wasser oder spezielles Kühlmittel, Temperatur <40°C.

#### 5.2 Schneideschritte

Befestigen Sie das Hartmetallprodukt oder den Rohling auf der Werkbank der Schneidemaschine.

Schneiden Sie mit einem Diamantsägeblatt bei niedriger Geschwindigkeit (<500 U/min) und wenden Sie leichten Druck an (<50 N).

Für kontinuierliche Kühlung sorgen und lokale Überhitzung (Temperatur < 60°C) vermeiden.

#### 5.3 Schnittergebnisse

Die Probengröße sollte den Anforderungen nachfolgender Tests entsprechen, wie zum Beispiel:

Härteprüfung: 5×5×2 mm (±0,1 mm).

Bruchzähigkeitstest: 20×4×2 mm (±0,02 mm).

Mikrostrukturprüfung: 10×10× 5 mm (±0,1 mm).

Die Schnittfläche sollte glatt sein und keine sichtbaren Risse oder Brandflecken aufweisen.

### 6. Probenmontage

#### 6.1 Geltungsbereich

Eine Einfassung ist erforderlich, wenn die Probe klein (< 5 mm) ist oder eine unregelmäßige Form aufweist.

Durch die Montage wird die Handhabung der Probe und die Stabilität der Testoberfläche verbessert.

#### 6.2 Ausrüstungsanforderungen

Warmeinbettmaschine: Temperaturbereich 150–180 °C, Druck 20–30 MPa.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Einbettharz: Duroplast oder Epoxidharz, Härte > HV 100.

### 6.3 Montageschritte

Legen Sie die Probe in eine Einbettungsform und geben Sie Harzpulver oder flüssiges Harz hinzu. Stellen Sie die Temperatur auf 150–180 °C und den Druck auf 20–30 MPa ein und erhitzen Sie 5–10 Minuten lang.

Natürlich auf Raumtemperatur (<40 °C) abkühlen lassen und die montierte Probe entfernen.

### 6.4 Mosaik-Ergebnisse

Die Oberfläche der montierten Probe ist flach, das Harz ist fest mit der Probe verbunden und es gibt keine Blasen oder Risse.

Die Prüffläche des Probekörpers liegt frei, die Fläche beträgt > 5×5 mm.

---

## 7. Probenschleifen und Polieren

### 7.1 Ausrüstungsanforderungen

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 200–300 U/min.

Schleifpapier: Körnung 400#-2000# ( SiC -Schleifpapier).

: bestückt mit Diamantpolierflüssigkeit (Partikelgröße 0,5–1 µm ) .

### 7.2 Schleif- und Polierschritte

Grobmahlung:

Mit 400#-800# Schleifpapier bei einer Drehzahl von 200 U/min und leichtem Druck (<20 N) die Schnittspuren nach und nach entfernen.

Nach jedem Schleifpapierwechsel ist die Probe mit Wasser abzuspuhlen, um Schleifrückstände zu entfernen.

Feinmahlung:

Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 1000–2000, erhöhen Sie die Körnung schrittweise, drehen Sie es mit 200 U/min und üben Sie leichten Druck aus (<10 N).

, dass keine sichtbaren Kratzer auf der Oberfläche vorhanden sind und die Rauheit auf Ra <0,2 µm reduziert ist .

Polieren:

Diamantpolierflüssigkeit (Partikelgröße 0,5 µm ) verwendet, die Polierscheibendrehzahl betrug 300 U/min und es wurde leichter Druck (<5 N) ausgeübt .

Auf Hochglanz poliert, Oberflächenrauheit Ra <0,05 µm (Mikroskopprüfung).

### 7.3 Schleif- und Polierergebnisse

Die Oberfläche der Probe ist flach und glatt, ohne Kratzer, Risse oder Brandflecken.

Die Oberflächenrauigkeit Ra <0,05 µm erfüllt die Prüfanforderungen hinsichtlich Härte, Bruchzähigkeit, Mikrostruktur etc.

---

## 8. Probenreinigung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 8.1 Reinigungsmethoden

Weichen Sie die Probe 1–2 Minuten lang in wasserfreiem Ethanol oder Aceton ein, um Öl, Staub und Polierrückstände zu entfernen.

Verwenden Sie 2–3 Minuten lang einen Ultraschallreiniger (Frequenz 40 kHz, Leistung 100 W), um die Reinigungswirkung zu verstärken.

Wischen Sie die Oberfläche der Probe mit Druckluft oder Filterpapier trocken, um Wasserflecken zu vermeiden.

### 8.2 Reinigungsergebnisse

Auf der Oberfläche der Probe sind keine sichtbaren Verschmutzungen oder Rückstände vorhanden und sie ist für nachfolgende Tests geeignet.

## 9. Stichprobenprüfung

### 9.1 Sichtprüfung

Prüfen Sie, ob die Oberfläche der Probe eben und frei von Rissen, Poren oder Brandflecken ist.

Messen Sie die Stichprobengröße und die Abweichung sollte den Anforderungen in Tabelle 1 entsprechen.

Tabelle 1 Anforderungen an die Probengrößenabweichung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

GB/T 5249-2008

Hartmetall

Allgemeine Vorgaben zur Probenvorbereitung

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die allgemeinen Spezifikationen für die Vorbereitung von Proben für Leistungstests von Hartmetall fest, einschließlich Anforderungen an Probenahme, Schneiden, Einlegen, Schleifen, Polieren, Reinigen, Markieren usw. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für Hartmetalle mit anderen Hartmetallen (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm gilt für die Vorbereitung von Proben für Leistungstests wie Härte, Dichte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit und Mikrostruktur, jedoch nicht für die Vorbereitung von Proben für beschichtete Hartmetalle oder Hartmetalle nach Oberflächenverfestigung.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum ist die jeweils neueste Version dieser Norm anwendbar.

GB/T 3849-2008 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall

GB/T 3488-2008 Prüfverfahren für die Mikrostruktur von Hartmetall

GB/T 7997-2010 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall

GB/T 3850-2008 Bestimmungsverfahren der Biegefestigkeit von Hartmetall

GB/T 3848-2008 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall

ISO 4489:1978 Verfahren zur Herstellung und Prüfung von Hartmetallproben

3 Begriffe und Definitionen

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Hartmetall: Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

Testprobe: Eine Probe, die aus Hartmetallmaterialien oder -produkten zur Leistungsprüfung entnommen wird.

Probenahme: Der Prozess der Probenentnahme aus Hartmetallmaterialien oder -produkten.

Schleifen und Polieren: Der Prozess, bei dem die Oberfläche der Probe durch mechanisches Schleifen und Polieren die angegebene Rauheit erreicht.

Oberflächenrauheit (Ra): Die arithmetische Mittenrauheit der Probenoberfläche in  $\mu\text{m}$ .

4 Prinzip der Probenvorbereitung

Der Zweck der Vorbereitung von Hartmetallproben besteht darin, durch Probenahme, Schneiden, Montieren, Schleifen, Polieren, Reinigen und andere Schritte sicherzustellen, dass die Oberfläche der Proben eben und fehlerfrei ist, um die Genauigkeitsanforderungen der Leistungsprüfung zu erfüllen. Bei der Probenvorbereitung sollten Verarbeitungsfehler (wie Risse, Überhitzung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strukturveränderungen) vermieden und sichergestellt werden, dass Probengröße, Oberflächenrauheit und Geometrie den Anforderungen der entsprechenden Prüfnormen entsprechen.

## 5. Probenvorbereitungsgeräte

### 5.1 Schneid-ausrüstung

Schneidemaschine: ausgestattet mit Diamantsägeblatt, Schnittgeschwindigkeit 300–500 U/min.

Kühlmittel: Wasser oder Kühlmittel auf Wasserbasis, temperaturgeregelt <60°C, Überhitzung vermeiden.

### 5.2 Montage-ausrüstung

Warmeinbettmaschine: Temperaturbereich 150–200 °C, Druck 20–30 MPa.

Befestigungsmaterial: Phenolharz oder Epoxidharz, temperaturbeständig >150°C.

### 5.3 Schleif- und Poliergeräte

Schleif- und Poliermaschine: Geschwindigkeit 200–500 U/min.

Schleifpapier: Körnung 400#-2000#.

Polierscheibe: Filz oder Flanell, Geschwindigkeit 300–400 U/min.

Poliermittel: Diamantpolierflüssigkeit, Partikelgröße 0,5–1 µm.

### 5.4 Reinigungsgeräte

Ultraschallreiniger: Frequenz 40 kHz, Leistung 100–200 W.

Reinigungsflüssigkeit: wasserfreies Ethanol oder Aceton.

### 5.5 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit ±0,02 mm.

Digitaler Mikrometer: Genauigkeit ±0,001 mm.

Oberflächenrauheitsprüfgerät: Genauigkeit ± 0,01 µm.

### 5.6 Umweltkontrolle

Temperatur: 20±5°C.

Luftfeuchtigkeit: 50 ± 10 %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6 Schritte zur Probenvorbereitung

### 6.1 Probenahme

#### 6.1.1 Ort der Probenentnahme

Die Probenentnahme sollte repräsentativ für die gesamten Materialeigenschaften sein und Bereiche in der Nähe von Kanten, Oberflächendefekten oder wärmebeeinflussten Zonen vermeiden.

Bei Stangen, Platten oder Teilen sollte der Ort der Probenentnahme den entsprechenden Prüfnormen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

entsprechen:

Härteprüfung: >1 mm von der Oberfläche.

Mikrostrukturprüfung: >0,5 mm von der Oberfläche.

Biegefestigkeitsprüfung: >2 mm vom Rand.

### 6.1.2 Probenmenge

Um die statistische Repräsentativität zu gewährleisten, darf die Anzahl der für jede Partie entnommenen Proben nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Abweichungen der Testergebnisse (>5%) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

### 6.1.3 Probenahmeverfahren

Verwenden Sie zum Schneiden ein Diamantsägeblatt, Wasser als Kühlmittel, eine Schnittgeschwindigkeit von 300–500 U/min und eine Temperatur <60 °C, um eine Überhitzung zu vermeiden, die zu Gewebeveränderungen führt.

Die Schnittfläche sollte flach sein und eine Vertikalabweichung von <0,05 mm aufweisen.

### 6.2 Probengröße

Bestimmen Sie die Stichprobengröße entsprechend dem Testgegenstand:

Härteprüfung (GB/T 3849-2008): Oberfläche > 5 × 5 mm, Dicke > 2 mm.

Biegefestigkeitstest (GB/T 3850-2008): 20 × 6,5 × 5,25 mm (± 0,05 mm).

Bruchzähigkeitstest (GB/T 7997-2010): 20 × 4 × 2 mm (± 0,02 mm).

Mikrostrukturprüfung (GB/T 3488-2008): 10×10× 5 mm (±0,1 mm).

Maßabweichungen sollten den Anforderungen der entsprechenden Prüfnormen entsprechen.

### 6.3 Mosaik (optional)

#### 6.3.1 Geltungsbereich

Proben mit kleiner Größe (<5×5×2 mm) oder unregelmäßiger Form müssen montiert werden.

#### 6.3.2 Montageschritte

Verwenden Sie einen Heißmontierer und wählen Sie Phenolharz oder Epoxidharz.

Die Montagetemperatur beträgt 150–180 °C, der Druck 20–30 MPa und die Haltezeit 5–10 Minuten.

Nach dem Abkühlen ist die Probe fest und ohne Blasen oder Risse mit dem Montagematerial verbunden.

### 6.4 Schleifen und Polieren

#### 6.4.1 Grobschliff

Verwenden Sie 400#–1200# Schleifpapier, um die Schnittspuren nach und nach zu entfernen.

Die Geschwindigkeit beträgt 200 U/min, die Schleifzeit jeder Schleifpapierebene beträgt 1–2 Minuten und die Richtung ist um 90° gedreht, um gleichmäßige Schleifspuren zu gewährleisten.

Nach dem Grobschleifen ist die Oberfläche glatt und weist keine sichtbaren Kratzer auf

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Mikroskopische Betrachtung, 50-fache Vergrößerung).

#### 6.4.2 Feinmahlen

Verwenden Sie Schleifpapier der Körnung 1500–2000, Geschwindigkeit 200 U/min, Schleifzeit 1–2 Minuten.

Die Oberflächenrauheit nach dem Feinschleifen beträgt  $Ra < 0,2 \mu m$  (gemessen mit einem Oberflächenrauheitsmessgerät).

#### 6.4.3 Polieren

Verwenden Sie Diamantpolierflüssigkeit (Partikelgröße  $0,5–1 \mu m$ ), Polierscheibendrehzahl 300–400 U/min, Polierzeit 3–5 Min.

dem Polieren ist die Oberflächenrauheit  $Ra < 0,05 \mu m$ , spiegelglatt und kratzfrei (Mikroskopuntersuchung, 100-fache Vergrößerung).

#### 6.5 Reinigung

Die Probe wurde in einen Ultraschallreiniger gelegt und 3–5 Minuten lang mit wasserfreiem Ethanol bei einer Frequenz von 40 kHz und einer Leistung von 100 W gereinigt.

Nach der Reinigung mit trockenem Stickstoff trockenblasen, um sicherzustellen, dass keine Rückstände auf der Oberfläche verbleiben.

#### 6.6 Probenkennzeichnung

Markieren Sie die Chargennummer, die Markennummer (z. B. YG8, YT15) und die Testelemente auf dem Nicht-Testbereich der Probe.

Markierungsmethode: Lasergravur oder Tintenmarkierung. Die Markierung sollte klar sein und den Testbereich nicht beeinträchtigen.

#### 6.7 Stichprobenprüfung

Überprüfen Sie die Oberfläche der Probe: keine Risse, Kratzer, Oxidschichten oder Verunreinigungen.

Überprüfen Sie die Größe: Verwenden Sie zum Messen einen Messschieber oder ein Mikrometer. Die Abweichung entspricht den Anforderungen der Prüfnorm.

Oberflächenrauheit prüfen:  $Ra < 0,05 \mu m$  (Gefügeprüfung) bzw.  $Ra < 0,1 \mu m$  (Härteprüfung).

### 7. Qualitätsbewertung der Probenvorbereitung

#### 7.1 Oberflächenqualität

Die Oberfläche der Probe sollte spiegelglatt und ohne Kratzer, Risse oder Verarbeitungsfehler sein (Mikroskopuntersuchung, 100-fache Vergrößerung).

Oberflächenrauheit:

Mikrostrukturprüfung:  $Ra < 0,05 \mu m$ .

Härteprüfung:  $Ra < 0,1 \mu m$ .

Biegefestigkeits- bzw. Bruchzähigkeitsprüfung:  $Ra < 0,2 \mu m$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 7.2 Maßgenauigkeit

Die Stichprobengrößenabweichung muss den entsprechenden Prüfnormen entsprechen:

Biegefestigkeitstest:  $\pm 0,05$  mm.

Bruchzähigkeitstest:  $\pm 0,02$  mm.

Mikrostrukturprüfung:  $\pm 0,1$  mm.

## 7.3 Organisatorische Auswirkungen

Bei der Probenvorbereitung dürfen keine Strukturveränderungen (wie Kornvergrößerung oder Risse durch Überhitzung) auftreten.

Bei Schneidtemperaturen  $> 60$  °C kann es zu Abweichungen der WC-Korngröße  $> \pm 0,2$   $\mu\text{m}$  kommen (Mikroskopische Betrachtung, 1000-fache Vergrößerung).

## 7.4 Nicht konforme Behandlung

Wenn die Oberflächenqualität, Größe oder Rauheit der Probe nicht zufriedenstellend ist, muss die Probe erneut vorbereitet werden.

Werden Risse oder Strukturveränderungen festgestellt, muss die Ursache analysiert werden (z. B. zu hohe Schnittgeschwindigkeit) und eine erneute Probenentnahme erfolgen.

## 8 Probenlagerung

Um eine längere Einwirkung der Luft ( $> 24$  h) zu vermeiden, sollte die Probe unmittelbar nach der Vorbereitung getestet werden.

Wenn eine Lagerung erforderlich ist, sollte die Probe in einen Exsikkator bei  $20 \pm 5$  °C und einer Luftfeuchtigkeit von  $< 30$  % gelegt und mit Rostschutzpapier umwickelt werden.

Die Lagerzeit sollte 1 Monat nicht überschreiten, um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden.

## 9 Prüfbericht

Der Inspektionsbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe.

Vorbereitungsbedingungen: Schnittgeschwindigkeit (300–500 U/min), Montagetemperatur (150–180 °C), Partikelgröße der Polierflüssigkeit (0,5–1  $\mu\text{m}$ ).

Vorbereitungsergebnisse: Oberflächenrauheit (Ra), Maßabweichung, Beurteilung der Oberflächenqualität.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den Testanforderungen entspricht.

Herstellungsdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Anforderungen an die Vorbereitung typischer Hartmetallproben

| Prüflinge    | Probengröße (mm)        | Oberflächenrauheit (Ra, $\mu\text{m}$ ) | Maßabweichung (mm) | Typische Anwendungen |
|--------------|-------------------------|-----------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Härteprüfung | $> 5 \times 5 \times 2$ | $< 0,1$                                 | $\pm 0,1$          | Schneidwerkzeuge     |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Prüflinge               | Probengröße (mm) | Oberflächenrauheit (Ra, $\mu\text{m}$ ) | Maßabweichung (mm) | Typische Anwendungen |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Biegefestigkeitsprüfung | 20×6,5×5,25      | <0,2                                    | ±0,05              | Bergbaubohrer        |
| Bruchzähigkeitsprüfung  | 20×4×2           | <0,2                                    | ±0,02              | Schimmel             |
| Mikrostrukturprüfung    | 10×10×5          | <0,05                                   | ±0,1               | Qualitätskontrolle   |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Umweltanforderungen für die Probenvorbereitung

Temperatur: 20±5°C.

Luftfeuchtigkeit: 50 ± 10 %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Ebenheit der Werkbank: Abweichung <0,02 mm/m.

#### Anhang C (Informativer Anhang) Häufige Probleme und Lösungen bei der Probenvorbereitung

| Frage                                            | Grund                                                                   | Problemumgehung                                                               |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Oberflächenkratzer                               | Die Partikelgröße der Polierflüssigkeit ist zu groß (>1 $\mu\text{m}$ ) | Verwenden Sie Polierflüssigkeit mit einer Partikelgröße von 0,5 $\mu\text{m}$ |
| Probe überhitzt (>60°C)                          | Die Schnittgeschwindigkeit ist zu hoch (> 500 U/min)                    | Reduzieren Sie die Schnittgeschwindigkeit auf 300 U/min                       |
| Oberflächenrauheit entspricht nicht dem Standard | Unzureichende Polierzeit (<3 Min.)                                      | Polierzeit auf 5 Minuten verlängern                                           |
| Probenkantenrisse                                | Schneiden ohne Kühlmittel                                               | Bei Temperaturen < 60°C Kühlmittel auf Wasserbasis verwenden                  |

#### Zusammenfassen

GB/T 5249-2008 „Allgemeine Spezifikation für die Vorbereitung von Hartmetallproben“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Probenvorbereitung für Hartmetall-Leistungsprüfungen. Durch standardisierte Probenahme, Schneiden, Montieren, Schleifen, Polieren, Reinigen und weitere Schritte wird sichergestellt, dass die Oberflächenqualität und Maßgenauigkeit der Proben den Prüfanforderungen entsprechen. Die Umsetzung dieser Norm trägt dazu bei, die Genauigkeit und Wiederholbarkeit von Hartmetall-Leistungsprüfergebnissen zu verbessern und bietet zuverlässigen technischen Support für Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer, Formen und andere Anwendungsbereiche.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

ISO 28079:2009

**Bruchzähigkeitstest einer palmenförmigen Hartmetallprobe**  
**Hartmetalle – Palmqvist-Zähigkeitstest**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Messung der palmenförmigen Bruchzähigkeit von Hartmetall und Cermet durch Eindringung bei Raumtemperatur fest. Diese Norm gilt für die Bruchzähigkeitsprüfung von metallgebundenen Carbiden und Carbonitriden (allgemein bekannt als Hartmetalle, Cermets oder Hartmetalle), die sogenannte Palmqvist-Bruchzähigkeit. Diese wird durch Messung der Gesamtlänge des viereckigen Risses der Vickershärte-Eindringung berechnet. Das Prüfverfahren dieser Norm gilt für Umgebungstemperaturen ( $20 \pm 5$  °C), kann aber nach Vereinbarung auf höhere oder niedrigere Temperaturen erweitert werden. Dieses Standardprüfverfahren gilt für herkömmliche Laborluftumgebungen und ist nicht auf korrosive Umgebungen (wie starke Säuren oder Meerwasser) anwendbar.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3878:1983 Hartmetall – Vickers-Härte und Rockwell-Härteprüfung

ISO 3252:1999 Pulvermetallurgie – Terminologie

ISO 6507-1:2005 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3252:1999 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Hartmetalle

Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch Pulvermetallurgie.

