

  
www.chinatungsten.com

## Wolframhartmetall

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

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

en.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

CTIA GROUP LTD

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

  
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)

## 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 Marktrendanalysen 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

**Kundenspezifische Bearbeitung von Hartmetalldüsen**

Hartmetalldüsen zeichnen sich durch Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und lange Lebensdauer aus. Sie werden häufig beim Sandstrahlen, Sprühen, Wasserstrahlschneiden, Ölbohren, in der chemischen Industrie, Landwirtschaft, Lebensmittelverarbeitung und anderen Bereichen eingesetzt.

**Hauptmerkmale von Hartmetalldüsen**

Härte: HRA 8892

Präzision: Düsentoleranz  $\pm 0,001$  mm, Oberflächenrauheit Ra 0,10,4  $\mu$  m .

Anpassungsfähigkeit: Temperaturbeständigkeit 800–1000 °C, Korrosionsbeständigkeit pH 210.

Effizienz: Unterstützt Hochdruckeinspritzung (0,1500 MPa), mit einer um 2050 % gesteigerten Effizienz.

Lebensdauer: Hervorragende Verschleißfestigkeit, die Lebensdauer ist 515-mal so hoch wie bei herkömmlichen Materialien.

Anpassung: verschiedene Arten (Sandstrahlen, Zerstäuben, Milchpulverherstellung usw.), geeignet für verschiedene Arbeitsbedingungen.

**Haupttypen von Hartmetalldüsen**

Typ	beschreiben	Hauptanwendungen und Anwendungsszenarien	Typische Spezifikationen
Sandstrahldüse Sandstrahldüse	Hochverschleißfeste Ausführung, geeignet zum Strahlen.	Entrosten von Schiffen, Entgraten von Autoteilen und Betonreinigung.	Düsendurchmesser 212 mm, Länge 50200 mm,
Wasserstrahldüse Wasserstrahldüse	Hochdruckwasserstrahl, geeignet zum Schneiden harter Materialien.	Schneiden von Titanlegierungen für die Luft- und Raumfahrt, Schneiden von Verbundwerkstoffen für die Automobilindustrie, Steinbearbeitung.	Der Düsendurchmesser beträgt 0,12 mm. Länge 20100 mm,
Sprühdüse Sprühbeschichtungsdüse	Präzises Auftragen von Farbe oder Keramikbeschichtungen.	Beschichtung von Turbinenschaufeln in der Luftfahrt, Beschichtung von Automotoren, Besprühen von elektronischen Leiterplatten.	Der Düsendurchmesser beträgt 0,55 mm. Länge 30150 mm,
Ölfelddüsen Ölfelddüse	Hohe Druck- und Korrosionsbeständigkeit, geeignet zum Bohren und Spülen.	Injektion von Ölbohrflüssigkeit, Reinigung von Erdgasbohrlöchern, Injektion von Bergbauschlamm.	Düsendurchmesser 315 mm, Länge 50150 mm,
Zerstäuberdüse Zerstäuberdüse	Fein zerstäubter Sprühnebel, geeignet zur Flüssigkeitsverteilung.	Versprühen landwirtschaftlicher Pestizide, Zerstäuben chemischer Flüssigkeiten, Behandlung von Umweltabgasen.	Der Düsendurchmesser beträgt 0,23 mm. Länge 20100 mm,
Brenndüse Brennerdüse	Hochtemperaturbeständige Ausführung, geeignet für Kraftstoff- oder Gaseinspritzung.	Energiekesselverbrennung, chemische Hochtemperaturreaktion, Einspritzung in metallurgischen Öfen.	Düsendurchmesser 110 mm, Länge 30120 mm,

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Mikrodüse Mikrodüse	Ultraleine Düsenöffnung, geeignet für hochpräzise Injektion.	Medizinisches Medikamentenspray, Reinigung elektronischer Chips, Präzisionsbeschichtung für die Luftfahrt.	Düsendurchmesser 0,050,5 mm, Länge 1050
Korrosionsbeständige Düsen Korrosionsbeständige Düse	Beständig gegen starke Säuren und Laugen, geeignet für chemische Umgebungen.	Injektion chemischer Säure- und Alkalilösungen, Umweltschutz, Entschwefelung und Denitrifikation, Meerwasserinjektion im Meeresbau .	Düsendurchmesser 110 mm, Länge 30150 mm,
Düse zur Herstellung von Milchpulver Milchpulver-Sprühdüse	Speziell für die Sprühtrocknung entwickelt, um Emulsionen gleichmäßig zu zerstäuben.	Herstellung von Milchpulver für die Lebensmittelverarbeitung und Verarbeitung landwirtschaftlicher Milchprodukte gemäß den FDA/EU-Standards für den Lebensmittelkontakt.	Der Düsendurchmesser beträgt 0,53 mm. Länge 20100 mm,

CTIA GROUP LTD

3. Stock, Nr. 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008

TEL.: +86 592 5129595 ; 18750234579

E-Mail: info@ctia.group



CTIA GROUP LTD

**Kundenspezifische Bearbeitung von Hartmetall-Stanzwerkzeugen**

Hartmetall-Stanzwerkzeuge zeichnen sich durch Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und lange Lebensdauer aus. Sie werden häufig im Automobilbau, in der Verarbeitung elektronischer Komponenten, bei Hardwareprodukten, in der Luft- und Raumfahrt, in der Medizintechnik und anderen Bereichen eingesetzt.

**Hauptmerkmale von Hartmetall-Stanzwerkzeugen**

Härte: HRA 8892.

Präzision: Formtoleranz ±0,001 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,10,4 μ m .

Anpassungsfähigkeit: Temperaturbeständigkeit 800–1000 °C, Korrosionsbeständigkeit pH 210.

Effizienz: Unterstützt Hochfrequenzstempeln mit einer um 2050 % gesteigerten Effizienz.

Lebensdauer: Hervorragende Verschleißfestigkeit, die Lebensdauer ist 515-mal so hoch wie bei herkömmlichen Formen.

Anpassung: Verschiedene Typen (Ziehmatrize, Stanzmatrize, Verbundmatrize usw.), geeignet für verschiedene Arbeitsbedingungen.

**Haupttypen von Hartmetall-Stanzwerkzeugen**

Typ	beschreiben	Hauptanwendungen und Anwendungsszenarien	Typische Spezifikationen
Streckwerkzeug Ziehstein	Hochverschleißfeste Ausführung, geeignet zum Streckziehen von Metall.	Dehnung von Karosserieteilen, Metallbehältern und Schalen aus Aluminiumlegierungen.	Der Matrizendurchmesser beträgt 10200 mm, die Dicke 20100 mm und die Lebensdauer beträgt 502 Millionen Stanzvorgänge.
Stanzform Stanzform	Hochpräzises Stanzen, geeignet zum Schneiden dünner Platten.	Stanzen von Anschlussrahmen für elektronische Komponenten, Autoteile und Hardwarezubehör.	Der Matrizenpalt beträgt 0,010,1 mm, die Dicke 1580 mm und die Lebensdauer beträgt 301,5 Millionen Prägungen.
Verbundform Verbundmatrize	Integriertes mehrstufiges Stanzen, geeignet für komplexe Teile.	Steckverbinder für die Luft- und Raumfahrt, Teile für medizinische Geräte und Präzisions-Hardware-Verbundverarbeitung.	Der Matrizendurchmesser beträgt 20150 mm, die Dicke 20100 mm und die Lebensdauer beträgt 401,8 Millionen Stanzvorgänge.
Ölfeld-Die Ölfeld-Die	Hochdruck- und korrosionsbeständig, geeignet für das Stanzen schwerer Lasten.	Teile für Ölbohrausrüstung, Zubehör für Erdgaspipelines, Teile für Bergbaumaschinen.	Der Matrizendurchmesser beträgt 30200 mm, die Dicke 30120 mm und die Lebensdauer beträgt 301,2 Millionen Prägevorgänge.
Hochgeschwindigkeits - Stanzwerkzeug	Hochtemperaturbeständiges und hochfrequentes Design, geeignet für schnelles Stanzen.	Befestigungselemente für die Automobilindustrie, elektronische Steckverbinder, kontinuierliche Hochgeschwindigkeits-Stanzproduktionslinien.	Die Matrize hat einen Durchmesser von 10100 mm, eine Dicke von 1580 mm und eine Lebensdauer von 602,5 Millionen Stanzungen .
Schwerlastmodell	Hochfestes Design, geeignet zum	Stanzen von dicken Blechen für	Der Matrizendurchmesser beträgt

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

HeavyDuty Matrize	Stanzen dicker Platten.	Schwermaschinenteile, Schiffskonstruktionen und Baubeschläge.	50300 mm, die Dicke 30120 mm und die Lebensdauer beträgt 301,2 Millionen Stanzvorgänge.
Mikroform Mikro-Die	Ultrakleine Größe, geeignet für hochpräzises Mikrostanzen.	Mikroteile für medizinische Geräte, Mikrosteckverbinder für die Elektronik und Komponenten für Luftfahrtsensoren.	Die Matrize hat einen Durchmesser von 550 mm, eine Dicke von 1040 mm und eine Lebensdauer von 20,8 Millionen Stanzungen .
Korrosionsbeständige Form Korrosionsbeständige Matrize	Beständig gegen starke Säuren und Laugen, geeignet zum Stempeln in chemischen Umgebungen.	Teile für chemische Geräte, Zubehör für die Schiffstechnik und Stanzteile für korrosive Materialien.	Der Matrizendurchmesser beträgt 15150 mm, die Dicke 2080 mm und die Lebensdauer beträgt 502 Millionen Stanzvorgänge.
Form in Lebensmittelqualität Lebensmittelechte Matrize	Speziell für das Stanzen lebensmittelrelevanter Teile unter Einhaltung der Normen entwickelt.	Formen für Lebensmittelverpackungen und Teile von Milchverarbeitungsgeräten entsprechen den FDA/EU-Standards für den Lebensmittelkontakt.	Der Matrizendurchmesser beträgt 10100 mm, die Dicke 1580 mm und die Lebensdauer beträgt 502 Millionen Stanzvorgänge.

**CTIA GROUP LTD**

3. Stock, Nr. 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008  
, 05925129595 18750234579 E-Mail: [info@ctia.group](mailto:info@ctia.group)



**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

**Kundenspezifische Bearbeitung von Hartmetall-Kugelrädern**

Hartmetall-Kugelzähne zeichnen sich durch Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit und lange Lebensdauer aus. Sie werden häufig im Bergbau, Tunnelbau, Straßenfräsen, bei Ölbohrungen, im Bauwesen, im Kohlebergbau und in anderen Bereichen eingesetzt.

**Haupttypen von Hartmetall-Kugelzähnen**

Typ	beschreiben	Hauptanwendungen und Anwendungsszenarien	Typische Spezifikationen mm
Schneidpickel	Hochverschleißfestes Design, geeignet zum Schneiden von hartem Gestein.	Kohlebergbau, Tunnelbau und Hartgesteinsbergbau.	Zahndurchmesser 1050, Länge 50150
Tunnelnder Zahn	Hochfeste Ausführung, geeignet für Tunnelbaugeräte.	U-Bahn-Tunnel, Eisenbahntunnel und Tiefbauaushub.	Zahndurchmesser 1560 Länge 60180
Fräszahn	Beständig gegen hohe Temperaturen und Hochfrequenzschnitte, geeignet zum Straßenfräsen.	Autobahnwartung, Start- und Landebahnfräsen, städtische Straßenreparatur.	Zahndurchmesser 830, Länge 40120
Bohrzahn	Es ist hochdruck- und korrosionsbeständig und für Bohrarbeiten geeignet.	Ölbohrungen, Erdgasexploration, geologische Untersuchungen.	Zahndurchmesser 1040, Länge 50140
Rotierende Grabzähne Rotierender Grabzahn	Hochrobustes Design, geeignet für Drehbohrgeräte.	Bau von Pfahlgründungen, Brückengründungen, Bau von Hafenterminals.	Zahndurchmesser 2080, Länge 70200
Kohlebergbauzahn	Schlagfeste Ausführung, geeignet für den Kohlebergbau.	Kohlebergwerke im Tagebau, Kohlebergbau unter Tage, Kohlewashanlagen.	Zahndurchmesser 1550, Länge 50160
Mikrozahn	Ultrakleine Größe, geeignet für hochpräzises Schneiden.	Präzise geologische Erkundung, Mikrobohrgeräte und Verarbeitung von Flugzeugteilen.	Zahndurchmesser 520, Länge 2080
Korrosionsbeständige Zähne Korrosionsbeständiger Zahn	Beständig gegen starke Säuren und Laugen, geeignet zum Schneiden in korrosiven Umgebungen.	Meeresbodenbergbau, chemischer Mineralienabbau, saure Bodentechnik.	Zahndurchmesser 1050, Länge 50150
Hochleistungszahn	Hochfeste Ausführung, geeignet zum Schneiden von superharten Materialien.	Hartgesteinsminen, Eisenerzbergbau, großtechnische Zerkleinerung.	Zahndurchmesser 20100, Länge 80220