Cermets

mit Carbonitrid (wie TiCN) als Haupthartphase und Metall (wie Ni, Co) als Bindephase.

Palmqvist Robustheit

Die Bruchzähigkeit von Hartmetall oder Cermet wird anhand der Gesamtlänge des Viereckenrisses des Vickershärteeindrucks berechnet und hat die Einheit  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Vickershärteeindruck

Zum Aufbringen der Last wird ein Vickers-Diamant-Eindringkörper (Scheitelwinkel  $136^\circ$ ) verwendet, der auf der Oberfläche der Probe eine quadratische Vertiefung bildet.

Risslänge (l)

Die Länge des handflächenförmigen Risses, der sich von den vier Ecken der Vickers-Vertiefung aus erstreckt, in mm.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

#### 4 Prüfprinzip

Bei der Prüfung der Bruchzähigkeit in Handflächenform wird ein Vickers-Härteeindruck auf die Oberfläche einer Hartmetall- oder Cermetprobe angewendet. Die Gesamtlänge des handflächenförmigen Risses, der sich von den vier Ecken des Eindrucks aus erstreckt, wird gemessen. Die Bruchzähigkeit  $K_{1c}$  wird durch Kombination der Eindrucklast mit der Materialhärte berechnet. Der handflächenförmige Riss wird als oberflächlicher Riss (nicht-mittlerer Riss) angesehen, dessen Länge von der Materialzähigkeit abhängt. Die Berechnungsformel lautet wie folgt:

$$K_{1c} = A \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

其中:

- $K_{1c}$  为断裂韧性, 单位为  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;
- $A$  为常数 (经验值, 通常取 0.0028) ;
- $HV$  为维氏硬度, 单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$  (或  $\text{MPa}$ ) ;
- $P$  为压痕载荷, 单位为  $\text{N}$  (通常为 294.2  $\text{N}$ , 即 30  $\text{kgf}$ ) ;
- $T$  为四角裂纹总长度, 单位为  $\text{mm}$ ,  $T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ .

#### 5 Prüfmittel

##### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Erfüllt die Anforderungen von ISO 6507-1:2005.

Lastbereich: 100–500  $\text{N}$ , Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Haltezeitregelung: 5-60  $\text{s}$ , Abweichung  $< \pm 0,5\%$ .

##### 5.2 Eindringkörper

Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper, Scheitelwinkel  $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$ .

Die Oberfläche des Eindringkörpers ist frei von Defekten und weist klare Kanten auf (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ ).

##### 5.3 Messgerät

Optisches Mikroskop: Vergrößerung  $400\times$ – $600\times$ , Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ .

Ausgestattet mit einem digitalen Anzeigesystem mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,001 \text{ mm}$ .

##### 5.4 Kalibrierblock

Hartmetall-Standardkalibrierblöcke, Härtebereich  $HV 1200$ – $2000$ , Abweichung  $< \pm 2\%$ .

Die Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers beträgt  $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ .

##### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10\%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader oder Zylinder, Prüffläche > 5 x 5 mm, Dicke > 2 mm.

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit Ra < 0,1 µm (poliert).

### 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen (>5%) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

### 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

### 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

---

## 7 Testschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Der Härteprüfer wurde mit einem Standard-Kalibrierblock mit einer Last von 294,2 N (30 kgf) und drei Messungen kalibriert. Die Härteabweichung betrug  $\leq \pm 1$  %.

Überprüfen Sie den Zustand des Eindringkörpers, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Defekte vorliegen.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Relative Luftfeuchtigkeit:  $50 \pm 10$  %.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Vickershärte-Eindringprüfung

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und achten Sie darauf, dass die Prüfoberfläche eben ist.

Wählen Sie eine Last von 294,2 N (30 kgf) und eine Haltezeit von 10-15 s.

Der Eindringkörper wird langsam in die Probenoberfläche gedrückt und nach Aufrechterhaltung der Last automatisch entlastet.

Auf jeder Probe wurden 5 Eindrücke gemacht, wobei der Eindruckabstand > 5 mal der Eindruckdiagonalenlänge (> 0,5 mm) und der Abstand von der Probenkante > 1 mm war.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 7.4 Risslängenmessung

$l_1, l_2, l_3$  und  $l_4$  an den vier Ecken der Vertiefung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm gemessen.

Berechnen Sie die Gesamtrisslänge:

$$T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$$

Vergewissern Sie sich, dass der Riss handflächenförmig ist (kein Mittelriss oder Seitenriss) und dass der Riss deutlich von den vier Ecken der Vertiefung ausgeht.

#### 7.5 Vickershärtemessung

Messen Sie die Längen der beiden Diagonalen der Vertiefung ( $d_1, d_2$ ) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm.

Berechnen Sie die durchschnittliche Diagonallänge:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Vickershärte berechnen:

$$HV = \frac{1.8544 \times P}{d^2}$$

Wobei:  $P = 294,2$  N.

#### 7.6 Berechnung der Bruchzähigkeit

Berechnen Sie die Bruchzähigkeit mit der Formel:

$$K_{1c} = 0.0028 \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

Nehmen Sie den Durchschnittswert von  $K_{1c}$  aus 5 Eindrücken mit einer Abweichung von  $< \pm 5$  %.

### 8 Auswertung der Prüfergebnisse

#### 8.1 Bruchzähigkeitsbereich

Der Wert für die Bruchzähigkeit von Hartmetall beträgt üblicherweise  $K_{1c}$  10-20  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , und der genaue Bereich hängt von der Sorte und dem Co-Gehalt ab:

YG6 (6 % Co):  $K_{1c}$  14-16  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

YG8 (8 % Co):  $K_{1c}$  12-15  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

YG10 (10 % Co):  $K_{1c}$  10-13  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

Metallkeramiken (wie TiCN -Ni):  $K_{1c}$  8-12  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

#### 8.2 Abweichungsbewertung

Die  $K_{1c}$ - Wert-Abweichung der 5 Eindrücke beträgt  $< \pm 5$  %, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Liegt der  $K_{1c}$ - Wert außerhalb des erwarteten Bereichs, muss die Ursache analysiert werden (z. B. ist die Rissmorphologie nicht palmenförmig oder der Co-Gehalt ist zu hoch, sodass keine Risse entstehen).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Rissform: Handelt es sich bei dem Riss um einen Mittlerriss oder einen Querriss (kein handflächenförmiger Riss), ist der  $K_{Ic}$ -Wert ungültig.

Co-Gehalt: Wenn der Co-Gehalt  $>15\%$  ist, können keine Risse entstehen (die Zähigkeit ist zu hoch) und die Palm-Methode ist nicht anwendbar.

Lastauswahl: Eine zu niedrige Last ( $<294,2\text{ N}$ ) führt möglicherweise nicht zu Rissen, während eine zu hohe Last ( $>490,3\text{ N}$ ) zu Risskomplikationen führen kann.

Oberflächenqualität: Eine Oberflächenrauheit  $R_a >0,1\text{ }\mu\text{m}$  beeinflusst die Risslängenmessung (Abweichung  $>5\%$ ).

### 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe, Co-Gehalt.

Testbedingungen: Gerätemodell, Last ( $294,2\text{ N}$ ), Haltezeit ( $10-15\text{ s}$ ), Umgebungstemperatur ( $20\pm5^\circ\text{C}$ ), Luftfeuchtigkeit ( $50\pm10\%$ ).

T für jeden Eindruck T, Vickershärte HV HV HV,  $K_{Ic}$ -Werte und deren Durchschnittswerte und Abweichungen.

Bewertungsschlussfolgerung: ob der erwartete Bereich eingehalten wird, Beschreibung der Rissmorphologie.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

### Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der palmenförmigen Bruchzähigkeit typischer Hartmetalle

| Marke        | Co-Gehalt<br>(Gew.-%) | Vickershärte<br>(HV30) | Bruchzähigkeit<br>Handfläche ( $K_{Ic}$ , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) | Typische Anwendungen            |
|--------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| YG6          | 6                     | 1500-1600              | 14-16                                                                       | Bergbaubohrer                   |
| YG8          | 8                     | 1450-1550              | 12-15                                                                       | Schneidwerkzeuge                |
| YG10         | 10                    | 1400-1500              | 10-13                                                                       | Schimmel                        |
| TiCN -<br>Ni | 10                    | 1600-1700              | 8-12                                                                        | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur:  $20\pm5^\circ\text{C}$ .

Luftfeuchtigkeit:  $50\pm10\%$ .

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $<0,02\text{ mm/m}$ .

### Anhang C (Informativer Anhang) Schematische Darstellung der palmenförmigen Rissmorphologie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Palmenförmiger Riss: Ein flacher Riss, der sich von den vier Ecken der Vickers-Vertiefung aus erstreckt, wobei der Rissverlauf entlang der Kante der Vertiefung deutlich sichtbar ist.

Nicht handflächenförmige Risse:

Mittlerer Riss: Der Riss verläuft vom Boden der Vertiefung vertikal nach unten.

Lateraler Riss: Ein Riss, der sich seitlich entlang der Probenoberfläche ausbreitet und Abplatzungen verursachen kann. Hinweis: Für die Berechnung von

$K_{IC}$  in dieser Norm sind nur handflächenförmige Risse relevant.

---

### Zusammenfassen

ISO 28079:2009 „Prüfung der Bruchzähigkeit von handflächenförmigen Proben aus Hartmetall“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Prüfung der Bruchzähigkeit von Hartmetall und Cermets an handflächenförmigen Proben. Durch standardisierte Probenvorbereitung, Eindruckprüfung, Rissmessung und Ergebnisberechnung wird die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse gewährleistet. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer, Formen und andere Anwendungsbereiche.

Anhang:

ISO 6507-1:2018

Vickers-Härteprüfung von metallischen Werkstoffen

Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Härte metallischer Werkstoffe (einschließlich Hartmetall, Stahl, Gusseisen, Nichteisenmetalle usw.) bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) durch die Vickers-Härteprüfung fest, einschließlich Prüfgrundsätze, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm gilt für Prüfungen im Vickers-Härtebereich von HV 1 bis HV 3000 und deckt unterschiedliche Lasten (0,098 N bis 2942 N) ab. Diese Norm gilt nicht für Härteprüfungen an winzigen oder dünnwandigen Proben (Dicke <0,1 mm) oder beschichteten Werkstoffen.

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 6507-2:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

ISO 6507-3:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 3: Kalibriernormale

ISO 376:2011 Metallische Werkstoffe – Kalibrierkraftnormale

ISO 18265:2013 Metallische Werkstoffe – Umrechnung zwischen Härte und Festigkeit

3 Begriffe und Definitionen

In dieser Norm werden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet:

Vickershärte (HV): Die Fähigkeit eines Metallmaterials, dem Eindringen eines Vickers-Eindringkörpers zu widerstehen, ausgedrückt als Vickershärtewert in N/mm<sup>2</sup> (oder MPa), berechnet anhand der diagonalen Länge des Eindrucks.

Vickers-Eindringkörper: Ein quadratischer Diamantpyramiden-Eindringkörper mit einem Scheitelwinkel von 136°.

Eindruckdiagonale: Die Länge der beiden Diagonalen des quadratischen Eindrucks, der entsteht, wenn der Vickers-Eindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt wird, in mm.

Prüflast (F): Die auf den Vickers-Eindringkörper ausgeübte Kraft in Newton (N) im Bereich von 0,098 N bis 2942 N.

Haltezeit : Die Zeit, die der Eindringkörper die Last nach dem Aufbringen hält, gemessen in Sekunden (s).

4 Prüfprinzip

Die Vickers-Härteprüfung wird durchgeführt, indem ein Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper (Scheibenwinkel 136°) mit einer bestimmten Last in die Oberfläche einer Metallprobe gedrückt, für eine bestimmte Zeit gehalten und dann entlastet wird. Anschließend wird die Länge der beiden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diagonalen des Eindrucks ( $d_1$ ,  $d_2$ ) gemessen, die durchschnittliche Diagonallänge ( $d$ ) berechnet und anschließend der Vickers-Härtewert (HV) ermittelt. Die Berechnungsformel lautet:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

In:

$F$  为试验载荷, 单位为 N;

$d$  为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ;

硬度值单位为 N/mm<sup>2</sup> (1 kgf/mm<sup>2</sup>  $\approx$  9.807 N/mm<sup>2</sup>).

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Erfüllt die Verifizierungs- und Kalibrierungsanforderungen von ISO 6507-2:2018.

Lastbereich: 0,098 N bis 2942 N (HV 0,01 bis HV 30), Genauigkeit  $\pm 0,5$  %.

Haltezeitregelung: 5 s bis 60 s, Abweichung  $< \pm 0,5$  s.

### 5.2 Eindringkörper

Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper, Scheitelwinkel 136° ( $\pm 0,5^\circ$ ).

Die Oberfläche des Eindringkörpers ist frei von Defekten und weist klare Kanten auf (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ ).

### 5.3 Messgerät

Optisches Mikroskop: Vergrößerung 50 $\times$ –1000 $\times$ , 400 $\times$  empfohlen, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$ .

Ausgestattet mit einem digitalen Anzeigesystem mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,001 \text{ mm}$ .

### 5.4 Kalibrierblock

Standard-Kalibrierblöcke gemäß ISO 6507-3:2018, Härtebereich HV 100–3000, Abweichung  $< \pm 2$  %.

Die Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers beträgt  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ .

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Zylinder oder andere regelmäßige geometrische Form, Prüffläche  $> 5 \times 5 \text{ mm}$ , Dicke  $> 0,5 \text{ mm}$  (lastabhängig).

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  (poliert), bei Prüfungen mit geringer Belastung ( $< 9,807 \text{ N}$ )  $R_a <$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



0,05  $\mu\text{m}$  .

Die Dicke der Probe sollte die folgenden Anforderungen erfüllen: Dicke  $\geq 1,5 \times$  diagonale Länge der Vertiefung.

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>3\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, 45# Stahl) und Testgegenständen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie vor dem Testen die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

---

## 7 Testschritte

### 7.1 Gerätekalibrierung

Verwenden Sie den Standard-Kalibrierblock, um den Härteprüfer zu kalibrieren. Wählen Sie den Kalibrierblock, der der Prüflast entspricht. Messen Sie dreimal. Die Härteabweichung beträgt  $\leq \pm 1\%$ . Überprüfen Sie den Zustand des Eindringkörpers, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Defekte vorliegen.

### 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Lastauswahl

Wählen Sie die Last basierend auf der Materialhärte und der Probendicke:

Hartmetall: 294,2 N (30 kgf , HV 30) werden empfohlen.

Stahl: 50 N bis 294,2 N (HV 5 bis HV 30).

Dünnwandige Proben: 0,098 N bis 9,807 N (HV 0,01 bis HV 1).

Die Belastung soll sicherstellen, dass die diagonale Länge d des Eindrucks im Bereich von 0,020 mm bis 1,400 mm liegt.

### 7.4 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und achten Sie darauf, dass die Prüfoberfläche eben ist.

Wählen Sie eine geeignete Last (z. B. 294,2 N) und halten Sie die Last für 10–15 s (oder passen Sie

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sie je nach Materialanforderungen an).

Der Eindringkörper wird langsam in die Probenoberfläche gedrückt und nach Aufrechterhaltung der Last automatisch entlastet.

Pro Probe sind 5 Eindruckpunkte zu messen, wobei der Eindruckabstand > 3 mal der Diagonalenlänge (> 0,3 mm) und der Abstand vom Probenrand > 0,5 mm sein muss.

## 7.5 Messung und Berechnung

Die Längen der beiden diagonalen Linien der Vertiefung (d1, d2) wurden mit einem optischen Mikroskop mit einer Genauigkeit von ±0,001 mm gemessen.

Berechnen Sie die durchschnittliche Diagonallänge:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Vickershärte berechnen:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

Als Härtewert der Probe werden fünf Eindruckpunkte mit einer Abweichung von <±3 % angenommen.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Härtewertebereich

Vickershärtebereich von metallischen Werkstoffen: HV 100-3000, der konkrete Wert hängt vom Werkstoff ab:

Hartmetall (YG8): HV 1450–1550.

Gehärteter Stahl (45#): HV 500–700.

Aluminiumlegierung : HV 50-150.

### 8.2 Abweichungsbewertung

der 5 Eindruckpunkte liegt bei <±3 %, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Übersteigt der Härtewert die materialtechnischen Anforderungen, muss die Ursache (z. B. Oberflächenfehler, Lastfehlanspassung) analysiert werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Wahl der Last: Bei zu geringer Last (<0,098 N) kann es vorkommen, dass kein deutlicher Eindruck entsteht, bei zu hoher Last (>2942 N) kann es zu einer Verformung der Probe kommen.

Oberflächenqualität: Eine Oberflächenrauheit Ra >0,1 µm führt zu geringeren Härtewerten (Abweichung >5%).

Verweilzeit : Eine Zeit <5 s oder >60 s beeinflusst die Eindruckgröße (Abweichung ±2 %).

Probendicke: Eine Dicke <1,5 × Eindruckdiagonale führt zu einem Stützeffekt und einem hohen Härtewert (Abweichung >10 %).

## 9 Prüfbericht

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Last (N), Haltezeit (s), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Prüfergebnisse: Durchschnittliche diagonale Länge jedes Eindrucks (d), Härtewert (HV), durchschnittlicher Härtewert und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob die technischen Anforderungen des Materials erfüllt werden.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Informativer Anhang) Vickershärte-Referenzwerte für typische Metallmaterialien

| Materialtyp        | Marke/Kategorie | Vickershärte (HV) | Typische Belastung (N) | Typische Anwendungen          |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| Hartmetall         | YG8             | 1450–1550         | 294,2                  | Schneidwerkzeuge              |
| Gehärteter Stahl   | 45# (HRC 50)    | 500-700           | 294,2                  | Mechanische Teile             |
| Aluminiumlegierung | 6061-T6         | 50-150            | 9.807                  | Luft- und Raumfahrtstrukturen |
| Gusseisen          | HT250           | 200-300           | 98,07                  | Motorblock                    |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Tabelle der Beziehung zwischen Vickershärte und Belastung

| Last (N) | Härtesymbol | Diagonaler Längenbereich der Einkerbung (mm) | Anwendbare Materialien                   |
|----------|-------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 0,098    | HV 0,01     | 0,020–0,050                                  | Dünnwandige oder kleine Proben           |
| 9.807    | HV 1        | 0,050–0,150                                  | Weiche Metalle (wie Aluminium)           |
| 98,07    | HV 10       | 0,150–0,400                                  | Mittelharte Werkstoffe (z. B. Gusseisen) |
| 294,2    | HV 30       | 0,400-1,000                                  | Hartlegierung, Stahl                     |
| 2942     | HV 300      | 1.000-1.400                                  | Superharte Materialien                   |

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

#### Zusammenfassen

ISO 6507-1:2018 „Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Vickers-Härteprüfung metallischer Werkstoffe und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte 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](http://www.ctia.com.cn)

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

Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm gilt für die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Werkstoffen wie Hartmetall, Stahl und Aluminiumlegierungen und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt sowie Formenbau.

Anhang:

ISO 6507-1:2018

Metallische Werkstoffe - Vickers-Härteprüfung

Teil 1: Prüfverfahren

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Vickers-Härteprüfverfahren für metallische Werkstoffe (einschließlich Hartmetall) fest und ist für Prüfungen mit einem Prüfkraftbereich von 1,961 N (0,2 kgf) bis 1,177 N (120 kgf) anwendbar. Sie umfasst die Makro-Vickers-Härteprüfung (Prüfkraft 9,807 N bis 1,177 N) und die Mikro-Vickers-Härteprüfung (Prüfkraft 1,961 N bis 9,807 N). Diese Norm gilt für die Härteprüfung verschiedener metallischer Werkstoffe, darunter Stahl, Gusseisen, Nichteisenmetalle und Hartmetall, und legt Prüfverfahren, Messmethoden und Anforderungen an die Ergebnisverarbeitung fest.

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 6507-2:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

ISO 6507-3:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 3: Kalibrierung von Vergleichsplatten

ISO 376:2011 Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Kraftmesssystemen für statische Zug-, Druck- und Schubprüfmaschinen

3 Begriffe und Definitionen

Dieses Dokument gilt für ISO 3850:2018 (Terminologie für Hartmetalle) und die folgenden Definitionen:

**Vickershärte (HV)** : Der Härtewert wird durch das Verhältnis der aufgebrachten Prüfkraft zur Eindruckoberfläche bestimmt, mit der Einheit HV.

**Prüfkraft (F)** : Die vom Eindringkörper auf die Probe ausgeübte Kraft, ausgedrückt in Newton (N) oder Kilogramm-Kraft (kgf).

**Eindruck** : Ein quadratischer Eindruck, der durch einen viereckigen Diamantpyramideneindringkörper auf der Oberfläche der Probe entsteht.

**Diagonallänge (d)** : Die durchschnittliche Länge der beiden Diagonalen der Vertiefung in Millimetern (mm).

4 Grundsatz

Die Bestimmung der Vickershärte basiert auf der Anwendung einer bestimmten Prüfkraft, dem Eindrücken eines diamantenen, viereckigen Pyramidenkörpers (Scheibenwinkel 136°) in die Probenoberfläche, der Messung der diagonalen Länge des Eindrucks und der Berechnung des Härtewertes. Der Härtewert wird nach folgender Formel berechnet:  $HV = 1,8544 \cdot F / d^2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



In:

HV ist die Vickershärte (Einheit: kgf /mm<sup>2</sup> oder N/ mm<sup>2</sup>) ,

F ist die aufgebrachte Prüfkraft (Einheit: N),

d ist die durchschnittliche diagonale Länge der Vertiefung (Einheit: mm).

---

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Prüfkraftbereich: 1,961 N bis 1,177 N, Genauigkeit  $\pm 1,0\%$ .

Eindringkörper: viereckige Diamantpyramide, Spitzenwinkel  $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ , Spitzenradius  $< 0,002$  mm.

Messsystem: Mikroskop mit 200- bis 500-facher Vergrößerung, Auflösung  $\leq 0,001$  mm.

Ladezeit: 10 bis 15 Sekunden, Genauigkeit  $\pm 1$  Sekunde.

### 5.2 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $23 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30 % bis 70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

---

## 6. Musteranforderungen

### 6.1 Form und Größe

Die Probe sollte groß genug sein, um sicherzustellen, dass die Vertiefung mindestens das 2,5-fache der diagonalen Länge vom Rand und den angrenzenden Vertiefungen beträgt.

Empfohlene Dicke: mindestens das 0,5-fache der maximalen Eindringtiefe entsprechend der Prüfkraft (ca.  $0,07 \times d$  D ) .

### 6.2 Oberflächenvorbereitung

Die Oberflächenrauheit  $Ra \leq 0,2$  µm muss eben sein , ohne Oxidschicht oder Risse.

Verwenden Sie zum Schleifen Diamantschleifpapier der Körnung 600# bis 2500# und zum Polieren eine Polierflüssigkeit aus Aluminiumoxid mit 0,25 µm .

### 6.3 Anzahl der Proben

Jede Partie muss mindestens 3 Exemplare umfassen, in Sonderfällen kann die Anzahl auf 5 erhöht werden, um die Repräsentativität zu gewährleisten.

---

## 7 Prüfverfahren

### 7.1 Gerätekalibrierung

Überprüfung von Härteprüfgeräten nach ISO 6507-2, einschließlich Kalibrierung von Prüfkraft, Eindringkörper und Messsystem.

### 7.2 Prüfbedingungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wählen Sie die dem Werkstoff entsprechende Prüfkraft (siehe Tabelle 1).

Stellen Sie sicher, dass die Probenoberfläche vor dem Beladen sauber und frei von Staub oder Öl ist.

### 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und richten Sie sie waagrecht aus.

Wählen Sie eine Testkraft und wenden Sie die Last 10 bis 15 Sekunden lang an.

Nach der Entlastung werden die Längen der beiden Diagonalen des Eindrucks,  $d_1$  und  $d_2$ , mit Hilfe eines Mikroskops gemessen.

Berechnen Sie die durchschnittliche Diagonallänge  $d = (d_1 + d_2) / 2$ .

Messen Sie mindestens 3 verschiedene Stellen auf der Probe mit einem Abstand von  $\geq 2,5$  mm.

### 7.4 Berechnung der Ergebnisse

Vickershärte berechnen:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Berechnen Sie den Durchschnitt:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Wobei  $HV_i$  ist ein einzelner Messwert und  $n$  ist die Anzahl der Messungen.

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Achten Sie darauf, dass die Messwertabweichung  $< \pm 2,0$  % ist.

## 8 Prüfkraftauswahl

| Materialtyp       | Empfohlene Prüfkraft (N) | Typischer Härtebereich (HV) |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Hartmetall        | 9,807 - 98,07            | 1000 - 2000                 |
| Gehärteter Stahl  | 9,807 - 294,2            | 500 - 1000                  |
| Nichteisenmetalle | 1.961 - 9.807            | 50 - 200                    |

Hinweis: Die Prüfkraft sollte entsprechend der Materialhärte und Probendicke gewählt werden.

## 9 Ergebnisauswertung

### 9.1 Härtebereich

Der Härtewert sollte mit den Materialeigenschaften übereinstimmen, beispielsweise liegt der Härtebereich von YG6-Hartmetall bei 1400–1600 HV.

### 9.2 Abweichungsbewertung

Die drei Messpunkte sind  $< \pm 2,0$  % und die Standardabweichung ist  $< 20$  HV, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.3 Einflussfaktoren

**Oberflächenrauheit** : Ra >0,2 µm kann zu einem **um** 5–10 % niedrigeren Härtewert führen.

**Prüfkraft** : Eine Kraftabweichung von ±1,0 % kann zu einer Abweichung **von** 2–3 % im Ergebnis führen.

**Ladezeit** : **Zeiten** <10 s oder >15 s können die Form des Eindrucks beeinflussen.

## 10 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Beispielinformationen: Materialart, Marke, Größe.

Prüfbedingungen: Härteprüfermodell, Prüfkraft, Belastungszeit, Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: Härtewert an jedem Punkt, Durchschnittswert, Standardabweichung und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es die technischen Anforderungen erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Härte typischer Metallwerkstoffe

| Materialtyp       | Marke/Staat | Härtebereich (HV) | Typische Anwendungen    |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------------------|
| Hartmetall        | YG6         | 1400-1600         | Bergbaubohrer           |
| Gehärteter Stahl  | 42CrMo      | 500-700           | Mechanische Komponenten |
| Nichteisenmetalle | Cu-ETP      | 50-100            | Elektromaterialien      |

## Anhang B (Informativer Anhang) Umwelanforderungen

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

ISO 6507-2:2018

Metallische Werkstoffe - Vickers-Härteprüfung

Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt Verfahren zur Verifizierung und Kalibrierung von Vickers-Härteprüfmaschinen zur Bestimmung der Vickershärte metallischer Werkstoffe (einschließlich Hartmetalle) gemäß ISO 6507-1 fest. Sie umfasst direkte und indirekte Verifizierungsverfahren zur Sicherstellung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Härtemessungen. Diese Norm gilt für Makro- und Mikro-Vickers -Härteprüfmaschinen mit einem Prüfkraftbereich von 1,961 N (0,2 kgf ) bis 1,177 N (120 kgf ) und umfasst Verfahren zur regelmäßigen Inspektion und Wartung.

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 6507-1:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren

ISO 6507-3:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 3: Kalibrierung von Vergleichsplatten

Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

3 Begriffe und Definitionen

Dieses Dokument wendet die in ISO 6507-1:2018 angegebenen Begriffe und Definitionen an und enthält die folgenden Definitionen:

**Direkte Überprüfung** : Der Prozess der Überprüfung der Leistung eines Vickers-Härteprüfgeräts durch direkte Messung seiner Komponenten wie Prüfkraft, Eindringkörpergeometrie und Messsystem.

**Indirekte Überprüfung** : Der Prozess der Überprüfung der Leistung einer Vickers-Härteprüfmaschine durch Testen eines standardisierten Referenzblocks.

**Vickershärte (HV )** : Der Härtewert wird durch das Verhältnis der aufgetragenen Prüfkraft zur Eindruckoberfläche bestimmt, mit der Einheit HV.

**Prüfkraft** : Die vom Eindringkörper auf die Probe ausgeübte Kraft, ausgedrückt in Newton (N) oder Kilogramm ( kgf ).

4 Allgemeine Anforderungen

4.1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für alle Vickers-Härteprüfmaschinen und deckt den Prüfkraftbereich von 1,961 N bis 1,177 N ab, einschließlich manueller, halbautomatischer und vollautomatischer Maschinen.

4.2 Verantwortung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Überprüfung und Kalibrierung muss von qualifiziertem Personal oder geschultem Bedienpersonal gemäß den Anforderungen der ISO/IEC 17025 durchgeführt werden.

#### 4.3 Frequenz

**Erste Überprüfung** : Wird durchgeführt, nachdem das Härteprüfgerät geliefert oder repariert wurde.

**Regelmäßige Überprüfung** : Mindestens alle 12 Monate oder nach erheblicher Nutzung (z. B. 10.000 Tests).

**Zwischenprüfung** : Führen Sie vor jedem Gebrauch eine einfache Prüfung durch , um sicherzustellen, dass die Grundfunktionen normal sind.

---

### 5 Direkte Verifizierung

#### 5.1 Überprüfung der Prüfkraft

**Ausrüstung** : Verwenden Sie einen kalibrierten Kraftsensor mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5\%$ .

**Programm** :

Wenden Sie eine Testkraft (1,961 N bis 1,177 N) an und notieren Sie den tatsächlichen Kraftwert. Stellen Sie sicher, dass die Kraftwertabweichung innerhalb von  $\pm 1,0\%$  liegt.

**Aufzeichnen** : Zeichnen Sie den Kraftwert und die Abweichung jeder Messung auf.

#### 5.2 Überprüfung der Eindringkörpergeometrie

**Ausrüstung** : Verwenden Sie ein optisches Mikroskop oder eine Standard-Eindruckvergleichsmethode mit einer Vergrößerung von  $\geq 200\times$ .

**Programm** :

Überprüfen Sie den oberen Winkel ( $136^\circ \pm 0,5^\circ$ ) und den Spitzenradius ( $< 0,002\text{ mm}$ ) des Diamanteindringkörpers.

Stellen Sie sicher, dass der Eindringkörper keine Risse oder Abnutzung aufweist.

**Aufzeichnen** : Zeichnen Sie die Druckkopfparameter und Inspektionsergebnisse auf.

#### 5.3 Verifizierung des Messsystems

**Ausrüstung** : Verwenden Sie ein kalibriertes Mikroskop mit einer Auflösung von  $\leq 0,001\text{ mm}$ .

**Programm** :

Messen Sie die diagonale Länge des Standardeindrucks mit einer Abweichung von  $\leq \pm 0,5\%$ .

Überprüfen Sie die Konsistenz des Messsystems über den gesamten Vergrößerungsbereich.

**Aufzeichnen** : Zeichnen Sie diagonale Längenmessungen und Abweichungen auf.

---

### 6 Indirekte Verifizierung

#### 6.1 Anforderungen an Referenzkörper

Bei Verwendung von nach ISO 6507-3 kalibrierten Vergleichskörpern deckt der Härtebereich typische Werte innerhalb des Prüfkraftbereichs ab .

Die Oberflächenrauheit des Referenzkörpers beträgt  $Ra \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$  .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 6.2 Testdurchführung

**Vorbereitung :** Wählen Sie mindestens 5 Referenzblöcke mit unterschiedlichen Härtewerten aus.

**bedienen :**

An jedem Referenzblock wurden mindestens 5 Messungen mit einem Abstand von  $\geq 2,5$  mm durchgeführt.

Notieren Sie den Härtewert für jede Messung.

**berechnen :**

Berechnen Sie den mittleren Härtewert und die Standardabweichung.

Stellen Sie sicher, dass der gemessene Wert innerhalb von  $\pm 2,0$  % des Referenzblock-Kalibrierungswerts liegt .

## 6.3 Ergebnisauswertung

Wenn die Abweichung  $\pm 2,0$  % überschreitet, muss das Härteprüfgerät eingestellt oder repariert und erneut überprüft werden.

---

## 7 Kalibrierung

### 7.1 Kalibrierzyklus

Die Kalibrierung sollte nach jeder direkten Überprüfung oder nach einem Fehler bei der indirekten Überprüfung durchgeführt werden.

Es wird empfohlen, einmal im Jahr eine Kalibrierung durchzuführen oder eine Anpassung entsprechend der Nutzungshäufigkeit vorzunehmen.

### 7.2 Kalibriervorgang

**Kalibrierung der Testkraft :** Verwenden Sie Standardgewichte, um den Kraftwert anzupassen, die Abweichung beträgt  $\leq \pm 0,5$  %.

**Eindringkörperkalibrierung :** Ersetzen oder schleifen Sie den Eindringkörper , um sicherzustellen, dass die Geometrie den Anforderungen entspricht.

**Kalibrierung des Messsystems :** Verwenden Sie eine Standardskala zur Justierung des Mikroskops mit einer Abweichung von  $\leq \pm 0,2$  %.

### 7.3 Kalibrierzertifikat

Legen Sie ein Kalibrierungszertifikat mit Gerätenummer, Kalibrierungsdatum, Unterschrift des Bedieners und Unsicherheitsanalyse vor.

---

## 8 Wartung und Aufzeichnungen

### 8.1 Wartung

Reinigen Sie den Druckkopf und das Messsystem regelmäßig, um Staub oder Öl zu vermeiden.

Überprüfen Sie die elektrischen Anschlüsse und mechanischen Teile, um sicherzustellen, dass nichts locker ist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 8.2 Aufzeichnungen

Bewahren Sie Aufzeichnungen über jede Überprüfung und Kalibrierung mindestens 5 Jahre lang auf, einschließlich Rohdaten und Ergebnisanalyse.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Durometermodell und Seriennummer.

Testdatum und Umgebungsbedingungen (Temperatur 10 °C bis 35 °C, Luftfeuchtigkeit 30 % – 70 %).

Direkte Überprüfung der Ergebnisse (Prüfkraft, Eindringkörper, Messsystemdaten).

Ergebnisse der indirekten Verifizierung (Referenzblocknummer, Messwert, Abweichung).

Kalibrierungsergebnisse (Daten vor und nach der Anpassung, Unsicherheit).

Unterschrift der prüfenden und kalibrierenden Person.

## Anhang A (Informativer Anhang) Typische Referenzwerte für Verifizierungsparameter

| Prüfkraft<br>(N) | Kraftabweichung<br>( %) | Abweichung<br>des<br>Eindringkörper-Spitzenwinkels<br>(°) | Messsystemabweichung<br>(%) |
|------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 9.807            | ±1,0                    | ±0,5                                                      | ±0,5                        |
| 98,07            | ±1,0                    | ±0,5                                                      | ±0,5                        |
| 1177             | ±1,0                    | ±0,5                                                      | ±0,5                        |

## Anhang B (Informativer Anhang) Umwelanforderungen

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 23 ± 2 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Zusammenfassen

ISO 6507-2:2018 „Metallische Werkstoffe – Vickers-Härteprüfung, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten“ bietet ein international standardisiertes Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung von Vickers-Härteprüfgeräten und gewährleistet die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch direkte und indirekte Methoden. Die Umsetzung dieser Norm trägt dazu bei, die Qualitätskontrolle der Härteprüfung zu verbessern und technische Unterstützung bei der Leistungsbewertung metallischer Werkstoffe (einschließlich Hartmetall) zu bieten.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

ISO 6507-3:2018

Metallische Werkstoffe - Vickers-Härteprüfung

Teil 3: Kalibrierstandards

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Kalibrierverfahren für Standardhärteblöcke für die Vickers-Härteprüfung fest, um die Genauigkeit und Rückverfolgbarkeit der Härtewerte zu gewährleisten. Sie ist für die Vickers-Härteprüfung von metallischen Werkstoffen (einschließlich Hartmetall) anwendbar. Der Härtebereich der Standardhärteblöcke reicht von 20 HV bis 2000 HV, der Prüfkraftbereich von 1,961 N (0,2 kgf) bis 1,177 N (120 kgf), einschließlich der Makro-Vickers -Härte (Prüfkraft 9,807 N bis 1,177 N) und der Mikro-Vickers -Härte (Prüfkraft 1,961 N bis 9,807 N). Diese Norm gilt für Kalibrierlabore und Anwender von Härteprüfgeräten zur Überprüfung der Leistung von Vickers-Härteprüfmaschinen.

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 6507-1:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren

ISO 6507-2:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

3 Begriffe und Definitionen

Dieses Dokument wendet die in ISO 6507-1:2018 angegebenen Begriffe und Definitionen an und enthält die folgenden Definitionen:

**Standardblock** : Ein Metallblock mit bekanntem Härtewert und gleichmäßiger Mikrostruktur, der zur Kalibrierung einer Vickers-Härteprüfmaschine verwendet wird.

**Kalibrierung** : Der Vorgang der Bestimmung des Härtewerts und seiner Unsicherheit eines Standardblocks durch Vergleich mit einem höherwertigen Standard.

**Rückführbarkeit** : Eigenschaft, Messergebnisse durch eine lückenlose Vergleichskette auf internationale oder nationale Standards zu beziehen.

**Vickershärte (HV)** : Der Härtewert wird durch das Verhältnis der aufgebrachten Prüfkraft zur Eindruckoberfläche bestimmt, mit der Einheit HV.

4 Standardblockanforderungen

4.1 Materialanforderungen

Das Standardblockmaterial sollte eine gleichmäßige Mikrostruktur mit einer Härteabweichung von  $<\pm 1,0\%$  aufweisen.

Gängige Werkstoffe: Gehärteter Stahl, Hartmetall oder Kupferlegierungen im Härtebereich von 20

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV bis 2000 HV.

Oberflächenrauheit  $R_a \leq 0,1 \mu m$ , keine Risse, Oxidschicht oder Einschlüsse.

#### 4.2 Größenanforderungen

Empfohlene Größe: Durchmesser 50 mm oder 50×50 mm, Dicke  $\geq 6$  mm (Makro-Vickers) oder  $\geq 1$  mm (Mikro-Vickers).

Die Ebenheitsabweichung der Prüffläche beträgt  $< 0,005$  mm.

#### 4.3 Härtegleichmäßigkeit

Die Härteabweichung der Normblock-Prüffläche beträgt  $< \pm 1,0$  %, nachgewiesen durch Messung an mindestens 5 Punkten.

---

### 5. Kalibriergeräte

#### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Erfüllt die Anforderungen von ISO 6507-2, Prüfkraftgenauigkeit  $\pm 0,5$  %, Eindringkörper-Spitzenwinkel  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ .

Die Auflösung des Messsystems beträgt  $\leq 0,001$  mm und die Abweichung beträgt  $< \pm 0,5$  %.

#### 5.2 Umweltkontrolle

Temperatur:  $20^\circ C \pm 1^\circ C$ .

Luftfeuchtigkeit: 30 % bis 70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

#### 5.3 Referenzgeräte zur Kalibrierung

Bei Verwendung national oder international anerkannter Standardblöcke höherer Güte liegt die Härteunsicherheit bei  $< \pm 0,5$  %.

---

### 6 Kalibriervorgang

#### 6.1 Vorbereitung

Reinigen Sie die Oberfläche des Standardblocks, um sicherzustellen, dass kein Staub oder Öl vorhanden ist.

Kalibrieren Sie Vickers-Härteprüfer gemäß ISO 6507-2.

#### 6.2 Prüfbedingungen

Wählen Sie die Prüfkraft: entsprechend dem Härtebereich des Normblocks (siehe Tabelle 1).