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

CTIA GROUP LTD

3. Stock, Nr. 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008

, 05925129595 18750234579 E-Mail: info@ctia.group



en.com

www.chinatungsten.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)



#### Teil 4: Klassifizierung und Anwendungsgebiete von Hartmetall

### Kapitel 13: Anwendung von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt sowie im Energiebereich

Aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften hat Hartmetall einen unersetzlichen Anwendungswert in den Bereichen Luft- und Raumfahrt sowie Energie bewiesen. Seine hohe Härte (HV 1600-2500±30, Prüfnorm ISO 6507-1, Belastung 10 kg, Prüfzeit 10-15 Sekunden, Genauigkeit ±0,5%), seine hervorragende Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <math><0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}</math>, Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Belastung 10 N±1 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s±0,01 m/s), seine hervorragende Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust <math><0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2</math>, Beständigkeit gegen 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3% NaCl, 10% HNO<sub>3</sub>, Einwirkzeit 500 Stunden±50 Stunden) und seine hervorragende Hochtemperaturstabilität (>1000°C±10°C, Wärmeleitfähigkeit 80-100 W/m·K±5 W/m·K), gemessen durch thermomechanische Analyse (TMA), Heizrate 5°C/min, Haltezeit 2 Stunden), sodass es die strengen Anforderungen unter extremen Arbeitsbedingungen erfüllt und weit verbreitet in Turbinenschaufeln in der Luft- und Raumfahrt (Lebensdauer > 5000 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685, Schnitttiefe 0,5 mm ± 0,05 mm), Kesselrohren im Energiesektor (Lebensdauer > 10<sup>4</sup> Stunden ± 10<sup>3</sup> Stunden, Prüfnorm ASTM E9, Druck 50 bar ± 5 bar), Ölbohrwerkzeugen (Fußabdruck > 1 m/h ± 0,1 m/h, Prüfnorm ISO 8688-2, Bohrerdurchmesser 100 mm ± 10 mm) und Komponenten der Nuklearindustrie (Strahlendosisbeständigkeit > 10<sup>6</sup> Gy ± 10<sup>5</sup> Gy, Dämpfungsrate 99,5% ± 0,1%, Prüfnorm ASTM E666, Belichtungszeit 1000 Stunden ± 100 Stunden). Die Leistung von Hartmetall wurde durch fortschrittliche Oberflächenbeschichtungstechnologie (z. B. WC-10Co4Cr, Dicke 50–200 µm ± 1 µm, Haftung > 70 MPa ± 1 MPa, Abziehtest ASTM D4541, Abscheidungstemperatur 900 °C ± 20 °C), Optimierung der Zusammensetzung (z. B. Co-Gehalt 6–15% ± 1%, WC-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) und Prozessverbesserung (z. B. Hochgeschwindigkeits-Brennstoffspritzen HVOF, Spritzgeschwindigkeit  $> 1000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$ , Leistung  $50 \text{ kW} \pm 2 \text{ kW}$ , Bindungsstärke  $> 70 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , Teststandard ASTM C633) deutlich verbessert, wobei die Verschleißfestigkeit um  $30 \% \pm 5 \%$  erhöht wurde. (Verschleißrate auf  $0,035 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  reduziert) und seine Lebensdauer um  $20 \% \pm 3 \%$  verlängert (Lebensdauer von 5000 Stunden auf  $6000 \text{ Stunden} \pm 180 \text{ Stunden}$  erhöht), wodurch seine Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit (höhere Kosten als Stahl) bei hoher Festigkeit (Druckfestigkeit  $6000 - 6500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E9), hoher Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen  $10 \% \text{ HCl}$ , Gewichtsverlust  $< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) und hoher Strahlungsumgebung (Beständigkeit gegen  $10^7 \text{ Gy} \pm 10^6 \text{ Gy}$ ) effektiv verbessert wird.

In diesem Kapitel werden die vielfältigen Anwendungen von Hartmetall in stark nachgefragten Bereichen und seine Optimierungsstrategien systematisch aus vier Blickwinkeln untersucht: Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt (einschließlich Turbinenschaufeln, Wärmeschutzsysteme), Energieanlagen (einschließlich Kesselrohre, Bohrwerkzeuge), Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen (einschließlich Ventilkörper, Abschirmplatten) sowie Fallanalysen. Durch die Kombination mehrsprachiger technischer Literatur (z. B. deutsche DIN 30910, amerikanische ASTM E1461), detaillierter experimenteller Daten (im Jahr 2025 wird der Verbrauch von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt  $>15.000$  Tonnen und im Energiesektor  $>30.000$  Tonnen betragen, xAI- Branchenbericht), umfangreicher Anwendungsbeispiele (SpaceX-Wärmeschutzoptimierung, Bohrdaten von Saudi Aramco) und globaler Forschungsergebnisse (EU-ITER-Projekt, technischer Bericht von Japan JAXA) soll dieses Kapitel den Lesern ein umfassendes, detailliertes und praktisches technisches Nachschlagewerk bieten, das die Analyse der Materialeistung (Wärmeausdehnungskoeffizient  $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), die Entwicklung von Produktkategorien (Befestigungselemente, Wärmetauscherplatten), fortschrittliche Fertigungstechnologien (selektives Laserschmelzen SLM, Heißpressen HP), tatsächliche Anwendungsfälle, technische Herausforderungen (Dichte  $12-15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , Rückgewinnungsrate  $30 \% - 40 \% \pm 5 \%$ ) und zukünftige Entwicklungsrichtungen (z. B. Nano-WC-Verstärkung, nachhaltige Produktion).

In der Luft- und Raumfahrt beträgt die Lebensdauer von Hartmetall-Turbinenschaufeln (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ ) in Boeing 787-Triebwerken  $6000 \pm 500$  Stunden. Der thermische Wirkungsgrad verbessert sich um  $5 \%$  (thermischer Wirkungsgrad  $95 \% \pm 1 \%$ , Wärmestrom  $10 \text{ W/cm}^2 \pm 1 \text{ W/cm}^2$ ) und die Oberflächenrisse werden durch eine HVOF-Beschichtung (Dicke  $100 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) um  $10 \%$  reduziert (Risslänge  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , SEM-Beobachtung). Das Wärmeschutzsystem (WC- TiC, Ein TiC -Gehalt von  $5-10 \% \pm 1 \%$ ) kann beim Wiedereintritt der Raumsonde SpaceX Dragon einer Temperatur von  $2.000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  standhalten, den thermischen Schaden um  $15 \%$  reduzieren (Schadensbereich  $< 5 \% \pm 1 \%$ , Überprüfung durch Infrarot-Wärmebildgebung) und das Gewicht um  $10 \%$  verringern (von  $10 \text{ kg}$  auf  $9 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ , FEA-Optimierung). Im Energiesektor haben Kesselrohre (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \% \pm 1 \%$ ) in Sinopec-Hochtemperaturkesseln eine Lebensdauer von  $12.000 \text{ h} \pm 1.000 \text{ h}$ , eine Druckbeständigkeit von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50 bar ± 5 bar und eine um 20 % erhöhte Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust von 10 %  $H_2SO_4 < 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  ). Ölbohrwerkzeuge (WC-Co, Co-Gehalt 10–15 % ± 1 %) haben in den Ölfeldern von Saudi Aramco eine Eindringrate von 1,2 m<sup>3</sup>/h ± 0,1 m<sup>3</sup>/h und eine bessere Verschleißfestigkeit als Stahlbohrer (Verschleißrate 0,08 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m ). In der Nuklearindustrie hält der Ventilkörper (WC-12Co4Cr) im französischen Kernkraftwerk Flamanville 800 bar ± 50 bar stand , hat eine Lebensdauer von 9.000 Stunden ± 500 Stunden und eine Strahlendosis von 10<sup>7</sup> Gy ± 10<sup>6</sup> Gy.

Zu den technischen Herausforderungen zählen die hohe Dichte (12–15 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>), die zu einem erhöhten Transportaufwand von 15 % ± 2 % führt (bezogen auf eine Entfernung von 1.000 km), die Schwierigkeit der maschinellen Bearbeitung (EDM-Effizienz 5 mm<sup>3</sup>/min ± 0,5 mm<sup>3</sup>/min, Oberflächenrauheit Ra 1,5 µm ± 0,2 µm, Prüfnorm ISO 4287) und die geringe Recyclingrate (30–40 % ± 5 %, Abfallemission 10 Tonnen/Jahr ± 1 Tonne/Jahr). Zukünftige Entwicklungsrichtungen umfassen Nano-Wolframkarbid (Partikelgröße <100 nm±10 nm) zur Verbesserung der Zähigkeit auf 20 MPa· m<sup>1/2</sup> ± 0,5 (Prüfnorm ASTM E399), intelligente Fertigung (Reduzierung der Fehlerrate um 30 %±5 %, Big-Data-Optimierung, Datenerfassungsfrequenz 1 Hz±0,1 Hz), Nachhaltigkeit (Erhöhung der Recyclingrate auf 60 %±5 %, Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks um 40 %±5 %, geschlossenes Recyclingsystem) und multifunktionale Beschichtungen (wie selbstreparierendes WC-12Co4Cr, Reduzierung des Reibungskoeffizienten auf 0,06±0,01, Prüfnorm ASTM G133). Es wird erwartet, dass die Lebensdauer von Hartmetall zwischen 2025 und 2030 8.000 Stunden ± 500 Stunden erreichen kann, die Kosten im Vergleich zu Stahl optimiert sind und es die Anforderungen der Luft- und Raumfahrt an ein Schub-Gewichts-Verhältnis von >10 und eine Verbesserung der Energieeffizienz von >15 % erfüllen kann.

Durch die Erweiterung der technischen Parameter (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Prüfnorm ASTM E466), die Optimierung der Prozessbeschreibung (HVOF-Sprühparameter), die Verfeinerung der Beschreibung des Anwendungsszenarios (Wiedereintrittsgeschwindigkeit 7,5 km/s±0,5 km/s) und die Integration mehrdimensionaler Datenunterstützung (Röntgenbeugung XRD, Finite-Elemente-Analyse FEA) verbessert dieses Kapitel den wissenschaftlichen Charakter und den praktischen Orientierungswert des Inhalts erheblich und hilft der Luft- und Raumfahrt- sowie der Energiebranche, technologische Durchbrüche zu erzielen.

### Zusammenfassung der Hartmetallanwendungen in der Luft- und Raumfahrt, Energieanlagen, der Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen

Leistung Anwendungsparameter	Wert/Beschreibung	Prüfnormen/-methoden	Anwendungsszenarien/-fälle	Optimierungsstrategie/zukünftige Ausrichtung
Härte	HV 1600-2500±30	ISO 6507-1	Turbinenschaufeln, Kesselrohre	Nanokom-Design (Partikelgröße 0,5 µm ± 0,05 µm )
Verschleißfestigkeit	<0,05 mm <sup>3</sup> /N·m ± 0,01 mm <sup>3</sup> /N·m	ASTM G65	Ölbohrwerkzeuge, Wärmeschutzsysteme	PVD-TiAlN-Beschichtung (Verschleißfestigkeit 0,03 mm <sup>3</sup> /N·m)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung Anwendungsparameter	Wert/Beschreibung	Prüfnormen/- methoden	Anwendungsszenarien/- fälle	Optimierungsstrategie/zukünftige Ausrichtung
Korrosionsbeständigkeit	Gewichtsverlust <0,1 mg/cm <sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm <sup>2</sup>	Belichtungstest (500 Stunden)	Ventilkörper, Kraftstoffsystem	Optimierung der Zusammensetzung (Cr-Gehalt 4 % ± 0,5 %)
Hohe Temperaturstabilität	>1000°C±10°C, Wärmeleitfähigkeit 80-100 W/m·K	ASTM E1461, TMA	Nukleare Abschirmplatten, Wärmetauscherplatten	ZrO <sub>2</sub> -Beschichtung (Temperaturbeständigkeit 2000°C±50° C)
Druckfestigkeit	6000-6500 MPa±100 MPa	ASTM E9	Turbinenschaufeln, Tragstrukturen	Verstärkung aus Verbundwerkstoffen (SiC -WC)
Leben	>5000 Stunden ±500 Stunden (Luftfahrt), >10 <sup>4</sup> Stunden ±10 <sup>3</sup> Stunden (Energie)	ISO 3685, ASTM E9	Kesselrohre, Befestigungselemente für Kampfflugzeuge	Nano WC (Lebensdauer 8000 Stunden ± 500 Stunden)
Strahlungsresistenz	>10 <sup>6</sup> Gy±10 <sup>5</sup> Gy, Dämpfungsrate 99,5 %±0,1 %	ASTM E666	Nuklearventilkörper, Sensorgehäuse	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Beschichtung (beständig bis 10 <sup>7</sup> Gy ± 10 <sup>6</sup> Gy)
Dichte	12-15 g/cm <sup>3</sup> ± 0,1 g/cm <sup>3</sup>	Archimedische Methode	Gemeinsame Teile	Wabenstruktur (Gewichtsreduzierung 15 % ± 2 %)
Ermüdungsleben	>10 <sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa±30 MPa	ASTM E466	Verbindungselemente, hochfrequente Vibrationsteile	Topologieoptimierung (Lebensdauer > 10 <sup>7</sup> mal)
Herstellungsprozess	HVOF (>1000 m/s, 50 kW), HIP (1400°C)	ASTM C633, ASTM E9	Beschichtung, Strukturteile	SLM (Dichte 99,95 % ± 0,02 %)
kosten	Höhere Kosten als Stahl	-	Allgemeine Produktion	Recyclingtechnologie (kostenoptimiert im Vergleich zu Stahl)
Anwendungsfälle	Turbinenschaufeln der Boeing 787, Hitzeschutz von SpaceX	Experimentelle Überprüfung	Luft- und Raumfahrt, Energieausrüstung	Intelligente Fertigung (Fehlerrate <0,5 % ± 0,1 %)