Ladezeit: 10 bis 15 Sekunden, Genauigkeit  $\pm 1$  Sekunde.

#### 6.3 Kalibriervorgang

Messen Sie mindestens 5 gleichmäßig verteilte Positionen auf der Testoberfläche des Standardblocks mit einem Abstand von  $\geq 2,5$  mm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$d_1$  und  $d_2$  jeder Vertiefung wurden gemessen, und der Durchschnittswert  $d = (d_1 + d_2)/2$  berechnet.

Vickershärte berechnen:  $HV = 1,8544 \cdot F/d^2$

Dabei ist F die Prüfkraft (N) und d die durchschnittliche Diagonallänge (mm).

#### 6.4 Ergebnisverarbeitung

Berechnen Sie den durchschnittlichen Härtewert von 5 Messpunkten:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{5}$$

Berechnen Sie die Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{4}}$$

Stellen Sie sicher, dass die Härteabweichung  $< \pm 1,0 \%$  und die Standardabweichung  $< 5$  HV ist.

#### 7 Prüfkraftauswahl

| Härtebereich (HV) | Empfohlene Prüfkraft (N) | Anwendung              |
|-------------------|--------------------------|------------------------|
| 20 - 200          | 1.961 - 9.807            | Mikroskopische Vickers |
| 200 - 1000        | 9,807 - 98,07            | Makro Vickers          |
| 1000 - 2000       | 98,07 - 294,2            | Hartmetallprüfung      |

#### 8 Unsicherheitsbewertung

##### 8.1 Quellen der Unsicherheit

Abweichung der Prüfkraft:  $\pm 0,5 \%$  kann zu einer Härteabweichung von  $\pm 1,0 \%$  führen.

Diagonale Messabweichung:  $\pm 0,5 \%$  kann zu einer Härteabweichung von  $\pm 1,0 \%$  führen.

Temperaturschwankungen:  $\pm 1^\circ\text{C}$  können zu einer Härteabweichung von  $\pm 0,5\%$  führen.

##### 8.2 Unsicherheitsberechnung

Umfassende Unsicherheit U (erweiterte Unsicherheit,  $k=2$ ):

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{force}}^2 + u_{\text{diagonal}}^2 + u_{\text{temp}}^2}$$

Typische Unsicherheit:  $\pm 2 \%$  (ca.  $\pm 20$  HV bei Härtewerten von 1000 HV).

#### 9 Kalibrierzertifikat

Das Kalibrierzertifikat sollte folgendes enthalten:

Standardblocknummer und Materialinformationen.

Kalibrierungsdatum und Umgebungsbedingungen (Temperatur  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , Luftfeuchtigkeit  $30 \%$  –  $70 \%$ ).

Prüfkraft- und Härtewert, Mittelwert und Standardabweichung von 5 Messpunkten.

Unsicherheitsanalyse (erweiterte Unsicherheit,  $k=2$ ).

Name und Unterschrift der Kalibrierstelle.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 10 Wartung und Verwendung von Standardblöcken

### 10.1 Wartung

Um Oxidation oder Kontamination zu vermeiden, in einem Exsikkator aufbewahren.  
Überprüfen Sie regelmäßig den Oberflächenzustand. Wenn die Oberflächenrauheit  $Ra > 0,1 \mu m$  ist, muss nachpoliert werden.

### 10.2 Nutzung

Reinigen Sie die Oberfläche vor jedem Gebrauch, um zu vermeiden, dass Staub oder Öl die Messung beeinträchtigen.

Nach mehr als 100-maligem Gebrauch ist eine Neukalibrierung erforderlich.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Härte typischer Standardblöcke

| Materialtyp      | Härtebereich (HV) | Prüfkraft (N) | Typische Anwendungen                         |
|------------------|-------------------|---------------|----------------------------------------------|
| Hartmetall       | 1400-1600         | 98,07         | Kalibrierung des Hartmetalltests             |
| Gehärteter Stahl | 500-700           | 49,03         | Kalibrierstahlprüfung                        |
| Kupferlegierung  | 50-100            | 4.903         | Kalibrierung für die Nichteisenmetallprüfung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Umwelanforderungen

Temperatur:  $20^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ .

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $< 0,02 \text{ mm/m}$ .

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

ISO 3327:2009

**Prüfverfahren für die Druckfestigkeit von Hartmetall**  
**Hartmetalle – Bestimmung der Biegebruchfestigkeit**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Biegebruchfestigkeit von Hartmetall durch Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuch bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) fest, einschließlich Prüfprinzip, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm ist anwendbar auf Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie auf Hartmetall mit anderen Carbiden (wie TaC, TiC, VC). Diese Norm ist nicht anwendbar auf beschichtetes Hartmetall oder Hartmetall nach Oberflächenverfestigung (z. B. Druckfestigkeitstest der aufgekohlten Schicht).

Hinweis: Die „Druckfestigkeit“ wird in dieser Norm je nach Anwenderwunsch als Querbruchfestigkeit (TRS) interpretiert. Da die Druckfestigkeit von Hartmetall in der Regel deutlich höher ist als seine Biegefestigkeit, konzentriert sich ISO 3327:2009 hauptsächlich auf die Prüfung der Querbruchfestigkeit.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3878:1983 Hartmetall – Vickers-Härte und Rockwell-Härteprüfung

ISO 4506:1979 Hartmetall – Herstellung von Probekörpern und Prüfbedingungen

ISO 3611:2010 Hartmetall – Terminologie

ISO 7500-1:2015 Metallische Werkstoffe – Kraftnormale für Zug- und Druckprüfungen, Teil 1: Kalibrierkraftnormale

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ISO 3611:2010 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Hartmetalle : Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

Querbruchfestigkeit (TRS): Die maximale Spannung, der eine Hartmetallprobe in einem Dreipunkt- oder Vierpunkt-Biegeversuch standhält, gemessen in MPa, spiegelt die Fähigkeit des Materials wider, einem Biegebruch zu widerstehen.

Dreipunktbiegung: Ein Biegeversuch, bei dem an zwei Auflagepunkten eine punktförmige Belastung auf die Probe ausgeübt wird.

Vierpunktbiegung: Ein Biegeversuch, bei dem die Probe zwischen zwei Auflagepunkten und zwei Belastungspunkten gleichmäßig belastet wird.

**4 Prüfprinzip**

Bei der Biegebruchfestigkeitsprüfung wird die Hartmetallprobe einer Drei- oder Vierpunkt-

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Biegebelastung ausgesetzt, bis sie bricht. Die maximale Bruchlast wird aufgezeichnet und die Biegebruchfestigkeit (TRS) anhand der Probengeometrie berechnet. Die Berechnungsformel variiert je nach Prüfmethode:

Dreipunktbiegung:

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Vierpunktbiegung:

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

In:

F ist die maximale Bruchlast in N;

L ist die Stützweite in mm;

$l_1$  ist der Abstand zwischen den Belastungspunkten in mm (nur bei Vierpunktbiegung);

b ist die Breite der Probe in mm;

h ist die Probendicke in mm.

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Universalprüfmaschine

Lastbereich: 0–50 kN, Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ .

Ladegeschwindigkeitsregelung: 0,1–1 mm/min, Abweichung  $< \pm 0,05$  mm/min.

Erfüllt die Kalibrierungsanforderungen von ISO 7500-1:2015.

### 5.2 Vorrichtung

Dreipunkt-Biegevorrichtung: Auflagerweite 14,5 mm ( $\pm 0,05$  mm), Auflagerpunktdurchmesser 2 mm ( $\pm 0,02$  mm).

Vierpunktbiegevorrichtung: Auflagerweite 20 mm ( $\pm 0,05$  mm), Belastungspunktabstand 10 mm ( $\pm 0,05$  mm), Auflagerpunktdurchmesser 2 mm ( $\pm 0,02$  mm).

Die Oberfläche der Leuchte ist glatt und weist keine Kanten oder Ecken auf.

### 5.3 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm.

Digitaler Mikrometer: Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm.

### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Probenform: Quader, Abmessungen  $20 \times 6,5 \times 5,25$  mm ( $\pm 0,05$  mm), oder gemäß Protokoll angepasst.

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2$   $\mu\text{m}$  (poliert).

Die Kanten der Proben wurden um  $0,1 \times 45^\circ$  abgeschrägt, um die Spannungskonzentration zu verringern.

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 5 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>5\%$ ) muss die Probenanzahl auf 10 erhöht werden.

## 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

# 7 Testschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Die Universalprüfmaschine wird mit einem Standardkraftsensor mit einer Lastabweichung von  $< \pm 0,5$  % kalibriert.

Überprüfen Sie die Genauigkeit der Vorrichtung. Die Abweichung des Stützpunktabstands beträgt  $< \pm 0,05$  mm.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 7.3 Testbetrieb

Legen Sie die Probe in eine Drei- oder Vierpunkt-Biegevorrichtung und achten Sie darauf, dass die Probe waagrecht liegt.

Ladegeschwindigkeit: 0,5 mm/min ( $\pm 0,05$  mm/min).

Langsam belasten, bis die Probe bricht und die maximale Bruchlast  $F_F$  notieren  $F(N)$ .

Verwenden Sie einen Messschieber oder ein Mikrometer, um die Breite der Probe  $b$  und die Dicke  $h$  zu messen.  $h$  (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm).

## 7.4 Ergebnisberechnung

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Berechnen Sie die Biegebruchfestigkeit entsprechend der Versuchsart:

Dreipunktbiegung:

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Vierpunktbiegung:

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

Nehmen Sie den Durchschnittswert von 5 Proben mit einer Abweichung von  $\leq \pm 5\%$ .

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Biegebruchfestigkeitsbereich

Die Biegebruchfestigkeit von Hartmetall beträgt üblicherweise 1500–3000 MPa, und der genaue Bereich hängt von der Sorte und dem Co-Gehalt ab:

YG6 (6 % Co): 2000–2400 MPa.

YG8 (8 % Co): 1800–2200 MPa.

YT15 (5 % Co + TiC) : 1600–2000 MPa.

### 8.2 Abweichungsbewertung

zwischen den 5 Proben beträgt  $\leq \pm 5\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der TRS-Wert die technischen Anforderungen der Sorte überschreitet, muss die Ursache analysiert werden (z. B. Probenfehler, ungleichmäßige Belastung).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Probenqualität: Eine Oberflächenrauheit  $R_a > 0,2 \mu\text{m}$  oder Kantenabsplitterungen führen zu einem niedrigen TRS (Abweichung  $> 10\%$ ).

Belastungsgeschwindigkeit: Geschwindigkeiten  $> 1 \text{ mm/min}$  bzw.  $< 0,1 \text{ mm/min}$  beeinflussen die Bruchlast (Abweichung  $\pm 5\%$ ).

Vorrichtungsgenauigkeit: Abweichungen im Stützpunktstand  $> 0,05 \text{ mm}$  oder Unebenheiten führen zu Spannungskonzentrationen (Abweichung  $> 5\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige WC-Korngröße ( $> \pm 0,2 \mu\text{m}$ ) oder ungleichmäßige Co-Phasenverteilung können zu TRS-Schwankungen ( $> \pm 6\%$ ) führen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe, Co-Gehalt.

Testbedingungen: Gerätemodell, Vorrichtungstyp (Dreipunkt/Vierpunkt), Ladegeschwindigkeit (0,5 mm/min), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

F jedes Probekörpers F, Breite b, Dicke h, TRS-Wert und Mittelwert, Abweichung.

Bewertungsfazit: ob es den technischen Anforderungen der Marke entspricht.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Querbruchfestigkeit typischer Hartmetalle

| Marke | Co-Gehalt<br>( Gew.- %) | Biegebruchfestigkeit<br>(MPa) | Korngröße<br>( μm ) | Typische Anwendungen            |
|-------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                       | 2000-2400                     | 0,8-1,2             | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                       | 1800-2200                     | 0,8-1,2             | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                       | 1600-2000                     | 0,6-1,0             | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Anhang C (Informativer Anhang) Vergleich von Dreipunkt- und Vierpunktbiegung

| Parameter              | Dreipunktbiegung        | Vierpunktbiegung           |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Stützweite L L L       | 14,5 mm (±0,05 mm)      | 20 mm (±0,05 mm)           |
| Ladepunktstand l l l l | -                       | 10 mm (±0,05 mm)           |
| Spannungsverteilung    | Fokus auf den Ladepunkt | Gleichmäßig im Ladebereich |
| Geltungsbereich        | Standardtests           | Komplexe Spannungsanalyse  |

### Zusammenfassen

ISO 3327:2009 „Prüfverfahren für die Druckfestigkeit von Hartmetall“ ( eigentlich Biegebruchfestigkeitsprüfung) bietet ein standardisiertes Verfahren zur Biegebruchfestigkeitsprüfung von Hartmetall und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Hartmetall und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Schneidwerkzeuge, Bergbaubohrer und Formen.

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

Anhang:

ISO 28080:2021

Hartmetall-Verschleißtestverfahren  
Hartmetalle – Abriebtests für Hartmetalle

1 Geltungsbereich

Diese Norm legt ein allgemeines Prüfverfahren zur Bestimmung des Verschleißverhaltens von Hartmetall fest. Der Test eignet sich für Laborumgebungen, in denen Verschleißschäden simuliert werden müssen. Das Prüfverfahren umfasst Prüfinformationen unter verschiedenen Bedingungen: a) Verwendung von gegenüberliegenden Rädern unterschiedlicher Steifigkeit (z. B. Stahlräder oder Gummiräder); b) Nass- und Trockenprüfung; c) Schleifmittel unterschiedlicher Partikelgröße; d) unterschiedliche chemische Umgebungen. Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase sowie für Hartmetalle mit Zusatz anderer Karbide (z. B. TaC, TiC, VC). Diese Norm gilt nicht für beschichtete Hartmetalle oder Hartmetalle nach Oberflächenverfestigung (z. B. Verschleißtest der aufgekohlten Schicht).

2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

ISO 3878:1983 Hartmetall – Härteprüfung nach Vickers

ISO 3611:2010 Hartmetall – Terminologie

ASTM G65-04(2010) Standardprüfverfahren – Abriebprüfung mit trockenem Sand/Gummirad

**ASTM B611-13 Standardprüfverfahren für die Verschleißfestigkeit harter Werkstoffe unter hoher Beanspruchung**

ASTM G105-02(2013) Standardprüfverfahren – Nasser Sand/Gummi-Rad-Abriebtest

3 Begriffe und Definitionen

Diese Norm übernimmt ISO 3611:2010 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Hartmetalle : Ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Haupthartphase und Kobalt (Co) als Bindephase, hergestellt durch ein pulvermetallurgisches Verfahren.

Abrieb: Materialverlust durch relatives Gleiten harter Partikel oder rauher Oberflächen.

Verschleißrate: Das Volumen oder die Masse des pro Zeiteinheit oder Gleitdistanz verlorenen Materials, ausgedrückt in mm<sup>3</sup>/m oder mg/m.

Gegenfläche Rad: Das Rad, das mit der Probe in Kontakt kommt und eine Relativbewegung erzeugt; es kann aus Stahl oder Gummi bestehen.

Schleifmittel: Harte Partikel wie Quarzsand oder Aluminiumoxid, die zur Simulation von Verschleiß verwendet werden.

4 Prüfprinzip

Bei der Verschleißprüfung wird die Hartmetallprobe unter festgelegten Bedingungen mit dem

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gegenrad in Kontakt gebracht, eine bestimmte Last und Gleitstrecke aufgebracht, Schleifmittel (z. B. trockener oder nasser Sand) verwendet, um die Verschleißumgebung zu simulieren, den Massen- oder Volumenverlust der Probe zu messen und die Verschleißrate zu berechnen. Die Prüfmethode orientiert sich an den Normen ASTM G65 (trockener Sand/Gummirad), ASTM B611 (Hochspannungsverschleiß) und ASTM G105 (nasser Sand/Gummirad) und ergänzt diese. Sie ist auf unterschiedliche Verschleißbedingungen anwendbar.

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Verschleißprüfgerät

Verschleißprüfgerät mit einstellbarer Last, Lastbereich 5-130 N, Genauigkeit  $\pm 0,5$  N.

Gleitgeschwindigkeit: 0,1–1 m/s, Abweichung  $< \pm 0,05$  m/s.

Gleitdistanz: einstellbar bis 1000 m, Genauigkeit  $\pm 1$  m.

### 5.2 Gegenräder

Stahlrad: Härte HRC 55-60, Durchmesser 228 mm ( $\pm 1$  mm), Breite 12,7 mm ( $\pm 0,1$  mm).

Gummirad: Härte Shore A 60-65, Durchmesser 228 mm ( $\pm 1$  mm), Breite 12,7 mm ( $\pm 0,1$  mm).

### 5.3 Strahlmittelversorgungssystem

Schleifmittel: Quarzsand (Korngröße 200–300  $\mu$  m) oder Aluminiumoxid (Korngröße 100–200  $\mu$  m), Reinheit  $> 98$  %.

Förderleistung: 250-300 g/min, Abweichung  $< \pm 5$  g/min (trocken).

Nasstest: Suspension auf Wasserbasis, Schleifmittelkonzentration 10–20 Gew.-%.

### 5.4 Messwerkzeuge

Präzisionswaage: Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg.

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm.

Oberflächenprofilmesser: Misst die Verschleißtiefe mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Kontrollierte chemische Umgebungen (wie saure oder alkalische Lösungen).

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Abmessungen 76 × 25,4 × 6,35 mm ( $\pm 0,1$  mm), oder gemäß Protokoll angepasst.

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit Ra  $< 0,2$   $\mu$ m (poliert).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>10\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Marke (z. B. YG8, YT15) und Testelementen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

Nach dem Test wurde ein Ultraschallreiniger (40 kHz, 5 Min.) verwendet, um das restliche Schleifmittel zu entfernen.

## 6.5 Erstmessung

Messen Sie die Anfangsmasse (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg) und Dicke (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm) der Probe.

# 7 Testschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Die Kalibrierung des Prüfgeräts erfolgt mit einer Standardlast mit einer Abweichung von  $< \pm 0,5$  N. Überprüfen Sie den Zustand der gegenüberliegenden Räder, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Verschmutzung auf der Oberfläche vorhanden ist.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}80\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Chemische Umgebung: Wählen Sie gemäß Protokoll (z. B. deionisiertes Wasser,  $1\%$  HCl).

## 7.3 Testbetrieb

Montieren Sie die Probe auf dem Prüfgerät, bringen Sie sie mit dem gegenüberliegenden Rad in Kontakt und wenden Sie eine Last an ( $45\text{ N}$  werden empfohlen).

Testbedingungen auswählen:

Trockentyp: mit Stahlrad, Quarzsandzufuhr  $250\text{ g/min}$ , Gleitstrecke  $4300\text{ m}$ .

Nasstyp: Verwendung von Gummirädern, Zufuhr von nasser Sandsuspension, Gleitstrecke  $4300\text{ m}$ .

Starten Sie den Tester und zeichnen Sie die Gleitdistanz und den Probenverschleiß auf.

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test  $3\text{--}5$  Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse sicherzustellen.

## 7.4 Ergebnismessung

Nach dem Test wurden die Proben gereinigt, getrocknet und die endgültige Masse gemessen

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



(Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg).

Die Verschleißtiefe wurde mit einem Oberflächenprofilometer (Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm) gemessen.  
Berechnen Sie den Massenverlust:  $\Delta m = m_0 - m_1$  ( $m_0$  ist die Anfangsmasse,  $m_1$  ist die Endmasse).

## 7.5 Berechnung der Verschleißrate

Verschleißrate:

$$W = \frac{\Delta m}{L}$$

In:

W ist die Verschleißrate in mg/m;

$\Delta m$  ist der Massenverlust in mg;

L ist die Gleitstrecke in Metern.

Oder berechnen Sie die Volumenverschleißrate (Sie müssen die Dichte kombinieren):

$$V = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L}$$

In:

V ist die Volumenverschleißrate in mm<sup>3</sup>/m;

$\rho$  ist die Materialdichte in g/cm<sup>3</sup>.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Verschleißratenbereich

Die Verschleißraten von Hartmetall variieren je nach Testbedingungen und Sorte:

YG6 (6 % Co): trocken 0,5–1,0 mg/m, nass 0,3–0,7 mg/m.

YG8 (8 % Co): Trockentyp 0,7–1,2 mg/m<sup>3</sup>, Nasstyp 0,5–0,9 mg/m<sup>3</sup>.

YT15 (5 % Co + TiC) : trocken 0,4–0,8 mg/m, nass 0,2–0,6 mg/m.

### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben liegt bei  $< \pm 10$  %, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn die Verschleißrate den erwarteten Bereich überschreitet, muss die Ursache analysiert werden  
(z. B. ungleichmäßige Schleifpartikelgröße und Oberflächendefekte der Probe).

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Steifigkeit der Gegenräder: Die Verschleißrate von Stahlrädern ist höher als die von Gummirädern  
(Abweichung  $> 20$  %).

Abrasivpartikelgröße: Partikelgrößen  $> 300$   $\mu$ m erhöhen die Verschleißrate (Abweichung  $> 15$ %).

Chemische Umgebung: Saure Umgebungen (wie 1 % HCl) beschleunigen den korrosiven  
Verschleiß (Abweichung  $> 30$  %).

Belastung: Belastungen  $> 130$  N können zu Rissen in der Probe führen und die Ergebnisse  
beeinträchtigen.

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Marke, Chargennummer, Größe, Co-Gehalt.

Testbedingungen: Gerätemodell, Gegenradtyp (Stahl/Gummi), Last (N), Gleitdistanz (m), Schleifmittelart und Partikelgröße, Umgebung (nass/trocken/chemisch).

Prüfergebnisse: Ausgangsmasse, Endmasse, Masseverlust, Verschleißrate, Verschleißtiefe und Durchschnittswert, Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

### Anhang A (Informativer Anhang) Typische Referenzwerte für die Hartmetallverschleißrate

| Marke | Co-Gehalt<br>(Gew.-%) | Trockenverschleißrate<br>(mg/m) | Nassverschleißrate<br>(mg/m) | Typische Anwendungen            |
|-------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| YG6   | 6                     | 0,5-1,0                         | 0,3-0,7                      | Bergbaubohrer                   |
| YG8   | 8                     | 0,7-1,2                         | 0,5-0,9                      | Schneidwerkzeuge                |
| YT15  | 5                     | 0,4-0,8                         | 0,2-0,6                      | Werkzeuge zur<br>Endbearbeitung |

### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine Umgebung mit korrosiven Gasen (außer beim Testen spezifischer chemischer Umgebungen).

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

### Anhang C (Informativer Anhang) Beispiele für Verschleißtestbedingungen

| Testtyp  | Gegenrad    | Last (N) | Gleitstrecke (m) | Schleifmittel      | Umfeld |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------------|--------|
| Trocken  | Stahlfelgen | 45       | 4300             | Quarzsand 250 µm   | Luft   |
| Nass     | Gummirad    | 45       | 4300             | Nassschliff 200 µm | Wasser |
| Chemisch | Stahlfelgen | 45       | 2000             | Quarzsand 250 µm   | 1% HCl |

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

**ASTM B611-13 Standardprüfverfahren**

**— Hohe Spannungsverschleißfestigkeit für harte Werkstoffe**

**1 Geltungsbereich**

1.1 Dieses Standardprüfverfahren dient zur Prüfung der Verschleißfestigkeit harter Werkstoffe, vor allem Hartmetall, aber auch Keramik, Cermets und metallbasierter Hartbeschichtungen mit einer Härte über 55 HRC. Dieses Verfahren simuliert Verschleißbedingungen unter hoher Beanspruchung, bei denen die Schleifpartikel durch ein Stahlrad brechen und das Schleifmittel mit der Probe in Kontakt bringt. Im Gegensatz zu Verschleißprüfungen mit geringer Beanspruchung, bei denen Gummiräder verwendet werden (z. B. Verfahren G65, G105 und G75), wird bei diesem Verfahren Verschleiß unter hoher Beanspruchung simuliert, bei dem die Schleifpartikel brechen.

1.2 Bei dieser Prüfmethode wird eine wässrige Aufschlämmung mit Aluminiumoxidpartikeln als Schleifmittel verwendet. Das Schleifmittel wird mithilfe eines rotierenden Stahlrads, das in Linienkontakt mit dem rotierenden Rad steht und in die Aufschlämmung eingetaucht ist, über die flache Probenoberfläche gedrückt.

1.3 Wenn Einheiten im Zoll-Pfund-Format angegeben sind, wird auf SI-Einheiten verwiesen und ungefähre Entsprechungen werden in Klammern angegeben.

1.4 Diese Norm erhebt nicht den Anspruch, alle Sicherheitsaspekte abzudecken. Es liegt in der Verantwortung des Prüfers, für jede spezifische Situation geeignete Sicherheits- und Gesundheitspraktiken festzulegen und die Anwendbarkeit gesetzlicher Beschränkungen zu bewerten.

1.5 Dieser internationale Standard wurde in Übereinstimmung mit den Grundsätzen für die Erstellung internationaler Standards, Richtlinien und Empfehlungen des Ausschusses für technische Handelshemmnisse der Welthandelsorganisation erstellt.

---

**2 Bedeutung und Verwendung**

2.1 Die Gewinnung von Mineralien aus der Erdkruste erfordert üblicherweise den Einsatz von Metallwerkzeugen zum Brechen von Gestein. Diese Werkzeuge sind oft mit harten Materialien wie Hartmetall ummantelt, ummantelt oder beschichtet. Bohren, Brechen und Bewegen von Gestein verursacht dort, wo die Werkzeugoberfläche mit dem Gestein in Berührung kommt, hohen Verschleiß, wobei ein ausreichender Druck zum Brechen des Gesteins entsteht. Dieses Prüfverfahren simuliert diese Bedingungen und dient der Prüfung neuer Materialien für solche Anwendungen. Es kann auch als Qualitätskontrollinstrument für Anwendungen mit hohem Verschleiß wie Schlammumpen, Zerkleinerungsanlagen, Recyclingschneidern, Abbruchgeräten usw. eingesetzt werden.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

2.2 Die meisten Verschleißtests erfolgen mit geringer Belastung, wobei das Schleifmittel während des Tests relativ intakt bleibt. Bei hoher Belastung wird ein Anwendungsszenario simuliert, bei dem die Kräfte zwischen Schleifmittel und Werkzeug/Teil groß genug sind, um das Schleifmittel zu zerdrücken.

### 3 Begriffe und Definitionen

Verschleiß durch hohe Beanspruchung: Eine Verschleißart, bei der das Schleifmittel bei ausreichender Kraft bricht, verursacht durch den erzwungenen Kontakt des Stahlrads mit der Probe.

Verschleiß durch geringe Beanspruchung: Eine Verschleißart, bei der das Schleifmittel während des Tests relativ intakt bleibt, normalerweise verursacht durch Gummiräder.

Verschleißfestigkeit: Die Fähigkeit eines Materials, Verschleiß zu widerstehen, ausgedrückt als Verschleißvolumen oder Massenverlust.

### 4 Prüfmittel

#### 4.1 Verschleißprüfgerät

Besteht aus einem rotierenden Stahlrad (228,6 mm Durchmesser, 12,7 mm Breite), das sich mit  $200 \pm 10$  U/min dreht.

Das Stahlradmaterial ist gehärteter Stahl mit einer Härte von  $\geq 60$  HRC.

#### 4.2 Schleifmittel

Aluminiumoxidpartikel ( $Al_2O_3$ ) mit einer Partikelgröße von 200 bis 280 Mesh wurden verwendet, um eine wässrige Aufschlämmung mit einer Volumenkonzentration von 60 % herzustellen.

#### 4.3 Probenaufnahme

Linienkontakt mit dem Stahlrad und die Belastungskraft beträgt  $250 \pm 5$  N.

#### 4.4 Umweltkontrolle

Temperatur:  $15^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30 % bis 70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 5. Musteranforderungen

#### 5.1 Materialien

Hartbeschichtungen auf Karbid-, Keramik-, Cermet- oder Metallbasis mit einer Härte  $> 55$  HRC.

#### 5.2 Abmessungen

Probengröße:  $50,8 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm}$  (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe), Toleranz  $\pm 0,1 \text{ mm}$ .

Die Oberfläche ist glatt und weist eine Rauheit von  $Ra \leq 0,2 \mu\text{m}$  auf.

#### 5.3 Oberflächenvorbereitung

Verwenden Sie zum Schleifen Diamantschleifpapier der Körnung 600 bis 1200 und zum Polieren

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eine Polierflüssigkeit aus Aluminiumoxid der Körnung 0,25 µm .

#### 5.4 Anzahl der Proben

Für die statistische Analyse wurden drei Proben jedes Materials verwendet.

### 6 Prüfverfahren

#### 6.1 Gerätevorbereitung

Überprüfen Sie die Oberfläche des Stahlrads auf offensichtliche Abnutzung oder Risse und ersetzen Sie es gegebenenfalls.

Stellen Sie die Probenhalter so ein, dass die Belastungskraft  $250 \pm 5$  N beträgt.

#### 6.2 Testbetrieb

Die Probe wird in der Vorrichtung in Linienkontakt mit dem Stahlrad befestigt.

Geben Sie 200 ml Aluminiumoxidaufschlämmung in das Testgerät.

Drehen Sie das Stahlrad 600 Umdrehungen lang (ca. 3 Minuten) bei  $200 \pm 10$  U/min.

Nach dem Test die Probe entnehmen, mit wasserfreiem Ethanol reinigen und trocknen.

#### 6.3 Messung

Der Masseverlust der Proben wurde mit einer Präzisionswaage gemessen (Genauigkeit  $\pm 0,001$  g).

Notieren Sie die Anfangsmasse  $m_1$  und die Endmasse  $m_2$  und berechnen Sie den Massenverlust  $\Delta m = m_1 - m_2$ .

#### 6.4 Wiederholbarkeit

Wiederholen Sie den Test für jede Probe zweimal und ermitteln Sie den Durchschnittswert.

### 7 Ergebnisberechnung

#### 7.1 Verschleißrate

Die Verschleißrate wird als Masseverlust (g) oder Volumenverlust ( $\text{mm}^3$ ) ausgedrückt .

Der Volumenverlust kann berechnet werden, indem der Masseverlust durch die Materialdichte geteilt wird:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

wobei  $\rho$  die Materialdichte ( $\text{g/cm}^3$ ) ist .

#### 7.2 Relative Verschleißfestigkeit

Der Massenverlust der Probe wird mit dem Massenverlust eines Referenzmaterials (z. B. Standard-Hartmetall) verglichen und die relative Verschleißfestigkeit berechnet.

#### 7.3 Ergebnisauswertung

Stellen Sie sicher, dass die durchschnittliche Massenverlustabweichung der drei Proben  $\leq \pm 5$  %

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



beträgt, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

## 8 Einflussfaktoren

8.1 Schleifpartikelgröße: Eine Abweichung der Partikelgröße von 200–280 Mesh kann zu einer Abweichung von 5–10 % bei den Ergebnissen führen.

8.2 Belastungskraft: Eine Kraftabweichung von  $250 \pm 5$  N kann die Verschleißrate um 3 %–5 % beeinflussen.

8.3 Zustand des Stahlrads: Durch den Verschleiß der Radoberfläche kann sich der Testfehler um 2–4 % erhöhen.

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialart, Härte, Größe.

Testbedingungen: Radgeschwindigkeit, Belastungskraft, Schleifmitteltyp, Umgebungstemperatur (15 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 70 %).

Testergebnisse: Anfangsmasse, Endmasse, Massenverlust, Mittelwert und Abweichung.

Relative Verschleißfestigkeit (falls zutreffend).

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Typische Materialverschleiß-Referenzwerte

| Materialtyp                | Härte ( HRC) | Massenverlust (g) | Typische Anwendungen         |
|----------------------------|--------------|-------------------|------------------------------|
| Hartmetall ( YG6)          | 88           | 0,02-0,05         | Bergbaubohrer                |
| Keramik                    | 75           | 0,05-0,10         | Verschleißfeste Beschichtung |
| Metallbasierte Verkleidung | 60           | 0,10–0,15         | Zerkleinerungsanlagen        |

## Anhang B (Informativer Anhang) Umwelanforderungen

Temperatur: 15 °C bis 35 °C,  $23 \pm 2$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–70 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandesebenheit: Abweichung  $<0,02$  mm/m.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anhang:**

**ASTM E23-18**

**Kerbschlagbiegeversuch**

**Standardprüfverfahren für die Kerbschlagbiegeprüfung metallischer Werkstoffe**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Schlagabsorptionsenergie gekerbter Proben durch Charpy- oder Izod-Schlagversuche bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) oder niedriger Temperatur (-196 °C bis 0 °C) für metallische Werkstoffe fest, einschließlich Prüfgrundsätze, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm ist auf metallische Werkstoffe mit unterschiedlichen Kerbarten (wie Stahl, Hartmetall, Titanlegierung usw.) anwendbar, jedoch nicht auf nichtmetallische Werkstoffe oder Umgebungen mit Temperaturen über 35 °C.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Version. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Revisionen) dieser Norm.

ASTM E4-21 Standardverfahren zur Kalibrierung von Kraft-, Druck- und Verformungsprüfmaschinen

ASTM E23-16c Standardprüfverfahren für Kerbschlagbiegeversuche (Referenz der historischen Version)

ISO 148-1:2016 Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy, Teil 1: Prüfverfahren

ASTM E2298-19 Standardprüfverfahren – Instrumentierte Schlagprüfung

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ASTM E23-18 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Aufprallenergie: Die von der gekerbten Probe im Aufprallversuch absorbierte Energie, gemessen in Joule (J), spiegelt die Schlagzähigkeit des Materials wider.

Charpy-Test: Ein Test, bei dem eine freitragende Balkenprobe verwendet wird, um die Energieabsorption durch Pendelschlag zu messen.

Izod-Test: Ein Test zur Bestimmung der Energieabsorption durch Pendelschlag unter Verwendung einer einseitig gestützten Balkenprobe.

Kerbtyp: Zu den vorgefertigten Kerbformen auf der Probe gehören V-Kerbe (2 mm tief, 45°-Winkel, 0,25 mm Wurzelradius) und U-Kerbe (5 mm tief, 1 mm Wurzelradius).

**4 Prüfprinzip**

Beim Schlagversuch wird ein Pendel aus einer bestimmten Höhe auf eine vorgekerbte Metallprobe geworfen. Die verbleibende kinetische Energie (bzw. der Energieverlust) nach dem Bruch der Probe wird gemessen und die von der Probe absorbierte Schlagenergie berechnet. Diese Energie spiegelt

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

die Zähigkeit und das Bruchverhalten des Materials bei Hochgeschwindigkeitsbelastung wider. Der Test ist auf Charpy- oder Izod-Konfigurationen anwendbar. Die spezifische Formel lautet:

$$E = mgh - mgh'$$

In:

E ist die Aufprallabsorptionsenergie in J;

m ist die Masse des Pendels in kg;

g ist die Erdbeschleunigung, etwa 9,81 m/s<sup>2</sup> ;

h ist die Anfangshöhe in Metern;

h' ist die verbleibende Höhe nach dem Bruch in Metern (normalerweise indirekt durch den Pendelwinkel gemessen).

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Schlagprüfmaschine

Pendelschlagwerk mit Energiebereich von 150 J bis 750 J, Genauigkeit von ±1 J, kalibriert nach ASTM E4-21.

Pendelauslöshöhe: einstellbar, Ausgangswinkel 150°.

### 5.2 Probenaufnahme

Charpy-Vorrichtung: Auflagerspannweite 40 mm (±0,05 mm), Ebenheit der Auflagefläche <0,01 mm.

Izod-Klemme: Einzelstütze, Höhe 28 mm (± 0,05 mm), gleichmäßige Klemmkraft.

### 5.3 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit ±0,02 mm, wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Winkelmessgerät: Genauigkeit ±0,1°, dient zur Kalibrierung der Pendelposition.

### 5.4 Kryogene Ausrüstung (optional)

Kühlbox mit flüssigem Stickstoff oder Trockeneis, Temperaturbereich -196 °C bis 0 °C, Genauigkeit ±2 °C.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C (Raumtemperatur) oder -196 °C bis 0 °C (kalte Temperatur), 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenart

Charpy-Probe: Größe 55 × 10 × 10 mm (± 0,1 mm), Kerbe in der Mitte.

Izod-Probe: Abmessungen: 75 × 10 × 10 mm (± 0,1 mm), Kerbe 28 mm von einem Ende entfernt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 Spaltvorbereitung

V-Kerbe: Tiefe 2 mm ( $\pm 0,025$  mm), Winkel  $45^\circ$  ( $\pm 0,5^\circ$ ), Wurzelradius 0,25 mm ( $\pm 0,025$  mm).

U-förmige Kerbe: Tiefe 5 mm ( $\pm 0,025$  mm), Wurzelradius 1 mm ( $\pm 0,025$  mm).

Die Kerboberfläche ist glatt und gratfrei und wird durch Drahtschneiden oder Fräsen hergestellt.

## 6.3 Probenanforderungen

Die Oberfläche der Probe ist glatt, ohne Risse, Oxidschichten oder Verarbeitungsfehler.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  (poliert).

Die Kanten der Proben wurden um  $0,1 \times 45^\circ$  abgeschrägt, um die Spannungskonzentration zu verringern.

## 6.4 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $> 10$  J) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.5 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

## 6.6 Probenkennzeichnung

Die Proben sollten mit Chargennummer, Güte (z. B. YG8, 1045 Stahl) und Testgegenständen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung sollte den Testbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.7 Niedertemperaturbehandlung (optional)

Legen Sie die Probe in eine Kühlbox und halten Sie die angegebene Temperatur 15–30 Minuten lang aufrecht, um eine gleichmäßige Kühlung zu gewährleisten.

# 7 Testschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Die Kalibrierung des Schlagprüfgeräts erfolgt über ein Standardpendel mit einer Energieabweichung von  $< \pm 1$  J.

Überprüfen Sie die Vorrichtungs- und Kerbenmaße, die Abweichung beträgt  $\leq \pm 0,025$  mm.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$  (Raumtemperatur) oder  $-196^\circ\text{C}$  bis  $0^\circ\text{C}$  (niedrige Temperatur),  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  werden empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 7.3 Testbetrieb

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Montieren Sie die Probe in der Vorrichtung (Charpy- oder Izzy-Konfiguration) und achten Sie darauf, dass die Kerbe in die Richtung des Pendelschlags zeigt.

Lassen Sie das Pendel los und messen Sie die Aufprallenergie  $E_E$  (J).

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test 3–5 Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse sicherzustellen.

Wenn eine Prüfung bei niedrigen Temperaturen durchgeführt wird, muss die Probe unmittelbar (<5 s) nach der Entnahme aus der Kühlbox geprüft werden.

#### 7.4 Bruchflächenbeobachtung (optional)

Die Bruchflächen wurden mit einem optischen Mikroskop (50-fache Vergrößerung) beobachtet und die Bruchart (spröde oder duktil) aufgezeichnet.

### 8 Auswertung der Prüfergebnisse

#### 8.1 Stoßabsorptionsenergiebereich

Stoßabsorptionsenergiebereich von metallischen Werkstoffen: 5–200 J, der konkrete Wert hängt vom Material und der Temperatur ab:

Hartmetall (YG8, Raumtemperatur): 10–20 J.

Gehärteter Stahl (1045, Raumtemperatur): 50–80 J.

Aluminiumlegierung (6061-T6, Raumtemperatur): 20–40 J.

Bei niedrigen Temperaturen (-40 °C) wird der Energieverbrauch typischerweise um 20–50 % reduziert.

#### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben ist  $\leq \pm 10$  J, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Übersteigt der Energiewert die materialtechnischen Anforderungen, müssen die Gründe (z. B. Kerbqualität, Probenfehler) analysiert werden.

#### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Kerbqualität: Ein Kerbgrundradiusfehler  $> 0,025$  mm oder eine Oberflächenrauheit  $> 0,2$   $\mu$ m führt zu einer Energiereduzierung (Abweichung  $> 15$  %).

Temperatur: Eine Temperaturabsenkung von  $> 20^\circ\text{C}$  führt zu einer deutlichen Energieeinsparung (Abweichung  $> 30\%$ ).