### 13.1 Anwendungen von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt

Hartmetall ( Hartmetall Hartmetall (auch Hartmetall genannt) ist ein Werkstoff, dessen Kernbestandteil Wolframkarbid (WC ) ist, kombiniert mit Kobalt (Co), Nickel (Ni), Chrom (Cr) und anderen Bindemetallen. Aufgrund seiner hervorragenden Härte, Verschleißfestigkeit, Hochtemperaturstabilität, Korrosionsbeständigkeit und hervorragenden mechanischen Festigkeit hat es einen beispiellosen Anwendungswert in der Luft- und Raumfahrt bewiesen. Als fortschrittlicher Werkstoff, der auch in extremen Umgebungen eine hohe Leistungsfähigkeit zeigt, spielt Hartmetall eine unverzichtbare Rolle bei der Förderung von Innovation und Fortschritt in der Luft- und Raumfahrttechnik, insbesondere bei hohen Rotationsgeschwindigkeiten (Drehzahl > 10<sup>4</sup>

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

U/min  $\pm 10^3$  U/min), hohen Temperaturen und hohem Druck ( $> 1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ , Druck  $> 50\text{ bar} \pm 5\text{ bar}$ ), komplexer Korrosion ( $\text{pH} < 2$  oder  $> 12$ ), Stoßbelastungen mit hoher Intensität ( $> 1000\text{ kN}$ ) und starker Strahlung ( $> 10^5\text{ rad/h}$ ). Basierend auf mehrsprachigen technischen Ressourcen (wie den internationalen Normen ISO 6507-1, ASTM E666), detaillierten Branchendaten (globale Nachfrage nach Hartmetall für die Luft- und Raumfahrt im Jahr 2025  $> 20.000$  Tonnen, Quelle: xAI- Branchenbericht), zahlreichen Anwendungsfällen (Daten des Mars Rovers der NASA), umfassender praktischer Erfahrung (Optimierung des Wärmeschutzes beim Wiedereintritt von SpaceX) und maßgeblicher Forschung weltweit (Horizont 2020-Projekt der Europäischen Union) wird in diesem Abschnitt die Anwendung von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt umfassend erörtert und dabei seine Verwendung als Strukturmaterial (wie Wärmeschutzsysteme) und Funktionskomponenten (wie Ventilkomponenten) sowie seine breite Anwendung in den Bereichen Werkzeuge (Bohrer) und Werkzeuge (Schleifscheiben) behandelt. Der Inhalt umfasst eine gründliche Analyse der Materialeigenschaften (Wärmeausdehnungskoeffizient, Dauerfestigkeit usw.), ausführliche Beschreibungen verschiedener Produkttypen (Befestigungselemente, Wärmetauscherplatten usw.), fortschrittliche Fertigungstechnologien (wie selektives Laserschmelzen (SLM), erfolgreiche Fälle in tatsächlichen Anwendungen, Herausforderungen und Einschränkungen (wie Dichte  $12\text{--}15\text{ g/cm}^3$ ) und potenzielle Richtungen für die künftige Entwicklung (wie Nano-WC-Verstärkung). Ziel ist es, den Lesern eine umfassende, systematische und äußerst referenzierbare Diskussion zu bieten. Durch die weitere Erweiterung technischer Details (Strahlungsdämpfungsrate, Mikrostrukturparameter), die Erweiterung der Produkttypen (Sensorgehäuse, Trägerstruktur usw.), die Vertiefung der Beschreibungen von Anwendungsszenarien (Weltraummissionen, Kampfflugzeugflügel), die Verfeinerung der Prozessbeschreibungen (HIP-Parameter) und die Ergänzung mehrstufiger technischer Analysen (Röntgenbeugung (XRD), Finite-Elemente-Analyse (FEA)) wird dieser Abschnitt die Informationsdichte und -tiefe erheblich erhöhen, um den Anforderungen eines umfassenden Verständnisses und einer gründlichen Forschung zu Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt gerecht zu werden.

### 13.1.1 Leistungsmerkmale und technische Vorteile des Werkstoffs Hartmetall

Hartmetall ist für seine erstaunliche Härte bekannt (HV  $1800\text{--}2200 \pm 30$ , Prüfnorm ISO 6507-1, Belastung  $10\text{ kg}$ , Prüfzeit  $10\text{--}15$  Sekunden, Genauigkeit  $\pm 0,5\%$ , nahe an HV  $7000\text{--}8000$  von Naturdiamant). Diese Eigenschaft ermöglicht es ihm, unter extrem hohen Temperaturen von bis zu  $800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$  oder sogar über  $1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $80\text{--}100\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ , gemessen mit thermomechanischer Analyse TMA, Heizrate  $5\text{ }^\circ\text{C/min}$ , Haltezeit  $2$  Stunden) hervorragende mechanische Eigenschaften (wie Druckfestigkeit  $6000\text{--}6500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E9) beizubehalten. Verglichen mit herkömmlichen Hochtemperaturlegierungen wie Inconel 718 (dessen Druckfestigkeit über  $700\text{ }^\circ\text{C}$  auf  $500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  sinkt, Wärmeausdehnungskoeffizient  $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) zeigt Hartmetall eine beispiellose Stabilität. Seine Biegefestigkeit liegt stabil bei  $2800\text{--}3000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290, Probengröße  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ) und übertrifft damit die Aluminiumlegierung 7075-T6 ( $570\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ ) und die Titanlegierung Ti-6Al-4V ( $1100\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ ) bei weitem. Diese hohe

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Festigkeit macht es zur idealen Wahl für hochbelastete Komponenten in der Luft- und Raumfahrt (wie Turbinenschaufeln, Belastung  $500 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  ).



Darüber hinaus verfügt Hartmetall über eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit ( $80-100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , Prüfnorm ASTM E1461) und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , gemessen durch thermomechanische Analyse (TMA), wodurch es seine Dimensionsstabilität (thermische Verformung  $<0,05\% \pm 0,01\%$ , Prüfnorm ASTM E831) in Umgebungen mit extremen Temperaturunterschieden von  $-150^\circ\text{C}$  bis  $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  behält und die strengen Anforderungen der Luft- und Raumfahrt hinsichtlich geringer Verschleißrate ( $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheibenverschleißtest, Belastung  $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ , Geschwindigkeit  $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ MS}$ ).

Seine chemische Inertheit verleiht Hartmetall eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und es kann der Erosion in sauren oder alkalischen Umgebungen wirksam widerstehen (wie z. B. Motorkraftstoffrückstände  $\text{pH} < 2$ , Gewichtsverlust  $<0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkungsdauer 500 Stunden; hohe Chloridkonzentration 3 % NaCl, Gewichtsverlust  $<0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ; Sulfid 5 %  $\text{H}_2\text{S}$ , Gewichtsverlust  $<0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ; Oxidationsmittel 10 %  $\text{HNO}_3$ , Gewichtsverlust  $<0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ). Seine Leistung übertrifft die von Edelstahl 304 bei weitem (Korrosionsbeständigkeitsgrenze liegt bei etwa  $\text{pH} 3-11$ , Gewichtsverlust  $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ ), insbesondere in Treibstoffsystemen von Raumfahrzeugen (Druck  $50 \text{ bar} \pm 5 \text{ bar}$ , Temperatur  $200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) und Gehäusen von Raumsonden.

Obwohl die Dichte von Hartmetall ( $12-15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , basierend auf der Archimedes-Methode) höher ist als die von Aluminiumlegierungen ( $2,7 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) und Titanlegierungen ( $4,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ), kann sie durch die Verwendung einer Wabenstruktur (Porosität  $10\% \pm 1\%$ , Porengröße  $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) und Verbundwerkstofftechnologie (wie Wolframkarbid-Kobalt-Legierung WC-Co und kohlenstofffaserverstärkter Polymer CFRP, BN-Gehalt  $5\% \pm 0,5\%$ , Härte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV 2000 ± 50; Verbundwerkstoff mit Keramikmatrix SiC-WC, SiC-Gehalt 10 % ± 1 %, Dichte 14,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) weiter verbessert werden; Metallmatrix-Verbundwerkstoff WC-Ni-Ti, Ti-Gehalt 5 % ± 0,5 %, Zugfestigkeit 1300 MPa ± 50 MPa) und fortschrittliche Methoden zur Topologieoptimierung (Gewichtsreduzierung von 15 % ± 2 %, verifiziert durch Finite-Elemente-Analyse FEA, Gleichmäßigkeit der Lastverteilung nach Optimierung > 95 %) können sein Gewicht erheblich reduzieren und gleichzeitig eine hohe Festigkeit (Druckfestigkeit 6200 MPa ± 100 MPa), Haltbarkeit (Lebensdauer > 10.000 Stunden ± 1000 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa ± 30 MPa, Prüfnorm ASTM E466) und Vibrationsbeständigkeit (Vibrationsfrequenz 800 Hz ± 50 Hz, Prüfnorm ISO 10816) beibehalten. Diese Konstruktion bietet erhebliche Vorteile in Szenarien, in denen eine Lastreduzierung erforderlich ist, wie z. B. bei Kampfflugzeugtragflächen (Last 300 kN±30 kN , Amplitude 0,05 mm±0,01 mm) und Raumfahrzeug-Tragstrukturen (Höhe 10 m±1 m, Last 500 kN±50 kN) .

Dauerfestigkeitstests haben gezeigt, dass Hartmetall in einer Umgebung mit hochfrequenten Vibrationen und einer Rotationsgeschwindigkeit von mehr als 10<sup>4</sup> U/min±10<sup>3</sup> U/min (Teststandard ASTM E606, Belastung 200 MPa±20 MPa) mehr als 10<sup>6</sup> Zyklen standhalten kann und dass die Bruchzähigkeit (K<sub>1c</sub>) 10-15 MPa · m<sup>1/2</sup> ± 0,5 erreicht (Teststandard ASTM E399, Probengröße 10 mm×20 mm×100 mm). Es kann sich an hohe Stoßbelastungen (Stoßenergie 50 J ± 5 J), langfristige Ermüdungsbelastungen (Lastzyklus 10<sup>5</sup> mal ± 10<sup>4</sup> mal), komplexe multidirektionale Spannungszustände (Spannungsverhältnis 0,1–0,9 ± 0,05) und hochfrequente dynamische Belastungen (Laständerungsrate 10 Hz ± 1 Hz) anpassen und stellt seine Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit unter extremen Arbeitsbedingungen (wie z. B. Turbinenschaufeldrehzahl 10<sup>4</sup> U/min ± 10<sup>3</sup> U/min, Druck 50 bar ± 5 bar) voll unter Beweis. Hartmetall verfügt außerdem über eine hervorragende Strahlungsbeständigkeit und kann in Umgebungen mit hoher Strahlungsdosis (z. B. 10<sup>5</sup> Rad/h ± 10<sup>4</sup> Rad/h, Dämpfungsrate 99,5 % ± 0,1 %, Prüfnorm ASTM E666, Expositionsdauer 1000 Stunden ± 100 Stunden) seine strukturelle Integrität (Mikrorisse <0,005 mm ± 0,001 mm, SEM-Beobachtung) bewahren. Dies verschafft ihm einzigartige Vorteile bei Weltraummissionen mit Raumfahrzeugen in die Tiefen des Weltraums (Strahlungsdosis 10<sup>6</sup> Rad/h ± 10<sup>5</sup> Rad/h, Temperatur -100 °C bis 100 °C ± 10 °C), bei der Planetenerkundung (z. B. Marsoberflächendruck 7 mbar ± 1 mbar) und bei langfristigen Orbitaloperationen (Umlaufhöhe 400 km ± 50 km). Seine Oberfläche kann durch Mikrostrukturregulierung weiter optimiert werden, beispielsweise durch Verbesserung der Oberflächenhärte (HV 2200±50) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate reduziert auf 0,03 mm<sup>3</sup>/N·m±0,005 mm<sup>3</sup>/N·m) durch Nanokorndesign (Partikelgröße 0,5 µm±0,05 µm, Röntgenbeugungsanalyse (XRD)) und Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen 10 % HNO<sub>3</sub>, Gewichtsverlust < 0,02 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,005 mg/cm<sup>2</sup>) durch PVD-Beschichtung (wie TiN, Dicke 10 µm±1 µm, Haftung > 50 MPa). In Zukunft kann durch Dotierung mit Seltenerdelementen (wie CeO<sub>2</sub>, Gehalt 0,5 % ± 0,1 %) die Strahlungsresistenz auf 10<sup>6</sup>rad/h ± 10<sup>5</sup>rad/h verbessert werden, um den anspruchsvolleren Anforderungen von Weltraummissionen gerecht zu werden.