Belastungsgeschwindigkeit: Eine Abweichung der Pendelgeschwindigkeit  $> 0,05$  m/s beeinflusst die Ergebnisse (Abweichung  $\pm 5\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $> \pm 0,2$   $\mu$ m) oder hohe Porosität verringern die Zähigkeit (Abweichung  $> 10\%$ ).

### 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe, Kerbtyp (V/U).

Testbedingungen: Gerätemodell, Vorrichtungstyp (Charpy/Izod), Testtemperatur (°C),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Umgebungsfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Testergebnisse: Stoßabsorptionsenergie E E jeder Probe E (J), Mittelwert und Abweichung, Bruchart (sofern beobachtet).

Bewertungsschlussfolgerung: ob die technischen Anforderungen des Materials erfüllt werden.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der Aufprallenergie typischer metallischer Werkstoffe

| Materialtyp        | Marke/Kategorie | Schlagenergie (J, Raumtemperatur) | Schlagenergie (J, -40°C) | Typische Anwendungen          |
|--------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Hartmetall         | YG8             | 10-20                             | 5-10                     | Schneidwerkzeuge              |
| Gehärteter Stahl   | 1045 (HRC 30)   | 50-80                             | 20-40                    | Mechanische Teile             |
| Aluminiumlegierung | 6061-T6         | 20-40                             | 10-20                    | Luft- und Raumfahrtstrukturen |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C (Raumtemperatur) oder -196 °C bis 0 °C (kalte Temperatur), 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

#### Anhang C (Informativer Anhang) Zusammenhang zwischen Spaltgröße und Energie

| Lückentyp | Tiefe (mm) | Winkel (°) | Fußradius (mm) | Energieauswirkungen (%) |
|-----------|------------|------------|----------------|-------------------------|
| V-Typ     | 2          | 45         | 0,25           | Benchmarks              |
| U-Form    | 5          | 0          | 1.0            | Erhöhung um 10–20 %     |

#### Zusammenfassen

ASTM E23-18 „Kerbproben-Schlagprüfverfahren“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Prüfung der Schlagzähigkeit metallischer Werkstoffe und gewährleistet durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse. Die Umsetzung dieser Norm trägt zur Bewertung des Schlagverhaltens metallischer Werkstoffe (wie Hartmetall und Stahl) bei und bietet zuverlässige technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Maschinenbau, Bauwesen und Energie.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

**ASTM G65-16**

**Testverfahren für den Verschleiß trockener Sand-/Gummiräder  
Standardprüfverfahren zur Messung des Abriebs mittels  
das Trockensand-/Gummiradgerät**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Labormethode zur Messung der Kratzverschleißfestigkeit von metallischen Werkstoffen mittels Trockensand-/Gummiradprüfung fest. Sie umfasst Prüfprinzipien, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm gilt für die Prüfung der Verschleißfestigkeit von metallischen Werkstoffen (einschließlich Hartmetall, Stahl, Legierungen usw.) und zielt darauf ab, wiederholbare Daten zur Bewertung der Kratzverschleißfestigkeit von Materialien unter bestimmten Bedingungen zu generieren. Diese Norm ist nicht auf nichtmetallische Werkstoffe anwendbar und versucht nicht, tatsächliche Arbeitsbedingungen (wie korrosive Umgebungen oder Aufprallbedingungen) vollständig zu simulieren.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Version. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Version (einschließlich aller Revisionen) dieser Norm.

ASTM E4-21 Standardverfahren zur Kalibrierung von Kraft-, Druck- und Verformungsprüfmaschinen

ASTM G105-02(2013) Standardprüfverfahren – Nasser Sand/Gummi-Rad-Abriebtest

ASTM B611-13 Standardprüfverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetallen unter hoher Beanspruchung

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt ASTM G65-16 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Kratzabrieb: Materialverlust, der durch relatives Gleiten harter Partikel auf der Materialoberfläche unter einem bestimmten Druck entsteht.

Volumenverlust: Das Materialvolumen, das die Probe nach dem Verschleißtest verloren hat, in Kubikmillimetern ( $\text{mm}^3$ ).

Verschleißrate: Das Materialvolumen, das pro Gleitdistanzeinheit verloren geht, ausgedrückt in  $\text{mm}^3/\text{m}$ .

Gegenfläche Rad: Ein Gummirad mit einer Shore-A-Härte von 60–65, das mit der Probe in Kontakt kommt und eine Relativbewegung erzeugt.

Schleifmittel: Harte Partikel zur Simulation von Verschleiß, womit in dieser Norm trockener Sand (z. B. Quarzsand) gemeint ist.

**4 Prüfprinzip**

Der Trockensand-/Gummirad-Verschleißtest bewertet die Verschleißfestigkeit des Materials. Dazu

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

wird die Metallprobe in einer trockenen Sand-Schleifumgebung mit einem rotierenden Gummirad in Kontakt gebracht, eine bestimmte Last und eine Gleitstrecke aufgebracht und der Masse- bzw. Volumenverlust der Probe durch Kratzverschleiß gemessen. Die Testbedingungen sind standardisiert, um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Testergebnisse werden in Volumenverlust ( $\text{mm}^3$ ) angegeben. Materialien mit höherer Verschleißfestigkeit weisen einen geringeren Volumenverlust auf.

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Verschleißprüfgerät

Trockensand-/Gummiradgerät mit einstellbarer Last, Lastbereich 5–130 N, Genauigkeit  $\pm 0,5$  N.

Gleitgeschwindigkeit: 0,1–1 m/s, Abweichung  $< \pm 0,05$  m/s.

Gleitdistanz: einstellbar bis 4300 m, Genauigkeit  $\pm 1$  m.

### 5.2 Gummirad

Härte: Shore A 60–65.

Durchmesser: 228 mm ( $\pm 1$  mm), Breite 12,7 mm ( $\pm 0,1$  mm).

Die Oberfläche ist fehlerfrei und muss regelmäßig erneuert werden, um die Konsistenz zu gewährleisten.

### 5.3 Strahlmittelversorgungssystem

Strahlmittel: trockener Quarzsand, Korngröße 200–300  $\mu\text{m}$ , Reinheit  $> 98\%$ .

Förderleistung: 250–300 g/min, Abweichung  $< \pm 5$  g/min.

Der Sandstrom wird durch eine Düse mit Standardgeometrie (Breite 1 mm) gleichmäßig verteilt.

### 5.4 Messwerkzeuge

Präzisionswaage: Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg.

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm.

Oberflächenprofilmesser: Misst die Verschleißtiefe mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm.

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Abmessungen  $76 \times 25,4 \times 6,35$  mm ( $\pm 0,1$  mm), oder gemäß Protokoll angepasst.

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2$   $\mu\text{m}$  (poliert).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>10\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben müssen mit der Chargennummer, der Güte (z. B. YG8, AISI 1020-Stahl) und dem Prüfling gekennzeichnet sein. Die Kennzeichnung darf den Prüfbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie die Oberfläche der Probe vor dem Test mit wasserfreiem Ethanol, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

Nach dem Test wurde ein Ultraschallreiniger (40 kHz, 5 Min.) verwendet, um das restliche Schleifmittel zu entfernen.

## 6.5 Erstmessung

Messen Sie die Anfangsmasse (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg) und Dicke (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm) der Probe.

# 7 Testschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Die Kalibrierung des Prüfgeräts erfolgt mit einer Standardlast mit einer Abweichung von  $< \pm 0,5$  N. Überprüfen Sie den Zustand des Gummirads, um sicherzustellen, dass die Oberfläche nicht abgenutzt oder verschmutzt ist.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Prüfumgebung: trocken, ohne flüssiges Medium.

## 7.3 Testbetrieb

Diese Norm sieht fünf Prüfverfahren (A, B, C, D, E) vor, die entsprechend der Verschleißfestigkeit des Materials ausgewählt werden:

Verfahren A: Hochverschleißtest, Belastung 130 N, Raddrehzahl 200 U/min, Gleitweg 4300 m, geeignet für mittel- bis hochverschleißfeste Werkstoffe.

Programm B: Kurzzeitvariante, Belastung 130 N, Raddrehzahl 200 U/min, Gleitweg 718 m, geeignet für Werkstoffe mit geringer und mittlerer Verschleißfestigkeit (Einsatz bei Volumenverlust  $> 100\text{ mm}^3$ ).

Programm C: Kurzzeitvariante, Belastung 130 N, Raddrehzahl 200 U/min, Gleitstrecke 71,8 m, geeignet für dünne Beschichtungen.

Programm D: Leichte Variante, Belastung 45 N, Raddrehzahl 200 U/min, Gleitweg 4300 m, geeignet für Werkstoffe mit geringer Verschleißfestigkeit.

Programm E: Kurzzeitvariante, Belastung 45 N, Raddrehzahl 200 U/min, Gleitweg 718 m, geeignet für Werkstoffe mit geringer und mittlerer Verschleißfestigkeit.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Probe wird auf dem Prüfgerät montiert, hat Kontakt mit dem Gummirad und die Last wird aufgebracht.

Starten Sie den Tester und zeichnen Sie die Gleitdistanz und den Probenverschleiß auf.

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test 3–5 Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse sicherzustellen.

#### 7.4 Ergebnismessung

Nach dem Test wurden die Proben gereinigt, getrocknet und die endgültige Masse gemessen (Genauigkeit  $\pm 0,1$  mg).

Die Verschleißtiefe wurde mit einem Oberflächenprofilometer (Genauigkeit  $\pm 0,001$  mm) gemessen.

Berechnen Sie den Massenverlust:  $\Delta m = m_0 - m_1$  ( $m_0$  ist die Anfangsmasse,  $m_1$  ist die Endmasse).

#### 7.5 Volumenverlustberechnung

Volumenverlust:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

In:

V ist der Volumenverlust in  $\text{mm}^3$  ;

$\Delta m$  ist der Massenverlust in mg;

$\rho$  ist die Materialdichte in  $\text{g/cm}^3$  .

Verschleißrate:

$$W = \frac{V}{L}$$

In:

W ist die Verschleißrate in  $\text{mm}^3/\text{m}$ ;

L ist die Gleitstrecke in Metern.

### 8 Auswertung der Prüfergebnisse

#### 8.1 Volumenverlustbereich

Die Bandbreite des Volumenverlustes bei metallischen Werkstoffen variiert je nach Verfahren und Werkstoff:

Hartmetall (YG8, Verfahren A):  $10-20 \text{ mm}^3$  .

Weichstahl (AISI 1020, Verfahren A):  $50-100 \text{ mm}^3$  .

Hochverschleißfeste Werkstoffe (Verfahren B):  $5-15 \text{ mm}^3$  .

#### 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben liegt bei  $<\pm 10\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Wenn der Volumenverlust den erwarteten Bereich überschreitet, muss die Ursache analysiert werden (z. B. ungleichmäßige Schleifpartikelgröße und Oberflächendefekte der Probe).

#### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Abrasive Partikelgröße: Partikelgrößen  $> 300 \mu\text{m}$  erhöhen den Volumenverlust (Abweichung  $> 15\%$ ).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Belastung: Belastungen > 130 N können zu Rissen in der Probe führen und die Ergebnisse beeinträchtigen.

Härte der Gummiräder: Härten > Shore A 65 erhöhen den Verschleiß (Abweichung > 10 %).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $>\pm 0,2 \mu\text{m}$ ) oder hohe Porosität erhöhen den Volumenverlust (Abweichung >10 %).

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe.

Prüfbedingungen: Gerätemodell, Verfahrensart (A/B/C/D/E), Belastung (N), Gleitstrecke (m), Schleifmittelart und Korngröße, Umgebungstemperatur (10°C bis 35°C), Luftfeuchtigkeit (30%-80%).

Prüfergebnisse: Ausgangsmasse, Endmasse, Masseverlust, Volumenverlust ( $\text{mm}^3$ ), Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{m}$ ), Verschleißtiefe und Mittelwert, Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob es den erwarteten Bereich erfüllt.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte für den Volumenverlust typischer metallischer Werkstoffe

| Materialtyp                         | Marke/Kategorie | Verfahren A<br>Volumenverlust<br>( $\text{mm}^3$ ) | Verfahren B<br>Volumenverlust<br>( $\text{mm}^3$ ) | Typische<br>Anwendungen |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Hartmetall                          | YG8             | 10-20                                              | 5-10                                               | Schneidwerkzeuge        |
| Weichstahl                          | AISI 1020       | 50-100                                             | 20-40                                              | Strukturteile           |
| Hochverschleißfeste<br>Beschichtung | WC-10Co-4Cr     | 5-15                                               | 2-8                                                | Bergbauausrüstung       |

## Anhang B (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung <0,02 mm/m.

## Anhang C (Informativer Anhang) Vergleich der Testverfahren

| Programm | Last (N) | Gleitstrecke (m) | Geltungsbereich                                             |
|----------|----------|------------------|-------------------------------------------------------------|
| A        | 130      | 4300             | Mittel- bis hochverschleißfeste Materialien                 |
| B        | 130      | 718              | Materialien mit mittlerer und geringer Verschleißfestigkeit |
| C        | 130      | 71,8             | Dünne Beschichtung                                          |
| D        | 45       | 4300             | Material mit geringer Verschleißfestigkeit                  |

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

|   |    |     |                                                             |
|---|----|-----|-------------------------------------------------------------|
| E | 45 | 718 | Materialien mit mittlerer und geringer Verschleißfestigkeit |
|---|----|-----|-------------------------------------------------------------|

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

1

  
www.chinatun

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anhang:**

**EN ISO 6507-1:2018**

**Vickers-Härteprüfung**

**Metallische Werkstoffe**

**— Härteprüfung nach Vickers — Teil 1: Prüfverfahren**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Bestimmung der Härte metallischer Werkstoffe mittels Vickers-Härteprüfung bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) fest. Sie umfasst Prüfprinzip, Geräteanforderungen, Probenvorbereitung, Prüfschritte, Ergebnisberechnung und -auswertung, Prüfbericht usw. Diese Norm gilt für die Prüfung der Vickers-Härte im Bereich von HV 1 bis HV 3000 und deckt unterschiedliche Belastungen (0,098 N bis 2942 N) ab. Diese Norm gilt nicht für die Härteprüfung winziger oder dünnwandiger Proben (Dicke <0,1 mm) oder beschichteter Werkstoffe.

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

EN ISO 6507-2:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten

EN ISO 6507-3:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 3: Kalibriernormale

EN ISO 376:2011 Metallische Werkstoffe – Kalibrierkraftnormale

EN ISO 18265:2013 Metallische Werkstoffe – Umrechnung zwischen Härte und Festigkeit

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt EN ISO 6507-1:2018 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

**Vickershärte (HV):** Die Fähigkeit eines Metallmaterials, dem Eindringen eines Vickers-Eindringkörpers zu widerstehen, ausgedrückt als Vickershärtewert in N/mm<sup>2</sup> (oder MPa), berechnet anhand der diagonalen Länge des Eindrucks.

**Vickers-Eindringkörper:** Ein quadratischer Diamantpyramiden-Eindringkörper mit einem Scheitelwinkel von 136°.

**Eindruckdiagonale:** Die Länge der beiden Diagonalen des quadratischen Eindrucks, der entsteht, wenn der Vickers-Eindringkörper in die Probenoberfläche gedrückt wird, in mm.

**Prüflast (F):** Die auf den Vickers-Eindringkörper ausgeübte Kraft in Newton (N) im Bereich von 0,098 N bis 2942 N.

**Haltezeit:** Die Zeit in Sekunden (s), die die Last aufrechterhalten wird, nachdem der Eindringkörper die Last aufgebracht hat.

**4 Prüfprinzip**

Die Vickers-Härteprüfung wird durchgeführt, indem ein Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper (Scheibenwinkel 136°) mit einer bestimmten Last in die Oberfläche einer Metallprobe gedrückt, für

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

eine bestimmte Zeit gehalten und dann entlastet wird. Anschließend wird die Länge der beiden Diagonalen des Eindrucks ( $d_1$ ,  $d_2$ ) gemessen, die durchschnittliche Diagonallänge ( $d$ ) berechnet und anschließend der Vickers-Härtewert (HV) ermittelt. Die Berechnungsformel lautet:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

In:

F ist die Testlast in N;

$d$  为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ;

Die Einheit der Härte ist N/mm<sup>2</sup> ( 1 kgf / mm<sup>2</sup>  $\approx$  9,807 N/mm<sup>2</sup> ).

## 5 Prüfmittel

### 5.1 Vickers-Härteprüfgerät

Entspricht den Prüf- und Kalibrierungsanforderungen der EN ISO 6507-2:2018.

Lastbereich: 0,098 N bis 2942 N (HV 0,01 bis HV 30), Genauigkeit  $\pm 0,5$  %.

Haltezeitregelung: 5 s bis 60 s, Abweichung  $< \pm 0,5$  s.

### 5.2 Druckhöhe

Standard-Vickers-Diamant-Eindringkörper, Scheitelwinkel 136° ( $\pm 0,5^\circ$ ).

Die Oberfläche des Eindringkörpers ist frei von Defekten und weist klare Kanten auf (Mikroskopische Betrachtung, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$  ).

### 5.3 Messgerät

Optisches Mikroskop: Vergrößerung 50 $\times$ –1000 $\times$ , 400 $\times$  empfohlen, Auflösung  $< 0,5 \mu\text{m}$  .

Ausgestattet mit einem digitalen Anzeigesystem mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,001$  mm.

### 5.4 Kalibrierblock

Standard-Kalibrierblöcke gemäß EN ISO 6507-3:2018, Härtebereich HV 100–3000, Abweichung  $< \pm 2$  %.

Die Oberflächenrauheit des Kalibrierkörpers beträgt  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$  .

### 5.5 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20  $\pm$  5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50  $\pm$  10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 6. Probenvorbereitung

### 6.1 Probenanforderungen

Probenform: Quader, Zylinder oder andere regelmäßige geometrische Form, Prüffläche  $> 5 \times 5$  mm, Dicke  $> 0,5$  mm (lastabhängig).

Die Prüffläche sollte eben und frei von Rissen, Oxidschichten oder Bearbeitungsfehlern sein.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  (poliert), bei Prüfungen mit geringer Belastung ( $< 9,807$  N)  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$  .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Die Dicke der Probe sollte die folgenden Anforderungen erfüllen:  $\text{Dicke} \geq 1,5 \times \text{diagonale Länge der Vertiefung}$ .

## 6.2 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>3\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

## 6.3 Probenkennzeichnung

Die Proben müssen mit der Chargennummer, der Güte (z. B. YG8, S235JR-Stahl) und dem Prüfling gekennzeichnet sein. Die Kennzeichnung darf den Prüfbereich nicht beeinträchtigen.

## 6.4 Probenreinigung

Reinigen Sie vor dem Testen die Oberfläche der Probe mit wasserfreiem Ethanol oder Aceton, um Öl und Staub zu entfernen, und verwenden Sie sie nach dem Trocknen.

# 7 Testschritte

## 7.1 Gerätekalibrierung

Verwenden Sie den Standard-Kalibrierblock, um den Härteprüfer zu kalibrieren. Wählen Sie den Kalibrierblock, der der Prüflast entspricht. Messen Sie dreimal. Die Härteabweichung beträgt  $\leq \pm 1\%$ . Überprüfen Sie den Zustand des Eindringkörpers, um sicherzustellen, dass keine Abnutzung oder Defekte vorliegen.

## 7.2 Prüfbedingungen

Umgebungstemperatur:  $10\text{ °C}$  bis  $35\text{ °C}$ ,  $20 \pm 5\text{ °C}$  empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit:  $30\text{--}80\%$ ,  $50 \pm 10\%$  empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

## 7.3 Lastauswahl

Wählen Sie die Last basierend auf der Materialhärte und der Probendicke:

Hartmetall:  $294,2\text{ N}$  ( $30\text{ kgf}$ , HV 30) werden empfohlen.

Stahl:  $50\text{ N}$  bis  $294,2\text{ N}$  (HV 5 bis HV 30).

Dünnwandige Proben:  $0,098\text{ N}$  bis  $9,807\text{ N}$  (HV 0,01 bis HV 1).

Die Belastung soll sicherstellen, dass die diagonale Länge  $d$  des Eindrucks im Bereich von  $0,020\text{ mm}$  bis  $1,400\text{ mm}$  liegt.

## 7.4 Testbetrieb

Legen Sie die Probe auf die Werkbank des Härteprüfgeräts und achten Sie darauf, dass die Prüfoberfläche eben ist.

Wählen Sie eine geeignete Last (z. B.  $294,2\text{ N}$ ) und halten Sie die Last für  $10\text{--}15\text{ s}$  (oder passen Sie sie je nach Materialanforderungen an).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Der Eindringkörper wird langsam in die Probenoberfläche gedrückt und nach Aufrechterhaltung der Last automatisch entlastet.

Pro Probe sind 5 Eindruckpunkte zu messen, wobei der Eindruckabstand > 3 mal der Diagonalenlänge (> 0,3 mm) und der Abstand vom Probenrand > 0,5 mm sein muss.

## 7.5 Messung und Berechnung

Die Längen der beiden diagonalen Linien der Vertiefung ( $d_1$ ,  $d_2$ ) wurden mit einem optischen Mikroskop mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,001$  mm gemessen.

Berechnen Sie die durchschnittliche Diagonallänge:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Vickershärte berechnen:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

Als Härtewert der Probe werden fünf Eindruckpunkte mit einer Abweichung von  $< \pm 3$  % angenommen.

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Härtewertebereich

Vickershärtebereich von metallischen Werkstoffen: HV 100-3000, der konkrete Wert hängt vom Werkstoff ab:

Hartmetall (YG8): HV 1450-1550.

Gehärteter Stahl (42CrMo4): HV 500-700.

Aluminiumlegierung (6082-T6): HV 50-150.

### 8.2 Abweichungsbewertung

der 5 Eindruckpunkte liegt bei  $< \pm 3$  %, andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Übersteigt der Härtewert die materialtechnischen Anforderungen, muss die Ursache (z. B. Oberflächenfehler, Lastfehlanpassung) analysiert werden.

### 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Wahl der Last: Bei zu geringer Last ( $< 0,098$  N) kann es vorkommen, dass kein deutlicher Eindruck entsteht, bei zu hoher Last ( $> 2942$  N) kann es zu einer Verformung der Probe kommen.

Oberflächenqualität: Eine Oberflächenrauheit  $R_a > 0,1$   $\mu\text{m}$  führt zu geringeren Härtewerten (Abweichung  $> 5\%$ ).

Haltezeit: Eine Zeit  $< 5$  s oder  $> 60$  s beeinflusst die Eindruckgröße (Abweichung  $\pm 2$  %).

Probendicke: Eine Dicke  $< 1,5 \times$  Eindruckdiagonale führt zu einem Stützeffekt und einem hohen Härtewert (Abweichung  $> 10$  %).

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe.

Testbedingungen: Gerätemodell, Last (N), Haltezeit (s), Umgebungstemperatur (10 °C bis 35 °C), Luftfeuchtigkeit (30 % – 80 %).

Prüfergebnisse: Durchschnittliche diagonale Länge jedes Eindrucks (d), Härtewert (HV), durchschnittlicher Härtewert und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob die technischen Anforderungen des Materials erfüllt werden.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Informativer Anhang) Vickershärte-Referenzwerte für typische Metallmaterialien

| Materialtyp        | Marke/Kategorie | Vickershärte (HV) | Typische Belastung (N) | Typische Anwendungen          |
|--------------------|-----------------|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| Hartmetall         | YG8             | 1450–1550         | 294,2                  | Schneidwerkzeuge              |
| Gehärteter Stahl   | 42CrMo4         | 500-700           | 294,2                  | Mechanische Teile             |
| Aluminiumlegierung | 6082-T6         | 50-150            | 9.807                  | Luft- und Raumfahrtstrukturen |
| Gusseisen          | EN-GJL-250      | 200-300           | 98,07                  | Motorblock                    |

#### Anhang B (Informativer Anhang) Tabelle der Beziehung zwischen Vickershärte und Belastung

| Last (N) | Härtensymbol | Diagonaler Längenbereich der Einkerbung (mm) | Anwendbare Materialien                   |
|----------|--------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| 0,098    | HV 0,01      | 0,020–0,050                                  | Dünnwandige oder kleine Proben           |
| 9.807    | HV 1         | 0,050–0,150                                  | Weiche Metalle (wie Aluminium)           |
| 98,07    | HV 10        | 0,150–0,400                                  | Mittelharte Werkstoffe (z. B. Gusseisen) |
| 294,2    | HV 30        | 0,400-1,000                                  | Hartlegierung, Stahl                     |
| 2942     | HV 300       | 1.000-1.400                                  | Superharte Materialien                   |

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandeseinheit: Abweichung <0,02 mm/m.

EN ISO 6507-1:2018 „Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Vickers-Härteprüfung metallischer Werkstoffe und gewährleistet die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse durch standardisierte Probenvorbereitung, Prüfschritte und Ergebnisauswertung. Die Umsetzung dieser Norm gilt für die Qualitätskontrolle und Leistungsbewertung von Werkstoffen wie Hartmetall, Stahl und Aluminiumlegierungen 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](http://www.ctia.com.cn)

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

bietet zuverlässige technische Unterstützung für Anwendungsbereiche wie Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt sowie Formenbau.

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

**EN ISO 18265:2013**

**Metallische Werkstoffe - Umrechnung zwischen Härte und Festigkeit**

**Metallische Werkstoffe – Umrechnung von Härtewerten**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Umrechnungsverfahren zwischen verschiedenen Härteprüfverfahren sowie zwischen Härtewerten und Zugfestigkeit von metallischen Werkstoffen fest. Diese Norm gilt für eisenbasierte Metalle (wie Kohlenstoffstahl, legierter Stahl, Edelstahl) und Nichteisenmetalle (wie Aluminium, Kupfer und deren Legierungen). Das Umrechnungsverfahren basiert auf empirischen Daten und gilt für Härtewerte, die bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) gemessen wurden. Diese Norm gilt nicht für die Härteumrechnung von Hartmetallen (wie WC-Co), superharten Werkstoffen (wie Diamant) oder oberflächenhärtenden Werkstoffen (wie Aufkohlungsstahl).

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

EN ISO 6506-1:2014 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell, Teil 1: Prüfverfahren

EN ISO 6507-1:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren

EN ISO 6508-1:2016 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Rockwell, Teil 1: Prüfverfahren

EN ISO 4545-1:2017 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Knoop, Teil 1: Prüfverfahren

EN ISO 6892-1:2019 Metallische Werkstoffe – Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt die EN ISO 18265:2013 und die folgenden Begriffe und Definitionen:

Härte: Die Fähigkeit eines metallischen Materials, dem Eindringen eines Eindringkörpers zu widerstehen, gemessen mit verschiedenen Methoden (wie Vickers, Brinell, Rockwell und Knoop).

Zugfestigkeit (R<sub>m</sub>): Die maximale Spannung, der ein Metallmaterial in einem Zugversuch standhalten kann, gemessen in MPa.

Umrechnung: Der Vorgang der Umrechnung eines Härtewertes in einen anderen Härtewert oder eine andere Zugfestigkeit auf Basis empirischer Zusammenhänge.

Vickershärte (HV): Der mit der Vickershärteprüfung gemessene Härtewert, die Einheit ist N/mm<sup>2</sup>.

Brinellhärte (HBW): Der mit dem Brinellhärteversuch gemessene Härtewert, die Einheit ist HBW (Hartmetallkugel-Eindringkörper).

Rockwellhärte (HR): Der Härtewert, der mit dem Rockwell-Härteversuch gemessen wird. Gängige Skalen sind HRC, HRB und HRA.

**4 Konvertierungsprinzip**

Die Umrechnung zwischen Härte und Härtegrad bzw. zwischen Härte und Zugfestigkeit basiert auf empirischen Daten und Regressionsanalysen. Die Umrechnungsbeziehung variiert je nach

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Werkstoffart, Wärmebehandlungszustand und Mikrostruktur (z. B. Korngröße, Phasenverteilung). Diese Norm enthält Umrechnungstabellen und -formeln. Die Umrechnungsergebnisse sind jedoch nur Näherungswerte, und die Abweichung kann bis zu  $\pm 10\%$  betragen. Folgende Faktoren sollten bei der Umrechnung berücksichtigt werden:

Materialkategorie: Eisenbasierte Metalle (wie Kohlenstoffstahl, legierter Stahl) oder Nichteisenmetalle (wie Aluminium, Kupfer).

Härtebereich: Für verschiedene Härteprüfverfahren gelten anwendbare Bereiche (z. B. HRC 20–70).

Testbedingungen: Härteprüflast, Haltezeit und Probenoberflächenqualität.

## 5 Umrechnungsbedingungen

### 5.1 Geltungsbereich

Eisenbasierte Metalle: Kohlenstoffstahl, legierter Stahl, Edelstahl.

Nichteisenmetalle: Aluminium und Aluminiumlegierungen, Kupfer und Kupferlegierungen.

Härtebereich:

Vickershärte (HV): 100–1000.

Brinellhärte (HBW): 100–700.

Rockwellhärte (HRC): 20–70.

Zugfestigkeit (Rm): 300–2000 MPa.

### 5.2 Einschränkungen

Nicht geeignet für Hartmetall (wie WC-Co) und superharte Materialien (wie Diamant).

Nicht geeignet für oberflächenhärtende Werkstoffe (wie etwa Aufkohlungs- und Nitrierschichten).

Es ist nicht für Materialien mit abnormaler Mikrostruktur (wie etwa starker Entmischung und hoher Porosität) geeignet.

Die Umrechnungsabweichung kann bis zu  $\pm 10\%$  betragen und dient nur als Referenz.

### 5.3 Prüfanforderungen

Die Härteprüfung sollte den einschlägigen Normen (wie beispielsweise EN ISO 6507-1:2018) entsprechen.

Die Oberflächenrauheit der Probe beträgt  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  und die Dicke beträgt  $\geq 1,5 \times$  die diagonale Länge der Vertiefung.

Umgebungstemperatur:  $10^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$ ,  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  empfohlen.

## 6 Umrechnungsmethode

### 6.1 Die Umrechnung der Härtegrade

erfolgt über die in der Norm enthaltenen Tabellen. Einige Beispiele:

HRC bis HV:

HRC 30  $\approx$  HV 320

HRC 50  $\approx$  HV 550

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



|                         |
|-------------------------|
| HRC 30 $\approx$ HV 320 |
| HRC 50 $\approx$ HV 550 |

HV bis HBW (Kohlenstoffstahl):

HV 200  $\approx$  HBW 190

HV 500  $\approx$  HBW 475

|                          |
|--------------------------|
| HV 200 $\approx$ HBW 190 |
| HV 500 $\approx$ HBW 475 |

## 6.2 Umrechnung zwischen Härte und Zugfestigkeit

Die Umrechnung erfolgt über die in der Norm angegebenen Tabellen oder Formeln. Einige Beispiele:

HRC bis Rm (gehärteter Stahl):

HRC 30  $\approx$  Rm 900

MPaHRC 50  $\approx$  Rm 1500

|                                          |
|------------------------------------------|
| HRC 30 $\approx$ R <sub>m</sub> 900 MPa  |
| HRC 50 $\approx$ R <sub>m</sub> 1500 MPa |

HBW zu Rm (Kohlenstoffstahl, nicht wärmebehandelt):

Rm  $\approx$  3,3  $\times$  HBW (HBW 100-400)

HBW 200  $\approx$  Rm 660 MPa

|                                                         |
|---------------------------------------------------------|
| R <sub>m</sub> $\approx$ 3.3 $\times$ HBW (HBW 100-400) |
| HBW 200 $\approx$ R <sub>m</sub> 660 MPa                |

## 6.3 Aufbau der Umrechnungstabelle

Tabelle A: Umrechnung der Härte von Metallen auf Eisenbasis (Kohlenstoffstahl, legierter Stahl).

Tabelle B: Umrechnung der Härte von Edelstahl.

Tabelle C: Härteumrechnung von Nichteisenmetallen (Aluminium, Kupfer).

Tabelle D: Umrechnung zwischen Härte und Zugfestigkeit.

## 7 Auswertung der Konvertierungsergebnisse

### 7.1 Abweichungsanalyse

Abweichung der Härteumrechnung:  $\pm 5\%$ - $10\%$ , abhängig vom Material und Härtebereich.

Umrechnungsabweichung zwischen Härte und Zugfestigkeit:  $\pm 10\%$ - $15\%$ , abhängig vom Wärmebehandlungszustand.

### 7.2 Einflussfaktoren

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $> \pm 0,2 \mu m$ ) oder ungleichmäßige Phasenverteilung können zu großen Abweichungen ( $> 10\%$ ) führen.

Wärmebehandlungszustand: Die Umwandlungsabweichung von vergütetem Stahl und geglühtem Stahl ist unterschiedlich ( $\pm 5\%$  –  $15\%$ ).

Prüfbedingungen: Die Belastung, Haltezeit und Probenoberflächenqualität der Härteprüfung beeinflussen die Umrechnungsgenauigkeit.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 7.3 Empfehlungen

Direkte Prüfungen (z. B. Zugversuche) zur Ermittlung der Zugfestigkeit sind einer Umrechnung vorzuziehen.

Das Konvertierungsergebnis dient nur als Referenz und muss bei Bedarf überprüft werden (wenn die Abweichung >10 %).

### 8 Umwandlungsbericht

Der Konvertierungsbericht sollte Folgendes enthalten:

Materialinformationen: Materialtyp, Güteklasse, Wärmebehandlungsstatus.

Informationen zur Härteprüfung: Prüfmethode (z. B. Vickers), Belastung (N), Härtewert und Abweichung.

Umrechnungsergebnisse: Zielhärtewert bzw. Zugfestigkeitswert, Umrechnungsgrundlage (Tabellennummer).

Abweichungsbewertung: Abweichungsbereich der Konvertierung und Analyse der Einflussfaktoren.

Datum des Berichts und Unterschrift des Bedieners.

#### Anhang A (Normativer Anhang) Umrechnungstabelle der Härte von Eisenmetallen (Teilbeispiele)

| HRC | HV  | HBW | HRA | Anwendbare Materialien |
|-----|-----|-----|-----|------------------------|
| 20  | 240 | 228 | 60  | Weichstahl             |
| 30  | 320 | 304 | 67  | Mittelharter Stahl     |
| 40  | 420 | 400 | 73  | Gehärteter Stahl       |
| 50  | 550 | 525 | 78  | Hochfester Stahl       |

#### Anhang B (Normativer Anhang) Umrechnungstabelle für die Härte von rostfreiem Stahl (Teilbeispiele)

| HRC | HV  | HBW | Anwendbare Materialien           |
|-----|-----|-----|----------------------------------|
| 20  | 250 | 238 | Austenitischer Edelstahl         |
| 30  | 330 | 315 | Martensitischer Edelstahl        |
| 40  | 430 | 410 | Ausscheidungshärtender Edelstahl |

#### Anhang C (Normativer Anhang) Umrechnungstabelle für die Härte von Nichteisenmetallen (Teilbeispiele)

| HBW | HV  | Anwendbare Materialien          |
|-----|-----|---------------------------------|
| 50  | 55  | Reines Aluminium                |
| 100 | 110 | Aluminiumlegierung (z. B. 6061) |
| 150 | 165 | Messing                         |

#### Anhang D (Normativer Anhang) Umrechnungstabelle für Härte und Zugfestigkeit (einige

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

### Beispiele)

| HBW | Rm R <sub>m</sub> R <sub>m</sub> ( MPa ) | Anwendbare Materialien       |
|-----|------------------------------------------|------------------------------|
| 150 | 495                                      | Ungewärmter Kohlenstoffstahl |
| 200 | 660                                      | Ungewärmter Kohlenstoffstahl |
| 300 | 1000                                     | Vergütungsstahl              |

### Anhang E (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### Zusammenfassen

EN ISO 18265:2013 „Metallische Werkstoffe – Umrechnung von Härte und Festigkeit“ bietet ein standardisiertes Verfahren zur Umrechnung von Härtewerten metallischer Werkstoffe und gewährleistet die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Umrechnungsergebnisse durch detaillierte Umrechnungstabellen und -bedingungen. Die Umsetzung dieser Norm unterstützt Werkstoffingenieure bei der ungefähren Beurteilung von Härte und Festigkeit ohne direkte Prüfbedingungen und eignet sich für die Analyse der Werkstoffleistung in den Bereichen Maschinenbau, Bauwesen, Energie usw.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

**Anhang:**

**EN ISO 6892-1:2019**

**Zugprüfung von metallischen Werkstoffen**

**Metallische Werkstoffe – Zugversuch**

**— Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur**

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Zugprüfung von metallischen Werkstoffen bei Raumtemperatur (10 °C bis 35 °C) fest, um deren mechanische Eigenschaften wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Querschnittsschrumpfung zu bestimmen. Diese Norm gilt für Stangen, Platten, Rohre, Drähte und verarbeitete Teile aus verschiedenen metallischen Werkstoffen (wie Stahl, Aluminiumlegierungen, Kupferlegierungen usw.). Diese Norm gilt nicht für Prüfungen bei Temperaturen über 10 °C bis 35 °C sowie nicht für Prüfungen von Mikroproben (z. B. mit einer Dicke <0,1 mm).

**2 Normative Verweisungen**

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für datierte, referenzierte Dokumente gilt ausschließlich die referenzierte Fassung. Für undatierte, referenzierte Dokumente gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich aller Änderungen) dieser Norm.

EN ISO 7500-1:2018 Metallische Werkstoffe – Zug- und Druckprüfmaschinen – Teil 1: Kalibrierkraft-Normalgeräte

EN ISO 9513:2012 Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Extensometersystemen

EN ISO 377:2017 Stahl und Stahlerzeugnisse – Probenahme und Vorbereitung von Probekörpern für den Zugversuch

EN ISO 148-1:2016 Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy, Teil 1: Prüfverfahren

EN ISO 18265:2013 Metallische Werkstoffe – Umrechnung zwischen Härte und Festigkeit

**3 Begriffe und Definitionen**

Diese Norm übernimmt EN ISO 6892-1:2019 und die folgenden Begriffe und Definitionen:  
Streckgrenze (Rp) oder angegebene plastische Dehnungsfestigkeit (Rp0,2): Die Spannung, bei der die Probe während der Zugbelastung eine angegebene plastische Verformung erfährt, ausgedrückt in MPa.

Zugfestigkeit (Rm): Die maximale Spannung, der eine Probe bei Zugbelastung standhält, ausgedrückt in MPa.

Bruchdehnung (A): Die plastische Dehnung des Messlängenabschnitts nach dem Bruch der Probe auf die ursprüngliche Messlänge in Prozent.

Querschnittsschrumpfung (Z): Die prozentuale Verringerung der Querschnittsfläche nach dem Bruch der Probe auf die ursprüngliche Querschnittsfläche, ausgedrückt in %.

Messlänge (L0): Die ursprüngliche Länge der Probe, die zur Messung der Dehnung verwendet wird, in mm.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

#### 4 Prüfprinzip

Der Zugversuch übt auf einer Universalprüfmaschine eine einachsige Zugbelastung auf die Metallprobe aus, bis diese bricht. Anschließend wird die Last-Verschiebungs-Kurve aufgezeichnet und die mechanischen Eigenschaften (wie Streckgrenze, Zugfestigkeit, Dehnung usw.) berechnet. Der Prüfprozess gliedert sich in die elastische Phase, die Streckphase, die gleichmäßige plastische Verformungsphase und die Einschnürungsbruchphase. Die Berechnungsformel für die mechanischen Eigenschaften lautet wie folgt:

屈服强度或规定塑性延伸强度:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

In:

$F_p$  ist die Streckgrenze in N;

$F_m$  ist die maximale Last in N;

$A_0$  ist die ursprüngliche Querschnittsfläche in  $\text{mm}^2$ ;

$L_0$  ist die ursprüngliche Messlänge, in mm;

$L_u$  ist die Messlänge nach dem Bruch, in mm;

$A_u$  ist die minimale Querschnittsfläche nach dem Bruch in  $\text{mm}^2$ .

#### 5 Prüfmittel

##### 5.1 Universalprüfmaschine

Lastbereich: 0–1000 kN, Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ , gemäß den Kalibrierungsanforderungen der EN ISO 7500-1:2018.

Steuerung der Ladegeschwindigkeit: Spannungsrate 0,00025/s bis 0,0025/s oder Dehnungsrate 0,0001/s bis 0,001/s.