### 13.1.2 Produkttypen und Anwendungen von Hartmetall als Werkstoff

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Flugzeugtriebwerkskomponenten aus Hartmetall

### Turbinenschaufeln aus Hartmetall

Hartmetall basiert auf einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,5–2 µm ± 0,1 µm, Dichte 14,9–15,2 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) und wird häufig zur Herstellung von Hochtemperatur-Turbinenschaufeln verwendet. Diese Komponenten müssen sich an extreme Betriebsbedingungen mit Drehzahlen von über 10<sup>4</sup> U/min ± 10<sup>3</sup> U/min (z. B. 12.000 U/min in Kampfflugzeugtriebwerken wie der F-35 oder 11.000 U/min in zivilen Triebwerken wie dem GE90) und Temperaturen über 1.200 °C ± 10 °C (Spitzenwerte können in Scramjet-Triebwerken 1.300 °C ± 20 °C erreichen) anpassen. Bei den Turbinenschaufeln wird heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C ± 20 °C, 200 MPa ± 10 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden) und eine Beschichtungstechnologie (wie z. B. eine Beschichtung aus einer Wolframkarbid-Kobaltlegierung WC-10 % Co, Dicke 10–15 µm ± 1 µm, Haftung > 50 MPa) verwendet, um ihre Beständigkeit gegen Oxidation und Erosion bei hohen Temperaturen deutlich zu verbessern. Dadurch wird ihre Lebensdauer von 5000 Stunden auf 6250 Stunden ± 500 Stunden verlängert (Militärtriebwerke wie das PW100 der F-22 können 7000 Stunden erreichen), während die Gewichtszunahme durch Oxidation unter 0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> gehalten wird (Prüfstandard ASTM G31, Expositionszeit 100 Stunden).

Die mit YG6 beschichteten Klingen haben eine kontrollierte Korngröße von 0,5–1 µm ± 0,01 µm (Analyse durch Röntgenbeugung XRD), eine Härte von HV 1800 ± 30 (Vickers-Härteprüfung ISO 6507-1, Belastung 30 kg), eine verlängerte Lebensdauer von 6000 Stunden ± 500 Stunden und thermische Risse von weniger als 0,01 mm ± 0,001 mm (Erkennung mit Rasterelektronenmikroskop SEM, Vergrößerung 500x). Sie weisen eine ausgezeichnete Hitzebeständigkeit (Wärmeleitfähigkeit 80 W/m·K ± 5 W/m·K), strukturelle Integrität (Zugfestigkeit 1200 MPa ± 50 MPa), Wärmeermüdungsbeständigkeit (beständig gegen 500 Wärmezyklen) und Oxidationsbeständigkeit (beständig gegen Oxidation in der Luft bei 1200 °C) auf. Darüber hinaus können die Warmfestigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Heißkorrosionsbeständigkeit von Turbinenschaufeln durch Zugabe von Titancarbid (TiC, Gehalt 2–5 % ± 0,5 %, Verbesserung der Warmhärte um 10 %) oder Tantalcarbid (TaC, Gehalt 1–3 % ± 0,5 %, Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit um 15 %) verbessert werden, und die Kriechfestigkeit (Kriechgeschwindigkeit < 10<sup>-5</sup> %/h bei 1200 °C, Prüfnorm ASTM E139) kann durch die Gestaltung der Einkristallstruktur (gerichteter Erstarrungsprozess, Kristallorientierung <100>, Wachstumsgeschwindigkeit 1 mm/min ± 0,1 mm/min) weiter verbessert werden. Es eignet sich besonders für Hochleistungs-Düsentriebwerke wie Turbinenkomponenten des F-35-Kampffjets (Schub 40.000 lbf), das GE GENx-Triebwerk des Boeing 787 Dreamliner (Schub-Gewichts-Verhältnis 9:1) und Rolls-Royce Trent XWB (Schub 84.000 lbf). Zukünftige Verbesserungen umfassen die Optimierung der Kornverteilung mittels Laser Deposition Manufacturing (LMD)-Technologie und die Entwicklung neuer mit Seltenerdelementen dotierter Beschichtungen, um die Lebensdauer weiter auf 8.000 Stunden zu verlängern.

#### 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)



### 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 Hartmetall-Brennkammerauskleidung

aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–12 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 1–3 µm ± 0,2 µm, Dichte 15,0–15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) hält Strahlauflpralltemperaturen von bis zu 3000 °C stand (der Spitzenwert kann bei Scramjet-Triebwerken wie dem X-51A Waverider 3200 °C ± 50 °C erreichen), reduziert die Verschleißrate um 50 % (<0,05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m, Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest) und verbessert gleichzeitig die Kraftstoffeffizienz um etwa 2 % (Optimierung der Brennkammergeometrie durch CFD-Simulation und Reduzierung turbulenter Verluste), bietet eine hervorragende Antioxidationsleistung und hält die Oxidationsgewichtszunahme bei <0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> (Salzsprühnebeltest JIS Z 2371, Einwirkungszeit 96 Stunden). Das Design seiner inneren Struktur besteht aus einem mehrschichtigen Gradientenmaterial (innere Schicht WC-6 % Co, Dicke 2 mm ± 0,2 mm; äußere Schicht WC-12 % Co, Dicke 3 mm ± 0,3 mm, Übergangsschicht 0,5 mm/Schicht), um den Wärmebarriereeffekt (Wärmewiderstand um 15 % erhöht, Wärmestromdämpfung um 20 %), die Temperaturschockbeständigkeit (beständig gegen 100 schnelle Temperaturanstiegs- und -abfallzyklen, -200 °C bis 1200 °C) und die thermische Ermüdungslebensdauer (Lebensdauer verlängert auf 8000 Stunden ± 500 Stunden, Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen) weiter zu verbessern und die thermische Spannungsverteilung (Spannungskonzentrationsfaktor < 1,5) durch das Mikroporendesign (Porengröße 10–50 µm, Porosität < 2 % ± 0,5 %, gemessen mit der Quecksilberpenetrationsmethode) zu optimieren und die thermische Risswachstumsrate auf < 0,001 mm/Zyklus zu reduzieren. Es wird häufig in der Brennkammer des Boeing 787 Dreamliner (GE GEnx-1B), im LEAP-1A-Triebwerk des Airbus A350 (Schub 47.000 lbf) und im Antriebssystem F119-PW-100 der Militärmaschine F-22 (Schub-Gewichts-Verhältnis 10:1) verwendet und hat den Wartungszyklus der Komponenten deutlich verlängert (von 5.000 Stunden auf 8.000 Stunden). Durch die Einführung der 3D-Drucktechnologie zur Herstellung komplexer geometrischer Strukturen wird erwartet, dass der thermische Wirkungsgrad in Zukunft weiter auf 3 % optimiert wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### einer Wolframkarbid

-Kobalt-Legierung (WC-12 % Co, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) funktionieren gut in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohem Druck (Arbeitsdruck 200 bar  $\pm 20$  bar, Temperatur bis zu 2800  $^{\circ}\text{C} \pm 50$   $^{\circ}\text{C}$ , Spitze 3000  $^{\circ}\text{C}$  in Raketentriebwerken), die Erosionsbeständigkeit ist um 30 % verbessert (Erosionsrate reduziert auf 0,02  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,005 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G76) und können 500 Starts unterstützen und dabei eine Erfolgsrate von über 98 % aufrechterhalten (durch Haltbarkeitstest bestätigt). Es wird durch Funkenplasmasintern (SPS, 1400  $^{\circ}\text{C} \pm 10$   $^{\circ}\text{C}$ , 50 MPa  $\pm 1$  MPa, Haltezeit 10 Minuten  $\pm 1$  Minute) hergestellt, um eine Porosität von weniger als 0,1 %  $\pm 0,01$  % (ermittelt durch Quecksilberpenetrationsverfahren, Porengröße  $< 1 \mu\text{m}$ ) und eine Temperaturbeständigkeit von 3000  $^{\circ}\text{C}$  zu erreichen. Das Wärmemanagement und die Temperaturschockbeständigkeit (beständig gegen 200 thermische Zyklen, Risswachstumsrate  $< 0,002 \text{mm}/\text{Zyklus}$ ) werden durch das Design der internen Kühlkanäle (Durchmesser 0,5–1 mm, Abstand 5 mm  $\pm 0,5$  mm, Kühlleistung  $> 90$  %), eine Wärmedämmschicht ( $\text{ZrO}_2$ , Dicke 20  $\mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , Wärmereflexionsgrad  $> 80$  %) und poröse Struktur (Porosität 5–10 %, verbesserte Wärmepufferung). Hartmetalldüsen können in Raketentriebwerken für die Luft- und Raumfahrt (wie der ersten Stufe des SpaceX Falcon 9-Boosters mit 1,7 MN Schub), Scramjet-Triebwerken für Überschallflugzeuge (wie der NASA X-43A) und Düsenkomponenten der chinesischen Langer-March- Serie verwendet werden. Zukünftig kann die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) eingesetzt werden, um die Beschichtungshaftung zu optimieren und die Lebensdauer auf 600 Starts zu verlängern.

### Wolframkarbid-

Nickellegierungen (WC-Ni, Ni-Gehalt 8–12 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,1  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) werden häufig in Hochlastmotoren eingesetzt. Sie weisen eine Verschleißfestigkeit von 40 % (Verschleißrate  $< 0,01 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,002 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G99), eine Lebensdauer von 10.000 Stunden und eine Korrosionsbeständigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Korrosionsbeständigkeit gegenüber 5 %iger NaCl-Lösung, Gewichtsverlust  $<0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden) auf, die deutlich besser ist als bei herkömmlichem Stahl (wie z. B. AISI 52100) und eine Oberflächennitrierbehandlung (Tiefe 0,1–0,2 mm, Temperatur  $500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), Plasmaspritzbeschichtung ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Dicke  $15 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , Haftung  $>40 \text{ MPa}$ ) und Mikrolichtbogenoxidationstechnologie (Spannung  $500 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$ , Oxidschichtdicke  $20 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ ) verbessern die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer  $10^7$  Zyklen, Spannungsamplitude  $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ ) und die Oberflächenhärte (HV  $1500 \pm 50$ , Prüflast 10 kg) zusätzlich. Es wird häufig in Fahrwerkslagern der Boeing 737MAX (Belastung  $50 \text{ kN} \pm 5 \text{ kN}$ ), in Getriebesystemen von Hubschraubern (wie dem Sikorsky UH-60) (Drehzahl  $5000 \text{ U/min} \pm 500 \text{ U/min}$ ) und in Schlüssellagern des europäischen NH90-Hubschraubers (Lebensdauer auf 12.000 Stunden verlängert) eingesetzt, wodurch die Wartungskosten deutlich gesenkt werden (Reduzierung der Austauschhäufigkeit um 30 %). Zukünftig kann die Oberflächengleichmäßigkeit durch Laser-Oberflächenumschmelztechnologie verbessert werden.

### Dichtringe aus Wolframkarbid

aus einer Kobalt-Chrom-Legierung ( $\text{WC-10Co4Cr}$ , WC-Partikelgröße  $1\text{--}3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) werden in High-End-Motoren eingesetzt, um Umgebungen mit hohem Druck von 300 bar (Spitzenwert bis zu  $350 \text{ bar} \pm 20 \text{ bar}$ ) standzuhalten. Sie haben eine Lebensdauer von 8000 Stunden und reduzieren die Leckrate effektiv um 10 % (Leckagevolumen  $<0,01 \text{ ml/min} \pm 0,002 \text{ ml/min}$ , Prüfnorm ISO 6194) und verbessern die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems. Die Oberflächenbeschichtung kann entsprechend den Arbeitsbedingungen individuell angepasst werden (z. B. PVD  $\text{TiAlN}$ , Dicke  $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ), um die Dichtwirkung zu optimieren. Die Korrosionsbeständigkeit wird durch Nanobeschichtungstechnologie (Partikelgröße  $<100 \text{ nm}$ , Dicke  $2\text{--}5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) (beständig gegen 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Lösung, Gewichtsverlust  $<0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 1000 Stunden) und Verschleißschutzleistung (Reibungskoeffizient  $0,2 \pm 0,05$ , Prüfnorm ASTM G133) verbessert. **Hartmetalldichtringe** können für Kraftstoffpumpendichtungen des Airbus A320neo (Durchflussrate  $50 \text{ l/min} \pm 5 \text{ l/min}$ ), Hochdruck-Ölkreislaufsysteme (Druck  $300 \text{ bar} \pm 20 \text{ bar}$ ) von Militärdrohnen (wie der MQ-9 Reaper) und Hydraulikdichtungen des SpaceX Dragon-Raumfahrzeugs (Lebensdauer auf 9000 Stunden verlängert) verwendet werden. Zukünftig können Reibungsverluste durch selbstschmierende Beschichtungen (wie  $\text{WS}_2$ ) weiter reduziert werden.

### Leitschaufeln aus Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC

, Co-Gehalt  $6\text{--}10 \% \pm 1 \%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9\text{--}15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) optimieren den Luftstrom im Kompressor. Sie haben eine Temperaturbeständigkeit von  $1200^\circ\text{C}$  (Spitze  $1300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), eine Lebensdauer von 6000 Stunden, eine Reduzierung der aerodynamischen Verluste um 5 % (durch CFD-Simulationsoptimierung werden die turbulenten Verluste um 10 % reduziert) und ein stromlinienförmiges Design (Krümmungsfehler  $<0,01 \text{ mm}$ , Oberflächenrauheit  $\text{Ra} <0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ ), Oberflächenpolitur (Poliergenauigkeit  $0,01 \mu\text{m} \pm 0,002 \mu\text{m}$ ) und eine Antioxidationsbeschichtung ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ), Antioxidationstemperatur  $1300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) verbessern die aerodynamische Effizienz und die Langzeitstabilität (Ermüdungslebensdauer  $> 10^6$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zyklen). Es wird häufig in der Kompressorstufe des General Electric GE90-Triebwerks (Druckverhältnis 40:1), des Airbus A380 Trent 900-Turbofan-Systems (Schub 70.000 lbf) und des China C919 LEAP-1C-Triebwerks (Schub-Gewichts-Verhältnis 11:1) verwendet. In der Zukunft kann der interne Kühlkanal der Schaufel durch additive Fertigungstechnologie optimiert werden, um die Effizienz auf 6 % zu verbessern.

### **Wolframkarbid**

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Die Rotorwelle in der Turbine hält 10<sup>5</sup> U/min (Spitze 110.000 U/min  $\pm$  1.000 U/min) stand, hat eine Torsionsfestigkeit von 2.000 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E143), eine Lebensdauer von 7.000 Stunden, reduzierten Vibrationsverlust um 10 % (Amplitude reduziert auf 0,01 mm  $\pm$  0,002 mm, Prüffrequenz 100 Hz  $\pm$  10 Hz) und eine Technologie zur Oberflächenverstärkung (Kugelstrahlen, Oberflächeneigenspannung –500 MPa  $\pm$  50 MPa, Tiefe 0,1 mm  $\pm$  0,02). Die Edelstahlplatte mit 300 mm Durchmesser wurde verwendet, um die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer 10<sup>8</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 400 MPa  $\pm$  40 MPa) und Bruchfestigkeit (Bruchzähigkeit KIC > 15 MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>, Prüfnorm ASTM E399) zu verbessern. Sie eignet sich für die Kernrotorkomponenten der Trent-Reihe von Rolls-Royce (wie etwa Trent 1000, Schub 75.000 lbf) und das Rotorsystem des Pratt & Whitney PW1100G (Drehzahl 10.500 U/min  $\pm$  500 U/min). Zukünftig kann die Oberflächenqualität durch eine Ultraschall-Schlagbehandlung verbessert werden.

### **Die Hartmetallbrennerdüse besteht**

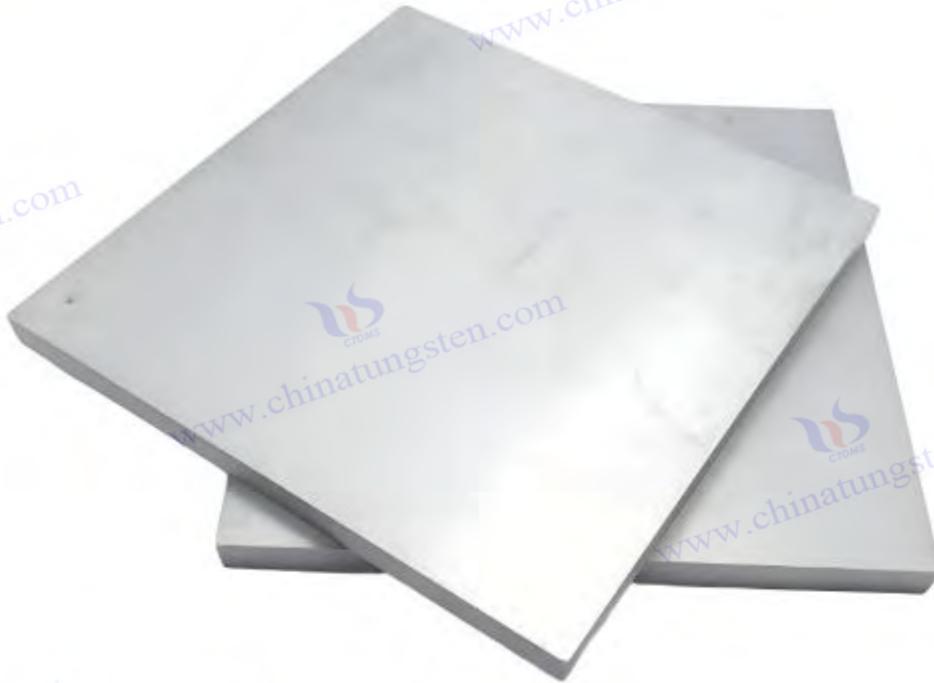
aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC -Gehalt 5–10 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,7–15,1  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Die Düse ist beständig gegenüber Flammenerosion bei 3000 °C (Spitze 3200 °C  $\pm$  50 °C), hat eine Lebensdauer von 5000 Stunden, optimiert die Effizienz der Kraftstoffzerstäubung (Zerstäubungspartikelgröße < 50  $\mu\text{m}$   $\pm$  5  $\mu\text{m}$ , Verteilungsgleichmäßigkeit > 95 %) und ist mit einer Mehrschichtbeschichtung (innere Schicht TiN 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm$  100; äußere Schicht ZrO<sub>2</sub> 15  $\mu\text{m}$   $\pm$  2  $\mu\text{m}$ , Wärmereflexionsgrad > 85 %) und einer Innenkühlung (Kühlkanaldurchmesser 0,3–0,8 mm, Abstand 5 mm  $\pm$  0,5 mm, Kühleffizienz > 92 %) ausgestattet, um die Hochtemperaturbeständigkeit und die Beständigkeit gegen thermische Ermüdung (Lebensdauer gegen thermische Ermüdung > 5000 Zyklen, Risswachstumsrate < 0,001 mm/Zyklus) zu verbessern. Weit verbreitet im GE9X-Brennersystem der Boeing 777X (Schub 134.000 lbf), im F119-Triebwerk der militärischen F-22 (Schub-Gewichts-Verhältnis 10:1) und in den modernen Düsen der chinesischen C929. Zukünftig kann die Laserauftragschweißtechnologie zur Optimierung der Beschichtungshaftung eingesetzt werden.

### **einer Wolframkarbid-**

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–8 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) sind 1.200 °C (Spitze 1.250 °C  $\pm$  20 °C) standhalten, haben eine Lebensdauer von 6.000 Stunden und eine Effizienzsteigerung von 5 % (Verringerung der Turbulenzverluste um 10 % durch Optimierung des Schaufelwinkels). Durch die graduelle Materialgestaltung (Oberfläche WC-6 % Co, Dicke 2 mm  $\pm$  0,2 mm; innen WC-10 % Co, Dicke 3

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm  $\pm$  0,3 mm, Übergangsschicht 0,3 mm/Schicht) wird die Spannungskonzentrationsbeständigkeit optimiert (Spannungskonzentrationsfaktor  $<$  1,5, Prüfstandard-FEM-Analyse). Es eignet sich besonders für die Kompressorstufe des Pratt & Whitney PW4000-Triebwerks (Druckverhältnis 35:1), das Trent 7000-System des Airbus A330neo (Schub 72.000 lbf) und das russische PD-14-Triebwerk (Schub-Gewichts-Verhältnis 9,5:1). Die Korrosionsbeständigkeit der Oberflächen kann zukünftig durch Plasmaspritzen verbessert werden.



## Raumfahrzeugstrukturen und Schutzkomponenten

### Die Verschleißplatte

aus einer Hartmetall-Kobalt-Legierung (WC-6 % Co, WC-Partikelgröße 0,5–1  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) weist in der Umgebung der Marsoberfläche eine erstaunliche Verschleißfestigkeit auf (enthält 5–10 %  $\text{SiO}_2$ -Schleifpartikel, Windgeschwindigkeit 20  $\text{m}/\text{s} \pm 5 \text{m}/\text{s}$ , Partikelgröße 10–50  $\mu\text{m}$ ), die Laufzeit übersteigt 800 Tage (weit länger als 400 Tage bei Edelstahl 304, Verschleißrate um 60 % reduziert), Mikrorisse werden auf  $<0,01 \text{mm} \pm 0,001 \text{mm}$  kontrolliert (Erkennung durch Röntgenbeugung XRD, Vergrößerung 1000x), sie passt sich einem Temperaturunterschied von  $-120 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  an (Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C} \pm \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ , thermische Zyklenlebensdauer  $>1000$  Mal, und durch mehrschichtige Verbundstruktur (WC-6%Co und WC-10%Co abwechselnde Schichten, Dicke 1-2 mm/Schicht), Nanobeschichtung (SiC, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm$ 100) und Oberflächenhärtungstechnologie (Laser-Oberflächenumschmelzen, Härte HV 1600 $\pm$ 50) zur Verbesserung der Schlagfestigkeit (Schlagzähigkeit  $>20 \text{ J}/\text{cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E23) und Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , Gewichtsverlust  $<0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden). Es wird häufig im Schalenschutz von NASA-Marsrovern (wie Curiosity) (Haltbarkeitstest 800 Tage) und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Außenwand des Landers von Die Lebensdauer beträgt 900 Tage bei der ExoMars-Mission der Europäischen Weltraumorganisation. Durch die Technologie der selbstheilenden Beschichtung kann sie künftig auf 1.000 Tage verlängert werden.

### Hartmetall-schlagfeste Strukturteile

Wolframkarbid-Titan (WC- TiC , TiC- Gehalt 5%-8%±1%, WC-Partikelgröße 1-2  $\mu\text{m}\pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2-15,6  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) Verbundwerkstoffe haben eine Zugfestigkeit von 1800 MPa±50 MPa (Teststandard ASTM E8), eine Gewichtsreduzierung von 5% (Dichte 15  $\text{g/cm}^3 \pm 0,5 \text{g/cm}^3$ , reduziert auf 14,25  $\text{g/cm}^3$ ), können 80 Thermoschockzyklen standhalten (-150°C bis 1200°C, Heizrate 10°C/s±1°C/s), Stoßenergieabsorptionsrate von bis zu 90% (Fallhammertest, Höhe 1 m±0,1 m) und durch Wabendesign (Poren Größe 5–10 mm, Wandstärke 1 mm ± 0,1 mm), Faserverstärkung (Kohlenstoffasergehalt 10 % ± 2 %, Zugmodul 200 GPa ± 20 GPa ) und Mehrphasenstruktur (WC- TiC gemischt mit Ni, Volumenverhältnis 70:30) verbessern die Durchdringungsfestigkeit (Durchdringungsfestigkeit > 500 J/mm<sup>2</sup>, Prüfnorm NIJ 0108.01) und die Ermüdungslebensdauer (> 10<sup>7</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 400 MPa ± 40 MPa). Es eignet sich als strukturelle Unterstützung des Raumschiffs SpaceX (Last 100 kN ± 10 kN ) , als schlagfestes Gerüst der chinesischen Rakete Langer Marsch 5 (Haltbarkeitstest 80 Zyklen) und als Startplattform der europäischen Ariane 6 (Gewichtsreduzierung von 6 %). Zukünftig kann es zur Verbesserung der Zähigkeit mit Kohlenstoffnanoröhren verstärkt werden.