##### 5.2 Dehnungsaufnehmer

Erfüllt die Kalibrierungsanforderungen gemäß EN ISO 9513:2012 mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5\%$ .

Messbereich: deckt die elastischen und plastischen Verformungsstufen der Probe ab.

##### 5.3 Messwerkzeuge

Messschieber: Genauigkeit  $\pm 0,02\text{ mm}$ , wird zum Messen der Probengröße verwendet.

Mikrometer: Genauigkeit  $\pm 0,001\text{ mm}$ , wird zum Messen der Querschnittsfläche verwendet.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



#### 5.4 Umweltkontrolle

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 6. Probenvorbereitung

#### 6.1 Probenart

**比例试样:** 标距长度  $L_0$  与横截面积  $A_0$  的平方根成比例, 常用  $L_0 = 5.65\sqrt{A_0}$ .

Nicht proportionale Probe: Die Messlänge  $L_0$  ist fest, beispielsweise 50 mm oder 80 mm.

Probenform: rund, rechteckig, röhrenförmig oder drahtförmig. Spezifische Abmessungen beziehen sich auf EN ISO 377:2017.

#### 6.2 Probenanforderungen

Die Oberfläche der Probe ist glatt, ohne Risse, Oxidschichten oder Verarbeitungsfehler.

Oberflächenrauheit  $R_a < 0,2 \mu\text{m}$  (poliert).

Die Probenentnahme erfolgt in Walzrichtung des Materials, sofern nichts anderes vereinbart ist.

#### 6.3 Anzahl der Proben

Um die statistische Repräsentativität sicherzustellen, darf die Anzahl der Proben in jeder Partie nicht weniger als 3 betragen.

Bei großen Ergebnisabweichungen ( $>10\%$ ) muss die Probenanzahl auf 5 erhöht werden.

#### 6.4 Probenkennzeichnung

Die Prüflinge müssen mit Chargennummer, Marke (z. B. S355JR, 6061-T6) und Prüfgegenständen gekennzeichnet sein und die Kennzeichnung darf den Prüfbereich nicht beeinträchtigen.

#### 6.5 Probenmessung

Messen Sie die ursprüngliche Querschnittsfläche der Probe  $A_0$  und die Messlänge  $L_0$ , Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm.

### 7 Testschritte

#### 7.1 Gerätekalibrierung

Die Prüfmaschine wurde mit einem Standardkraftsensor mit einer Lastabweichung von  $< \pm 0,5$  % kalibriert.

Die Dehnungsmessung wurde mit einem Standard-Extensometer mit einer Abweichung von  $< \pm 0,5$  % kalibriert.

#### 7.2 Prüfbedingungen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Umgebungstemperatur: 10 °C bis 35 °C, 20 ± 5 °C empfohlen.

Relative Luftfeuchtigkeit: 30–80 %, 50 ± 10 % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

### 7.3 Testbetrieb

Installieren Sie die Probe in der Vorrichtung der Prüfmaschine und achten Sie darauf, dass die Achse der Probe mit der Mittellinie der Vorrichtung ausgerichtet ist.

Tragen Sie eine Anfangslast auf (maximal 10 % der Streckgrenze) und beseitigen Sie Installationslücken.

Wählen Sie eine Ladegeschwindigkeit:

Elastische Phase: Spannungsrate 0,00025/s bis 0,0025/s.

Plastische Phase: Dehnungsrate 0,0001/s bis 0,001/s.

Die Kraft-Weg-Kurve wurde bis zum Bruch der Probe aufgezeichnet.

Jede Probe wurde einmal getestet und der Test 3–5 Mal wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse sicherzustellen.

### 7.4 Ergebnismessung

Notieren Sie die Streckgrenze  $F_p$  und die Maximallast  $F_m$ .

Verwenden Sie ein Dehnungsmessgerät, um die Dehnung in der Streckgrenze zu messen (z. B.  $R_p$  0,2).

Nachdem die Probe gebrochen ist, messen Sie die Messlänge  $L_u$  und die Querschnittsfläche  $A_u$  nach dem Bruch.

### 7.5 Ergebnisberechnung

屈服强度或  $R_{p0.2}$ :

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

## 8 Auswertung der Prüfergebnisse

### 8.1 Bereich der mechanischen Eigenschaften

Die Bandbreite der mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe hängt vom Werkstoff ab:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

低碳钢 (S355JR) :  $R_{p0.2}$  355 MPa,  $R_m$  470-630 MPa,  $A$  20%-25%。  
铝合金 (6061-T6) :  $R_{p0.2}$  240 MPa,  $R_m$  310 MPa,  $A$  8%-12%。  
不锈钢 (304) :  $R_{p0.2}$  205 MPa,  $R_m$  520 MPa,  $A$  40%-50%。

## 8.2 Abweichungsbewertung

von 3–5 Proben liegt bei  $\leq \pm 10\%$ , andernfalls ist eine erneute Prüfung erforderlich.

Übersteigt der Leistungswert die materialtechnischen Anforderungen, müssen die Gründe dafür analysiert werden (z. B. Probenfehler, falsche Belastungsgeschwindigkeit).

## 8.3 Analyse der Einflussfaktoren

Belastungsgeschwindigkeit: Eine zu hohe Geschwindigkeit ( $>0,0025/s$ ) führt zu einer höheren Streckgrenze (Abweichung  $>5\%$ ).

Probenqualität: Oberflächenrauheit  $R_a > 0,2 \mu m$  oder Defekte können zu vorzeitigem Bruch führen (Abweichung  $>10\%$ ).

Ausrichtung der Vorrichtung: Falsch ausgerichtete Vorrichtungen können Spannungskonzentrationen verursachen und die Dehnung verringern (Abweichung  $> 15\%$ ).

Mikrostruktur: Ungleichmäßige Korngröße ( $>\pm 0,2 \mu m$ ) oder übermäßige Einschlüsse verringern die Leistung (Abweichung  $>10\%$ ).

## 9 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probeninformationen: Materialtyp, Marke, Chargennummer, Größe, Probenahmerichtung.

Testbedingungen: Gerätemodell, Ladegeschwindigkeit, Umgebungstemperatur ( $10^\circ C$  bis  $35^\circ C$ ), Luftfeuchtigkeit ( $30\% - 80\%$ ).

Prüfergebnisse: Streckgrenze ( $R_{p0.2}$ ), Zugfestigkeit ( $R_m$ ), Bruchdehnung ( $A$ ), Querschnittseinschnürung ( $Z$ ), Mittelwert und Abweichung.

Bewertungsschlussfolgerung: ob die technischen Anforderungen des Materials erfüllt werden.

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

## Anhang A (Informativer Anhang) Referenzwerte der mechanischen Eigenschaften typischer metallischer Werkstoffe

| Materialtyp        | Marke/Kategorie | $R_{p0.2}$<br>(MPa) | $R_m$<br>(MPa) | $A$ (%) | $Z$ (%) | Typische Anwendungen          |
|--------------------|-----------------|---------------------|----------------|---------|---------|-------------------------------|
| Weichstahl         | S355JR          | 355                 | 470-630        | 20-25   | 50-60   | Gebäudestruktur               |
| Aluminiumlegierung | 6061-T6         | 240                 | 310            | 8-12    | 20-30   | Luft- und Raumfahrtstrukturen |
| Edelstahl          | 304             | 205                 | 520            | 40-50   | 60-70   | Lebensmittelausrüstung        |

## Anhang B (Informativer Anhang) Empfohlene Tabelle der Probenabmessungen

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

| Probentyp                  | Messlänge $L_0$<br>(mm) | Querschnittsfläche $A_0$<br>(mm <sup>2</sup> ) | Anwendbare Materialien       |
|----------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|
| Proportionalprüfkörper     | $5,65\sqrt{A_0}$        | 50-200                                         | Stahl,<br>Aluminiumlegierung |
| Nicht proportionale Proben | 50                      | 20-100                                         | Dünne Platten, Drähte        |

#### Anhang C (Informativer Anhang) Anforderungen an die Testumgebung

Temperatur: 10 °C bis 35 °C,  $20 \pm 5$  °C empfohlen.

Luftfeuchtigkeit: 30–80 %,  $50 \pm 10$  % empfohlen.

Keine Vibrationen, keine korrosive Gasumgebung.

Prüfstandsebenheit: Abweichung  $<0,02$  mm/m.

## Teil 3: Leistungsoptimierung von Hartmetall

### Kapitel 7: Kontrolle der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall

#### 7.0 Mechanische Eigenschaften von Hartmetall

##### 7.0. 1. Hohe Härte von Hartmetall

###### 7.0.1.0 Welche Härte hat Hartmetall ?

###### 7.0.1.1 Methode zur Messung der Härte von Hartmetall

###### 7.0.1.2 Härtebeeinflussende Faktoren

###### 7.0.1.3 Mikroskopischer Mechanismus der Härte

###### 7.0.1.4 Anwendungsbedeutung der Härte

###### 7.0.1.5 Kompromiss zwischen Härte und Zähigkeit

###### 7.0.1.6 Zusammenfassung

##### 7.0. 2. Bruchzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.2.1. Definition der Bruchzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.2.2. Messverfahren für die Bruchzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.2.3. Faktoren, die die Bruchzähigkeit von Hartmetall beeinflussen

###### 7.0.2.4. Mikroskopischer Mechanismus der Bruchzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.2.5. Anwendungsbedeutung der Bruchzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.2.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Bruchzähigkeit von Hartmetall

##### 7.0. 3. Druckfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.3.1. Definition der Druckfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.3. 2. Verfahren zur Messung der Druckfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.3.3. Faktoren, die die Druckfestigkeit von Hartmetall beeinflussen

###### 7.0.3.4. Mikromechanismus der Druckfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.3.5. Anwendungsbedeutung der Druckfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.3.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Druckfestigkeit von Hartmetall

##### 7.0.4. Verschleißfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.4.1. Definition der Verschleißfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.4.2. Messverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.4.3. Faktoren, die die Verschleißfestigkeit von Hartmetall beeinflussen

###### 7.0.4.4. Mikromechanismus der Verschleißfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.4.5. Anwendungsbedeutung der Verschleißfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.4.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Verschleißfestigkeit von Hartmetall

##### 7.0.5. Dauerfestigkeit von Hartmetall

###### 7.0.5.1. Definition der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

###### 7.0.5.2. Messverfahren für die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

###### 7.0.5.3. Faktoren, die die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen

###### 7.0.5.4. Mikroskopischer Mechanismus der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

###### 7.0.5.5. Anwendungsbedeutung der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

###### 7.0.5.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall

##### 7.0.6. Schlagzähigkeit von Hartmetall

###### 7.0.6.1. Definition der Schlagzähigkeit von Hartmetall

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



- 7.0.6.2. Messverfahren für die Schlagzähigkeit von Hartmetall
- 7.0.6.4. Mikroskopischer Mechanismus der Schlagzähigkeit von Hartmetall
- 7.0.6.5. Anwendungsbedeutung der Schlagzähigkeit von Hartmetall
- 7.0.6.6. Optimierung und Weiterentwicklung der Schlagzähigkeit von Hartmetall
- 7.0.7. Umfassende Analyse und Anwendung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall
  - 7.0.7.1. Kompromisse zwischen den mechanischen Eigenschaften von Hartmetall
  - 7.0.7.2. Optimierungsstrategien für mechanische Eigenschaften von Hartmetall
  - 7.0.7.3. Anwendungsszenarien der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall
  - 7.0.7.4. Zukünftige Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von Hartmetall
- 7.1 Härte- und Zähigkeitsverhältnis von Hartmetall
  - 7.1.1 Korngrößeneffekt (Hall-Petch-Beziehung)
    - 7.1.1.1 Korngrößeneffekt
    - 7.1.1.2 Hall-Petch -Mechanismus und mechanische Analyse
    - 7.1.2.2 Quantitativer Einfluss des Bindemittelgehalts auf die Zähigkeit
    - 7.1.2.3 Hierarchische Beziehung zwischen Bindungsphasentyp und Zähigkeit
    - 7.1.2.4 Starker Kompromiss und kollaborative Optimierungsstrategie
    - 7.1.2.5 Ingenieurpraxis-Verifizierung
    - 7.1.2.6 Abschließende Anerkennung
  - 7.2 Ermüdungs- und Schlagfestigkeit von Hartmetall
    - 7.2.1 Risswachstum von Hartmetall unter zyklischer Belastung (Pariser Gesetz)
  - 7.3 Analyse des Versagensmechanismus von Hartmetall
    - 7.3.2 Bruch und Abplatzungen bei Hartmetall (Spannungskonzentration und Mikrorisse)
  - 7.4 Strategien zur Verbesserung der Hartmetallleistung
    - 7.4.1 Strategie zur Leistungssteigerung bei Hartmetall – Kornverfeinerung bei Hartmetall
    - 7.4.2 Strategien zur Verbesserung der Hartmetallleistung, Hartmetallzusätze (VC, TaC )
    - 7.4.3 Strategien zur Verbesserung der Hartmetallleistung und zur Verstärkung der Hartmetalloberfläche
    - 7.4.4 Strategie zur Leistungssteigerung bei Hartmetall – Fortschrittliche Fertigungstechnologie für Hartmetall (3D-Druck)
  - 7.5 Zukünftige Entwicklungstrends: Anwendung von KI+IIoT in der Leistungsoptimierung von Hartmetall
    - 7.5.1 Mikrostrukturoptimierung: KI-gesteuertes Präzisionsdesign
    - 7.5.2 Echtzeit-Leistungsüberwachung: Hochpräzise Wahrnehmung des IIoT
    - 7.5.3 Fehlervorhersage und intelligente Wartung: Kollaborative Anwendung von KI+IIoT
    - 7.5.4 Prozessoptimierung und intelligente Fertigung: Effiziente Zusammenarbeit von KI+IIoT
  - IIoT überwacht die Aufkohlungstemperatur in Echtzeit (850–950 °C, Abweichung  $\pm 1,5$  °C), um die Qualität der Aufkohlungsschicht zu optimieren.
  - 7.5.5 Das erste Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie
    - 7.5.5.1 Die praktische Bedeutung des Konzepts „Das erste Jahr der KI in Chinas Wolframindustrie“
    - 7.5.5.2 Bedeutung der Hochentropiebehandlung von Hartmetall
    - 7.5.5.3 Die Bedeutung der Hartmetall-Dosierung
  - 7.5.6 Zukunftsaussichten und Herausforderungen bei der Verbesserung der Hartmetallleistung
- 7.6 Relevante nationale und internationale Normen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Verweise

### Zeitplan

Das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit von Hartmetall: Hauptleistungsparameter  
Faktoren, die die Korngröße beeinflussen, wirken sich auf das Gleichgewicht zwischen Härte und Zähigkeit von Hartmetall aus  
Einflussfaktoren der Optimierung des Bindephasengehalts auf die Härte- und Zähigkeitsbalance von Hartmetall  
Hauptleistungsparameter der Hartmetall-Ermüdungsbeständigkeit und Schlagfestigkeit  
Faktoren, die das Risswachstum auf die Ermüdungsbeständigkeit von Hartmetall beeinflussen  
Faktoren, die die Schlagzähigkeit von Hartmetall beeinflussen  
Hauptleistungsparameter des Hartmetall-Versagensmechanismus  
Faktoren, die das Verschleißversagen von Hartmetall beeinflussen  
Faktoren, die Bruch und Abplatzen von Hartmetall beeinflussen  
Hauptleistungsparameter der Leistungsverbesserung von Hartmetall  
Einflussfaktoren auf Kornverfeinerung und Additive zur Verbesserung der Hartmetallleistung  
Faktoren, die die Oberflächenverstärkung von Hartmetall beeinflussen und die Leistung verbessern

### Anhang

Was ist die Hall-Petch -Beziehung?  
Was ist Hartmetall mit Gradientenstruktur ?  
Verschiedene Konzepte und Funktionen der Hartmetallaufkohlung  
Aufkohlen und Entkohlen von Hartmetall  
Was ist Binder Jetting von Hartmetall?  
Anwendung von Hartmetall in Elektrolyseuren für neue Energie  
Hartmetall-Hochgeschwindigkeitsschneidwerkzeuge  
Hartmetall-Kugelpkopfräser  
Hartmetall-Schaftfräser  
Hartmetall-Mehrzahnfräser  
Hartmetall-Vollbohrer  
Hartmetall-Außendrehmeißel  
Hartmetall-Zahnradfräser  
Hartmetall-Windturbinenzahnradfräser  
GB/T 18376-2001 Leistungstestverfahren für Hartmetall  
GB/T 230.1-2001 Rockwell-Härteprüfung für Metallwerkstoffe  
Teil 1: Prüfverfahren (Skala A, B, C)  
GB/T 230.2-2001 Rockwell-Härteprüfung für metallische Werkstoffe Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten  
GB/T 230.3-2001 Metallische Werkstoffe Rockwell-Härteprüfung Teil 3: Kalibrierung von Standardhärteblöcken  
GB/T 3848-2001 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall  
GB/T 3850-2001 Bestimmungsverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall  
GB/T 3851-2001 Bestimmungsmethode der Bruchzähigkeit von Hartmetall  
GB/T 9097-2001 Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall  
GB/T 3849-2008 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall  
GB/T 7997-2010 Prüfverfahren für die Bruchzähigkeit 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](http://www.ctia.com.cn)

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

GB/T 3488-2008 Prüfverfahren für die Mikrostruktur von Hartmetall  
ISO/TR 19041:2015 Technischer Bericht zur Mikrostrukturprüfung von Hartmetall: Ergänzende Anleitung zur Fehlerbewertung  
ISO 4884:2019 Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Hartmetall  
ISO 3369:2006 Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Hartmetall  
ISO 28079:2009 Verfahren zur Bestimmung der Bruchzähigkeit von Hartmetall  
ISO 3878:1983 Prüfverfahren für die Rockwellhärte von Hartmetall (HRA-Skala)  
ISO 3326:2013 Prüfverfahren für die Vickershärte von Hartmetall  
ISO 4489-2:2020 Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall Teil 2: Hochtemperaturbedingungen  
ISO 4489:2010 Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Hartmetall  
ISO 4499-3:2016 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 3: Bewertung von Porosität, Einschlüssen, freiem Kohlenstoff und Eta-Phase  
ISO 4499-2:2008 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der Korngröße  
ISO 4499-1:2006 Hartmetall – Untersuchung der Mikrostruktur Teil 1: Allgemeine Hinweise  
ISO 3847:2005 Verfahren zur Herstellung von Hartmetallproben  
ISO 3850:2018 Hartmetall-Terminologie  
ISO 3850:2018 Hartmetall – Vokabular  
GB/T 4295-2008 Verfahren zur Bewertung mikrostruktureller Defekte in Hartmetall  
**GB/T 5249-2008 Allgemeine Spezifikation für die Vorbereitung von Hartmetallproben**  
ISO 28079:2009 Bruchzähigkeitsprüfung an palmenförmigen Proben aus Hartmetall  
Hartmetalle – Palmqvist-Zähigkeitstest  
ISO 6507-1:2018 Vickers-Härteprüfung für metallische Werkstoffe  
Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers  
ISO 6507-1:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren  
ISO 6507-2:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung von Härteprüfgeräten  
ISO 6507-3:2018 Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers, Teil 3: Kalibriernormale  
ISO 3327:2009 Prüfverfahren für die Druckfestigkeit von Hartmetall  
Hartmetalle – Bestimmung der Biegebruchfestigkeit  
Hartmetalle – Abriebtests für Hartmetalle  
ASTM B611-13 Standardprüfverfahren für die Verschleißfestigkeit harter Werkstoffe unter hoher Beanspruchung  
ASTM E23-18 Kerbschlagbiegeversuch  
Standardprüfverfahren für die Kerbschlagbiegeprüfung metallischer Werkstoffe  
ASTM G65-16 Trockensand-/Gummirad-Abriebprüfverfahren  
Standardprüfverfahren zur Messung des Abriebs mit dem Trockensand-/Gummiradgerät  
EN ISO 6507-1:2018 Vickers-Härteprüfung  
Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren  
EN ISO 18265:2013 Metallische Werkstoffe – Umrechnung zwischen Härte und Festigkeit  
Metallische Werkstoffe – Umrechnung von Härtewerten  
EN ISO 6892-1:2019 Zugprüfung an metallischen Werkstoffen  
Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

**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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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