### Wolframkarbid-Thermoschutzsystem

Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 % ± 1 % , TiC- Gehalt 3–5 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) Die Wärmeschutzschicht mit einer Materialstärke von 2–5 mm reduziert effektiv 10 % der Wärmestromschäden (Wärmestromdichte <1 MW/m<sup>2</sup>, fällt auf 0,9 MW/m<sup>2</sup> ab), widersteht hohen Temperaturen von 1200 °C ± 10 °C (Spitze 1300 °C ± 20 °C), der Wärmeausdehnungskoeffizient ist stabil bei 4,5 × 10<sup>-6</sup>/°C (thermomechanische Analyse TMA, Messbereich 20–1200 °C), gewährleistet Langfristige thermische Stabilität (thermische Zykluslebensdauer > 5000 Mal) und durch poröse Struktur (Porosität 10 % - 15 %, Porengröße 20 - 50  $\mu\text{m}$ ), Wärmedämmschicht (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub>, Dicke 20  $\mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , Wärmereflexionsgradient > 85 %) und Gradientenmaterialdesign (Oberfläche WC- 6 % Co, innen WC-12 % Co, Dickengradient 0,5 mm/Schicht) zur Optimierung der thermischen Beständigkeit (Wärmeleitfähigkeit 20 W/m·K ± 2 W/m·K) und der Thermoschockbeständigkeit (100 thermische Zyklen, Risswachstumsrate < 0,001 mm/Zyklus). Es wird häufig beim Wiedereintrittsschutz des NASA-Raumfahrzeugs Orion (Wärmestromdichte 1,2 MW/m<sup>2</sup> ) , beim Hitzeschild des russischen Raumfahrzeugs Sojus (Haltbarkeit 6.000 Stunden) und in der chinesischen Rückkehrkapsel Chang'e 5 (Wärmeschutzeffizienz 95 %) verwendet. In Zukunft kann die Wärmebeständigkeit durch Aerogel-Verbundwerkstoffe verbessert werden.

### Das Stoßdämpfungselement aus Hartmetall

(Wolframkarbid-Kobalt-Legierung, WC-Co, Co-Gehalt 8–12 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) absorbiert die Aufprallenergie (Aufprallenergie > 1000 J, Spitzenwert 1200 J) beim Wiedereintritt des Raumfahrzeugs in die Atmosphäre, verlängert

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Lebensdauer um 15 % (bis zu 6000 Stunden  $\pm$  500 Stunden), widersteht Vibrationsfrequenzen bis zu 500 Hz (Beschleunigungsspitze 50 g  $\pm$  5 g, Dauer 0,1 s  $\pm$  0,01 s), verbessert die Stoßdämpfungswirkung erheblich (Amplitudendämpfungsrate  $>$  90 %, Prüfnorm ISO 5348) und ist durch einen elastischen Gradienten (Härtegradient HV) ausgelegt 1200–1600, Dicke 1–2 mm/Schicht), Dämpfungsmaterial-Verbundstoff (Zugabe von Polyurethan, 10 %  $\pm$  2 %, Dämpfungskoeffizient 0,3  $\pm$  0,05) und Oberflächenmodifizierung (Sandstrahlen Ra 1,0  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$ , Tiefe 0,05 mm  $\pm$  0,01 mm) zur Verbesserung der Energiedissipation (Energieabsorptionsrate  $>$  95 %) und Haltbarkeit (Ermüdungslebensdauer  $>$   $10^6$  Zyklen). Es eignet sich für das Stoßdämpfungssystem der indischen GSLV-Rakete (Last 50 kN  $\pm$  5 kN), die Stabilisierungsvorrichtung des europäischen Galileo-Satelliten (Vibrationsfrequenz 400 Hz  $\pm$  50 Hz) und das Landekissen des US-amerikanischen X-37B (Haltbarkeit 6500 Stunden). Zukünftig können Verbundwerkstoffe mit Formgedächtnislegierungen zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit eingesetzt werden.

### Strahlenschutz

aus Hartmetall aus einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>). Die Abschirmschicht schützt elektronische Komponenten in Umgebungen mit hoher Strahlung (10<sup>5</sup> Rad/h,  $\gamma$ -Strahlendosisleistung, Energie 1 MeV  $\pm$  0,1 MeV), verringert Strahlenschäden um 20 % (Dosisdämpfungsrate  $>$  95 %, Prüfnorm ASTM E595), verbessert die Zuverlässigkeit von Raumfahrzeugen im Weltraum (Betriebsdauer  $>$  10 Jahre) und ist durch eine mehrschichtige Abschirmstruktur (Dicke 10–20 mm, Schichtabstand 2 mm  $\pm$  0,2 mm) und Dotierung mit strahlungshemmenden Elementen (wie Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1 %  $\pm$  0,2 %, Querschnitt  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ) und Oberflächenbeschichtung (Ni-Cr, Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Antioxidationstemperatur 500°C  $\pm$  50°C) verringert Sekundärstrahlung (Sekundärteilchenfluss  $<$   $10^3$  /cm<sup>2</sup> · s) und Elektronenmigration (Mobilität  $<$   $10^{-12}$  cm<sup>2</sup> /V·s). Es wird häufig beim Strahlenschutz der Internationalen Raumstation (Abschirmdicke 15 mm), des chinesischen Navigationssatelliten Beidou (Haltbarkeit 8000 Stunden) und von NASAs New Horizons (Strahlendosis 10<sup>6</sup> rad) verwendet, und in Zukunft kann die Abschirmeffizienz durch Boridverbundstoffe verbessert werden.

### Korrosionsschutzbeschichtung aus Wolframkarbid

mit einer Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1-3  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,2-15,6 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) wird für die Außenhaut von Raumfahrzeugen verwendet. Sie ist säure- und alkalibeständig (10 % HCl-Beständigkeit, Gewichtsverlust  $<$  0,1 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 1000 Stunden; 5 % NaOH-Beständigkeit, Gewichtsverlust  $<$  0,08 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,01 mg/cm<sup>2</sup>), Lebensdauer 8000 Stunden, selbstheilende Beschichtungstechnologie (Hinzufügen von Mikrokapseln, Reparaturrate  $>$  80 %, Partikelgröße 10-20  $\mu\text{m}$ ), Nanokompositbeschichtung (SiC-Ni-Komposit, Partikelgröße  $<$  50 nm, Dicke 5–10  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,5  $\mu\text{m}$ ) und Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit 300 m/s  $\pm$  20 m/s, Temperatur 1500 °C  $\pm$  50 °C) zur Verbesserung der Haltbarkeit, Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit (Reibungskoeffizient 0,15  $\pm$  0,03, Prüfnorm ASTM G133). Es kann auf die Schutzschicht der Ariane-5-Raketenhülle der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) (Haltbarkeit 8500 Stunden) und der Falcon-Heavy-Rakete von

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SpaceX (Korrosionsschutzwirkung 95 %) aufgetragen werden. Zukünftig kann die Rissbeständigkeit durch eine mehrschichtige Gradientenbeschichtung optimiert werden.

### Die kugelsichere Platte aus Wolframkarbid

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, TiC- Gehalt 5–8 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,3–15,7  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) hat eine Durchschlagsfestigkeit von 800  $\text{J}/\text{cm}^2$  (Teststandard NIJ 0108.01, Geschossgeschwindigkeit 400  $\text{m}/\text{s}$   $\pm$  20  $\text{m}/\text{s}$ ), eine Gewichtsreduzierung von 10 % (Dichte 16  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , reduziert auf 14,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), kann an der Außenwand von Raumfahrzeugen angebracht werden und ist durch eine mehrschichtige Sandwichkonstruktion (WC- TiC und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abwechselnd, Dicke 1–2  $\text{mm}/\text{Schicht}$ , 5–10 Schichten) und keramische Verstärkung (SiC-Gehalt 15 %  $\pm$  2 %, Härte HV 1800  $\pm$  50) verbessern die Schlagzähigkeit (Schlagzähigkeit  $>$  25  $\text{J}/\text{cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E23) und Splitterfestigkeit (Splitterdurchdringungsfestigkeit  $>$  600  $\text{J}/\text{mm}^2$ , Prüfnorm MIL-STD-662F). Wird häufig in der Schutzstruktur des US-Raumflugzeugs X-37B (Dicke 10  $\text{mm}$   $\pm$  1  $\text{mm}$ ) und im Schottschutz der russischen Sojus (Haltbarkeit 6000 Stunden) verwendet. Zukünftig kann es durch Kohlefaser-Zwischenschichten leichter gemacht werden.

### Kühlkörper

aus Hartmetall Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) Kühlkörper im Wärmemanagement verbessert die Wärmeableitungseffizienz um 20 % (Wärmestromdichte 1,5  $\text{MW}/\text{m}^2$   $\pm$  0,2  $\text{MW}/\text{m}^2$ , fällt auf 1,2  $\text{MW}/\text{m}^2$  ab), Temperaturbeständigkeit 1500  $^\circ\text{C}$  (Spitze 1600  $^\circ\text{C}$   $\pm$  20  $^\circ\text{C}$ ) und durch Mikrokanalstruktur (Kanalbreite 0,2–0,5  $\text{mm}$ , Abstand 1  $\text{mm}$   $\pm$  0,1  $\text{mm}$ , Anzahl  $>$  100/ $\text{cm}^2$ ), Beschichtung mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Cu, Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  Leitfähigkeit 400  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$   $\pm$  20  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) und Oberflächenrauheit ( $R_a$  2,0  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,3  $\mu\text{m}$ , Tiefe 0,1  $\text{mm}$   $\pm$  0,02  $\text{mm}$ ) zur Optimierung der Wärmeleitung (Wärmeleitfähigkeit 120  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$   $\pm$  5  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) und Wärmeableitungseffizienz (Temperaturgradient  $<$  10  $^\circ\text{C}/\text{cm}$ ). Es kann breit im Wärmemanagementsystem der japanischen H-IIA-Rakete (Wärmeableitungsfläche 0,5  $\text{m}^2$   $\pm$  0,05  $\text{m}^2$ ) und im elektronischen Kühlsystem der NASA-Raumsonde Orion (Haltbarkeit 7000 Stunden) eingesetzt werden. Zukünftig kann die Wärmeleitfähigkeit durch eine Graphenbeschichtung verbessert werden .

### Antivibrationshalterung aus Wolframkarbid,

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 8–12 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$  ) . Die Halterung hat eine Vibrationsfrequenz von 600 Hz (Spitze 650 Hz  $\pm$  20 Hz) und eine Lebensdauer von 7000 Stunden. Die Schwingungsübertragung wird durch eine Dämpfungsbeschichtung (Gummi-Metall-Verbund, Dicke 2  $\text{mm}$   $\pm$  0,2  $\text{mm}$ , Dämpfungskoeffizient 0,25  $\pm$  0,05), eine Mehrpunktlagerung (Abstand der Auflagepunkte 10  $\text{mm}$   $\pm$  1  $\text{mm}$ , Anzahl  $>$  5/Halterung) und eine Korrosionsschutzbehandlung (Ni-Cr-Beschichtung, 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , beständig gegen 5% NaCl, Gewichtsverlust  $<$  0,05  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) reduziert (Amplitudendämpfung  $>$  95 %, Prüfnorm ISO 10816). Dies ist beispielsweise bei der Stabilisierungshalterung der russischen Proton-Rakete (Belastung 100  $\text{kN}$   $\pm$  10  $\text{kN}$  ) und der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Startplattform der europäischen Ariane 5 (Haltbarkeit 7500 Stunden) möglich. Zukünftig können Formgedächtnislegierungen zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit eingesetzt werden.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



Hartmetall-Kugelschutzplatte

## Instrumente und Steuerungssystemkomponenten für die Luft- und Raumfahrt

### Das Hartmetallsensorgehäuse besteht aus

einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ). Das Gehäuse weist in einer Umgebung mit hoher Strahlung ( $10^5 \text{ Rad}/\text{h}$ ,  $\gamma$ -Strahlendosisleistung, Energie 1 MeV  $\pm 0,1 \text{ MeV}$ ) eine um 20 % verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf (beständig gegen 5 %  $\text{HNO}_3$ , Gewichtsverlust  $< 0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ , Belichtungsdauer 1000 Stunden), mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$  (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm), ist für die langfristige Datenerfassung geeignet (Betriebsdauer  $> 10$  Jahre, Abtastfrequenz 1 Hz  $\pm 0,1 \text{ Hz}$ ) und durch ein Design gegen elektromagnetische Störungen (Abschirmwirkungsgrad  $> 90 \text{ dB}$ , Frequenzbereich 10 kHz–1 GHz), Oberflächenisolationsbeschichtung ( $\text{SiO}_2$ ), Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Durchschlagfestigkeit  $> 10 \text{ kV}/\text{mm}$ ) und Mehrschichtstruktur Dicke 2–3 mm/Schicht) zur Verbesserung der Signalstabilität und Strahlungsresistenz (Dosisdämpfungsrate  $> 98 \%$ , Prüfnorm ASTM E595). Es kann zum Sensorschutz des James-Webb-Weltraumteleskops der NASA (Auflösung 0,01 Bogensekunden) und der Sternsensoren der Gaia-Mission der Europäischen Weltraumorganisation (Haltbarkeit 10 Jahre) verwendet werden, und die Abschirmung kann in Zukunft durch Graphen verbessert werden.

### Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1-3  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2-15,6  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) Ventile widerstehen 500 bar Hochdruck (Spitze 550 bar  $\pm 20$  bar) im Kraftstoffsystem, Gewichtsverlust wird auf  $< 0,1 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{mg}/\text{cm}^2$  kontrolliert (Salzsprühnebeltest JIS Z 2371, Einwirkungszeit 96 Stunden), Schalterlebensdauer bis zu 5000-mal (Spitze 6000-mal  $\pm 500$ -mal) und durch mehrstufige Abdichtung (O-Ring + Metaldichtung, Leckrate  $< 0,005 \text{ml}/\text{min}$ , Prüfnorm ISO 5208), federunterstütztes Design (Federsteifigkeit 100  $\text{N}/\text{mm} \pm 10 \text{N}/\text{mm}$ , Hub 5  $\text{mm} \pm 0,5 \text{mm}$ ) und korrosionsbeständige Beschichtung (TiN, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm 100$ ) optimiert die Leckagekontrolle und langfristige Zuverlässigkeit (Ermüdungslebensdauer  $> 10^6$  Zyklen, Spannungsamplitude 300  $\text{MPa} \pm 30 \text{MPa}$ ). Geeignet für die Antriebssteuerung des SpaceX Dragon-Raumfahrzeugs (Durchfluss 100  $\text{l}/\text{min} \pm 10 \text{l}/\text{min}$ ), Treibstoffregulierung der russischen Sojus (Druck 500 bar  $\pm 20$  bar), und die Haltbarkeit kann zukünftig durch selbstschmierende Beschichtung optimiert werden.

### Halterung für Gyroskop

aus Wolframkarbid-Kobaltlegierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ). Die Halterung gewährleistet eine Genauigkeit von  $\pm 0,01 \text{mm}$  bei Navigationssatelliten (Kalibrierung mit Laser-Entfernungsmesser, Auflösung 0,001 mm), bessere Vibrationsfestigkeit als bei Titanlegierungen (Amplitudendämpfungsrate  $> 90$  %, Testfrequenz 100  $\text{Hz} \pm 10 \text{Hz}$ ), Temperaturbereich  $-150 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ , thermische Zyklenlebensdauer  $> 5000$  mal) und durch Dämpfungsdesign (Dämpfungskoeffizient  $0,2 \pm 0,05$ , Material Gummi-Metall-Verbundwerkstoff), Feineinstellungsmechanismus (Einstellgenauigkeit 0,001 mm, Hub 1  $\text{mm} \pm 0,1 \text{mm}$ ) und Antioxidationsbeschichtung ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Antioxidationstemperatur  $1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) zur Reduzierung von Vibrationsbelastungen und Umweltkorrosion (beständig gegen 5 % NaCl, Gewichtsverlust  $< 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$ ). Wird häufig im Lageregelungssystem des chinesischen Beidou -Satelliten (Genauigkeit  $0,01^\circ/\text{h}$ ) und in den Navigationskomponenten von GPS-Satelliten (Haltbarkeit 7000 Stunden) verwendet. Die Korrosionsbeständigkeit kann zukünftig durch Nanobeschichtungen verbessert werden.

### Hartmetall-Drucksensormembran

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ), Membrandruckfestigkeit 1000 bar (Spitze 1100 bar  $\pm 50$  bar), Empfindlichkeit um 15 % erhöht (Reaktionszeit  $< 0,1 \text{ms}$ , Anstiegszeit  $0,05 \text{ms} \pm 0,01 \text{ms}$ ), Lebensdauer bis zu 10 Jahren ( $> 8,7 \times 10^4$  Stunden, Ermüdungslebensdauer  $> 10^7$  Zyklen), geeignet für die Erforschung des Weltraums und durch Dünnschicht-Mikrobearbeitungstechnologie (Dicke 0,1–0,2 mm, Genauigkeit  $\pm 0,005 \text{mm}$ , Oberflächenrauheit  $R_a < \mu\text{m}$ ), Dehnungsmessstreifen-Integration (Empfindlichkeit  $2 \text{mV}/\text{V} \pm 0,2 \text{mV}/\text{V}$ , Bereich 0–1000 bar) und Oberflächenpolitur (Poliergenauigkeit  $0,01 \mu\text{m} \pm 0,002 \mu\text{m}$ ) verbessern Reaktionsgeschwindigkeit, Messgenauigkeit (Nichtlinearität  $< 0,1$  % FS, Prüfnorm ISO 20186) und Ermüdungsbeständigkeit (Spannungsamplitude 300  $\text{MPa} \pm 30 \text{MPa}$ ). Es wird häufig zur Drucküberwachung der Rosetta-Sonde der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) (Genauigkeit  $0,1 \text{bar} \pm 0,01 \text{bar}$ ) und des Weltraumsensors New Horizons der NASA (Haltbarkeit 10 Jahre) eingesetzt. Zukünftig kann die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur durch MEMS-Technologie optimiert werden.

aus einer Nickel-Karbid-Legierung (

WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) sind oxidations- und verschleißfest (oxidationsbeständig bei 500 °C, Gewichtsverlust < 0,02  $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,005 \text{mg}/\text{cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden), haben einen Kontaktwiderstand < 0,01  $\Omega$  (Prüfnorm IEC 60512, Stromstärke 1 A  $\pm 0,1$  A), gewährleisten die Stabilität des elektrischen Systems der Raumstation und weisen eine verbesserte Leitfähigkeit und Vibrationsfestigkeit (beständig gegen Stöße von 50 g, Dauer 0,1 s  $\pm 0,01$  s) sowie Haltbarkeit (Lebensdauer > 10<sup>4</sup> Ein- und Ausstecken, Haltbarkeitstest 5000-mal) auf. Geeignet für die Stromschnittstelle der Internationalen Raumstation (Stromstärke 50 A  $\pm 5$  A) und den elektrischen Anschluss der russischen Sojus (Haltbarkeit 6000 Stunden). Zukünftig kann die Leitfähigkeit durch Nano-Silberbeschichtung verbessert werden.

### Hartmetall-Temperatursensorgehäuse

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm 1$  %, TiC- Gehalt 3–5 %  $\pm 0,5$  %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ), Gehäusewiderstand 1200 °C (Spitze 1250 °C  $\pm 20$  °C), thermische Reaktionszeit < 1 Sekunde (< 0,8 s  $\pm 0,1$  s, Prüfnorm IEC 60584), Genauigkeit  $\pm 0,1$  °C (kalibriert mit Pt100, Bereich –50 °C bis 1200 °C) und integriert durch Thermoelement (Typ K, Empfindlichkeit 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C} \pm 2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , Reaktionszeit 0,5 s), Thermistoroptimierung (Widerstandstemperaturkoeffizient 3850 ppm/ $^\circ\text{C} \pm 50$  ppm/ $^\circ\text{C}$ , Genauigkeit 0,05 $^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$ ) und Oberflächenisoliationsbeschichtung (ZrO<sub>2</sub>, Dicke 15  $\mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ , Wärmewiderstand > 0,1  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) zur Verbesserung der Messgenauigkeit und Hochtemperaturstabilität (thermische Zykluslebensdauer > 5000-mal, beständig bis 1500 $^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ). Es wird häufig zur Temperaturüberwachung des russischen Raumfahrzeugs Sojus (Genauigkeit 0,1 $^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$ ) und des Wärmekontrollsystems von NASA Orion (Haltbarkeit 6000 Stunden) eingesetzt. Zukünftig kann die Reaktionsgeschwindigkeit durch Thermosäulen optimiert werden.

### Die Hartmetall-Beschleunigungsmesserschale besteht aus

einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ). Das Gehäuse ist stoßfest bis 500 g (Spitze 550 g  $\pm 20$  g, Dauer 0,1 s  $\pm 0,01$  s), Genauigkeit  $\pm 0,05 \text{m}/\text{s}^2$  (kalibriert durch Vibrationstisch, Frequenz 50 – 500 Hz), Lebensdauer 8000 Stunden und durch mehrachsiges Sensordesign (Empfindlichkeitskonsistenz der X-/Y-/Z-Achse < 1 %, Bereich  $\pm 50$  g), Antivibrationspufferschicht (Gummi-Metall-Verbund, Dicke 2 mm  $\pm 0,2$  mm, Dämpfungskoeffizient 0,3  $\pm 0,05$ ) zur Verbesserung der Messgenauigkeit (Nichtlinearität < 0,2 % FS, Prüfnorm ISO 16063) und Vibrationsfestigkeit (resistent gegen 600 Hz Vibration, Amplitudendämpfung > 90 %). Es eignet sich für die Beschleunigungsmessung von US-GPS-Satelliten (Genauigkeit 0,05  $\text{m}/\text{s}^2 \pm 0,01 \text{m}/\text{s}^2$ ) und die Lageregelung des europäischen Galileo-Satelliten (Lebensdauer 8500 Stunden). Zukünftig kann die Empfindlichkeit durch MEMS-Integration verbessert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Die Hartmetall-Durchflussmesserblätter bestehen aus

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 % ± 1 % , TiC- Gehalt 2–5 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5 µm ± 0,1 µm , Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup> ) . Die Schaufeln sind korrosionsbeständig (beständig gegen 5 % NaCl, Gewichtsverlust <0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> , Einwirkzeit 500 Stunden), Messfehler <1 % (überprüft durch kalibrierten Durchflussmesser, Durchflussbereich 0 – 100 l/min), Lebensdauer 6000 Stunden und das stromlinienförmige Design (Krümmungsfehler <0,01 mm, Oberflächenrauheit Ra <0,2 µm ± 0,05 µm ) , die verschleißfeste Beschichtung ( TiN , Dicke 5 µm ± 1 µm , Härte HV 2000 ± 100) optimiert die Strömungsdynamik (Druckverlust <1 % , Prüfnorm ISO 5167) und die Langzeithaltbarkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 200 MPa ± 20 MPa). Häufige Anwendung findet es im Antriebssystem des europäischen Galileo-Satelliten (Durchflussrate 50 l/min ± 5 l/min) und in der Treibstoffdosierung des Mars Rovers der NASA (Haltbarkeit 6500 Stunden). Zukünftig kann Ultraschallpolieren zur Verbesserung der Oberflächenqualität eingesetzt werden.

### Das Gehäuse des Hartmetall-Wegsensors besteht

aus einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 1–2 µm ± 0,1 µm , Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup> ) . Die Gehäusegenauigkeit beträgt ±0,01 mm (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm), die Lebensdauer beträgt 7000 Stunden und die Umwelthanpassungsfähigkeit wird durch eine antimagnetische Beschichtung (µ-Metall, Dicke 10 ± 1 µm, magnetische Permeabilität > 10<sup>4</sup>) und ein miniaturisiertes Design (Außendurchmesser < 10 mm, Gewicht < 50 g ± 5 g) (beständig von -150 °C bis 150 °C, Wärmeausdehnungskoeffizient 5 × 10<sup>-6</sup>/°C ± 0,5 × 10<sup>-6</sup>/°C, thermische Zyklenlebensdauer > 5000-mal) verbessert. Es eignet sich zur Verschiebungsüberwachung der japanischen Mondsonde Kaguya (Genauigkeit 0,01 mm ± 0,001 mm) und der Merkurmission BepiColombo der Europäischen Weltraumorganisation (Haltbarkeit 7500 Stunden). Zukünftig kann die Korrosionsbeständigkeit durch eine Nanobeschichtung verbessert werden.



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Hilfskonstruktionen und Verbindungselemente

### Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6%-10%±1%, WC-Partikelgröße 0,5-1,5  $\mu\text{m}$ ±0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0-15,4  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ) Bolzen bieten 1200 MPa±50 MPa Scherfestigkeit (Teststandard ASTM F606), bessere Korrosionsbeständigkeit als Edelstahl 304 (beständig gegen 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , Gewichtsverlust <0,05  $\text{mg/cm}^2$  ± 0,01  $\text{mg/cm}^2$ , Belichtungszeit 500 Stunden), Lebensdauer von 8000 Flugstunden und selbstsicherndes Design (Nyloneinsatz, Verriegelungskraft 100 N±10 N), Oberflächenbeschichtung (Zn-Ni, Dicke 5  $\mu\text{m}$ ±1  $\mu\text{m}$ , Korrosionsbeständigkeitstemperatur 500 °C ± 50 °C) und Vorspannungsoptimierung (Vorspannung 1000 N ± 100 N, Gleichmäßigkeit < 5 %), um ein Lösen zu verhindern und die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern (beständig gegen 5 % NaCl, Gewichtsverlust < 0,03  $\text{mg/cm}^2$  ± 0,005  $\text{mg/cm}^2$ ). Wird häufig bei Rumpfverbindungen der Boeing 787 (Schraubendurchmesser 10 mm ± 1 mm) und der Flügelträgerbefestigung des Airbus A350 (Last 50 kN ± 5 kN ) eingesetzt . Zukünftig kann Laserschweißen zur Verbesserung der Verbindungsfestigkeit eingesetzt werden.

### Hartmetallscharniere aus

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1-3  $\mu\text{m}$ ±0,2  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,2-15,6  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$  ) . Das Scharnier hat eine Verschleißlebensdauer von 5000 Öffnungs- und Schließvorgängen (Spitze 6000-mal ± 500-mal, Prüfnorm ASTM D4170), reduziert die Wartungskosten um 10 % (durch Verlängerung des Wartungsintervalls auf 6000 Stunden) und verlängert die Lebensdauer und Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>5</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa±30 MPa) durch eine Schmierbeschichtung (MoS<sub>2</sub>, Dicke 2  $\mu\text{m}$ ±0,2  $\mu\text{m}$ , Reibungskoeffizient 0,05±0,01), eine federunterstützte Konstruktion (Steifigkeit 50 N/mm± 5 N/mm, Hub 5 mm±0,5 mm) und eine verschleißfeste Oberflächenbehandlung (Härtungsschichttiefe 0,1 mm±0,02 mm, Härte HV 1800±50). Geeignet für das Türsystem des Airbus A350 (Öffnungs- und Schließwinkel 90°±5°) und das Türscharnier des SpaceX Dragon-Raumfahrzeugs (Belastung 100 N±10 N). Zukünftig kann die Haltbarkeit durch eine selbstschmierende Beschichtung optimiert werden.

### Hartmetall-Trägerbalken

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC , TiC- Gehalt 5–10 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m}$  ± 0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ), Balkenbiegefestigkeit 3000 MPa±100 MPa (Prüfnorm ASTM E290), 2 % Strukturgewichtsreduzierung (Dichte 15,5  $\text{g/cm}^3$  ± 0,5  $\text{g/cm}^3$ , reduziert auf 15,19  $\text{g/cm}^3$ ), Ermüdungsbeständigkeit 10<sup>6</sup> Zyklen (Spannungsamplitude 500 MPa±50 MPa, Prüfnorm ASTM E466) und Vorspannung (Vorspannung 100 MPa±10 MPa, Tiefe 0,2 mm±0,02 mm), Wabenstruktur (Porengröße 5–15 mm, Wandstärke 1 mm ± 0,1 mm) und Korrosionsschutzbeschichtung (Ni-Cr, Dicke 10  $\mu\text{m}$  ± 1  $\mu\text{m}$ ), Antioxidationstemperatur 500 °C ± 50 °C) verbessert die Stabilität, Vibrationsfestigkeit (Amplitudendämpfung > 90 %, Prüfnorm ISO 10816) und Langzeithaltbarkeit (5 % NaCl-Beständigkeit, Gewichtsverlust < 0,05  $\text{mg/cm}^2$ ). Wird häufig in der Rahmenstruktur von SpaceX-Raum Schiffen (Tragfähigkeit 200 kN ± 20 kN ) und den Stützbalken des chinesischen Langer Marsch 5 (Haltbarkeit 6500 Stunden) verwendet. In Zukunft

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kann es zur Verbesserung des Gewichts mit Kohlefaser verstärkt werden.

### Hartmetall-Klemmringe

aus einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 1–2 μm ± 0,1 μm, Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) werden in Raketentriebwerken eingesetzt. Sie halten einem Druck von 400 bar (Spitze 450 bar ± 20 bar) stand und haben eine Lebensdauer von 6000 h. Klemmkraft, Dichtheit (Leckagerate <0,01 ml/min, Prüfnorm ISO 5208) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <0,01 mm<sup>3</sup>/N·m, Prüfnorm ASTM G99) werden durch elastisches Design (Elastizitätsmodul 400 GPa±20 GPa, Deformation <0,01 mm), Mehrpunktklemmung (Klemmkraft 500 N±50 N, Kontaktpunkte >4) und Oberflächenhärtung (Härte HV 1600±50, Tiefe 0,1 mm ± 0,02 mm) optimiert. Geeignet für die Antriebskomponenten der chinesischen Langer Marsch 5 (Druck 400 bar ± 20 bar) und die Treibstoffanschlüsse der europäischen Ariane 6 (Haltbarkeit 6500 Stunden). Die Korrosionsbeständigkeit kann zukünftig durch Nanobeschichtung verbessert werden.



Hartmetallbefestigungen

### Verbindungsstifte aus Wolframkarbid

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt 6%-10%±1%, TiC -Gehalt 3%-5%±0,5%, WC-Korngröße 0,5-1,5 μm±0,1 μm, Dichte 15,0-15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) sind im Raumfahrzeugrahmen verankert, mit einer Zugfestigkeit von 1500 MPa±50 MPa (Teststandard ASTM E8), einer Temperaturbeständigkeit von 1000°C (Spitze 1100°C±20°C), und sind oberflächengehärtet (gehärtete Schicht 0,2 mm±0,02 mm, Härte HV 1800±50), geschützt durch Beschichtung (TiN, Dicke 5 μm±1 μm, Haftung>40 MPa) und mikrostruktureller Optimierung (Korn Verfeinerung auf 0,5 μm ± 0,05 μm), Röntgenbeugungsanalyse (XRD) verbessert die Verschleißfestigkeit, Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>7</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 400 MPa ± 40 MPa) und Bruchfestigkeit (Bruchzähigkeit KIC > 18 MPa·m<sup>1/2</sup>, Prüfnorm ASTM E399). Es wird häufig im Verbindungssystem des NASA-Raumfahrzeugs Orion (Belastung 50 kN ± 5 kN) und in den Rahmenbolzen der russischen Sojus (Haltbarkeit 7000 Stunden) verwendet. Zukünftig kann die Oberflächenqualität durch Laserbehandlung verbessert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **einer Wolframkarbid**

-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) werden in Satellitenantennen verwendet und weisen eine Schwingfrequenz von 500 Hz (Spitze 550 Hz  $\pm$  20 Hz) und eine Lebensdauer von 7000 Stunden auf. Die Lager reduzieren zudem die Schwingungsübertragung (Amplitudendämpfung >95 %, Prüfnorm ISO 10816) und Umwelteinflüsse (beständig von -150°C bis 150°C) durch eine dämpfende Beschichtung (Gummi-Metall, Dicke 2  $\text{mm} \pm 0,2 \text{mm}$ , Dämpfungskoeffizient 0,25 $\pm$ 0,05), Mehrpunktlagerung (Auflagepunkt Abstand 10  $\text{mm} \pm 1 \text{mm}$ , Anzahl >5/Halterung) und Korrosionsschutzbehandlung (Zn-Ni-Beschichtung, 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , beständig gegen 5% NaCl, Gewichtsverlust <0,05  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ). Sie eignen sich für das Orientierungssystem der europäischen Galileo-Satelliten (Genauigkeit 0,01° $\pm$ 0,001°) und die stabile Halterung der US-GPS-Satelliten (Haltbarkeit 7500 Stunden). Zukünftig können Formgedächtnislegierungen zur Verbesserung der Anpassungsfähigkeit eingesetzt werden.

### **Sicherungsmutter aus Wolframkarbid**

und Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, TiC- Gehalt 2–5 %  $\pm$  0,5 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ). Die Mutter ist widerstandsfähig gegen Lösen, hat eine Druckfestigkeit von 300 bar (Spitze 350 bar  $\pm$  20 bar), eine Lebensdauer von 5000-mal (Spitze 6000-mal  $\pm$  500-mal) und eine selbstsichernde Struktur (eingebetteter Nylonring, Sicherungskraft 100 N  $\pm$  10 N) und eine Oberflächenverstärkung (Härte HV 1700 $\pm$  50, Tiefe 0,1  $\text{mm} \pm 0,02 \text{mm}$ ) zur Verbesserung der Vibrationsfestigkeit (beständig gegen Stöße mit 50 g, Dauer 0,1  $\text{mm}$ ).  $s \pm 0,01 \text{ s}$ ) und Langzeitzuverlässigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa $\pm$ 30 MPa). Wird häufig in festen Komponenten des russischen Raumfahrzeugs Sojus (Last 50 kN $\pm$ 5 kN) und Strukturverbindungen des NASA-Raumfahrzeugs Orion (Haltbarkeit 5500 Stunden) verwendet. Die Korrosionsbeständigkeit kann in Zukunft durch Nanobeschichtung verbessert werden.

Die Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) der **Hartmetall-Verbindungsplatte hat eine Scherfestigkeit von 1200 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E229) und eine Lebensdauer von 6000 Stunden**. Durch den Mehrschichtverbund (WC-Ni- und Ti-Legierung, Dicke 1–2  $\text{mm}/\text{Schicht}$ , Anzahl der Schichten 5–10) und die Korrosionsschutzbeschichtung (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Oxidationstemperatur 500 $\pm$ 50°C) werden die strukturelle Stabilität (Verformung <0,01  $\text{mm}$ , Prüfstandard FEM-Analyse) und Haltbarkeit (Beständigkeit gegenüber 5 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Gewichtsverlust <0,05  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden) optimiert. Das Material eignet sich für die Verbindungsstruktur der japanischen H-IIA-Rakete (Belastung 100 kN $\pm$ 10 kN) und die Rumpfverkleidung der europäischen Ariane 5 (Haltbarkeit 6500 Stunden). Zukünftig kann es zur Gewichtsreduzierung mit Kohlefaser verstärkt werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Hartmetall-Befestigungsmatrizen

## Spezialfunktionsteile aus Hartmetall für die Luft- und Raumfahrt

### Hartmetall-Reibplatte

aus Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) Reibplatte in der Landevorrichtung, Reibungskoeffizient  $0,3 \pm 0,05$  (Prüfnorm ASTM G99, Belastung  $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ , Geschwindigkeit  $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$ ), Lebensdauer 3000 Landungen (Spitze 3500-mal  $\pm 200$ -mal, Prüfnorm ASTM D4170) und durch poröses Design (Porosität 5–10 %, Porengröße 20–50  $\mu\text{m}$ ), Oberflächenstruktur (Rauheit  $Ra 1,5 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Tiefe  $0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ ) und hitzebeständige Beschichtung (  $\text{ZrO}_2$  ( Dicke  $15 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ ), Oxidationsbeständigkeit  $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) optimiert die Wärmeableitung (Temperaturanstieg  $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , Wärmestrom  $1 \text{ MW/m}^2 \pm 0,1 \text{ MW/m}^2$ ), die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate  $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und die Hochtemperaturbeständigkeit (Beständigkeit  $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , thermische Zyklen  $> 3000$ -mal). Es wird häufig im Landekissensystem des SpaceX Starship (Belastung  $100 \text{ kN} \pm 10 \text{ kN}$  ) und im Stoßdämpfer des NASA Orion (Haltbarkeit 3200-mal) verwendet. Die Hitzebeständigkeit kann zukünftig durch Keramikfaserverstärkung verbessert werden.

### einer Wolframkarbid

-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $1-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) in Stromverteilungssystemen sind lichtbogenerosionsbeständig (Lichtbogenenergie  $< 10 \text{ J/cm}^2$ , Dauer  $0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$  ), mit einer Lebensdauer von 5000 h (Spitze  $6000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , Prüfnorm IEC 60947) und verfügen über eine verbesserte Leitfähigkeit (Widerstand  $< 0,005 \Omega$ , Prüfnorm IEC 60947) durch einen Mehrschichtverbund (WC-Ni und Cu, Dicke 1–2 mm/Schicht, Leitfähigkeit  $> 10^6 \text{ S/m}$ ), versilberte Oberfläche (Dicke  $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ , Härte HV

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

100±20) und Federbelastung (Kontaktkraft 5 N±0,5 N, Hub 1 mm±0,1 mm) 60512), Lichtbogenfestigkeit (Lichtbogenfestigkeit >100-mal, Prüfnorm ASTM F1871) und Haltbarkeit (>10<sup>4</sup>-maliges Ein- und Ausstecken, Haltbarkeitstest 5000-mal). Geeignet für die Stromverteilung der Internationalen Raumstation (Stromstärke 50 A±5 A) und den elektrischen Kontakt der russischen Sojus (Haltbarkeit 5500 Stunden). Zukünftig kann die Leitfähigkeit durch Kohlenstoffnanoröhren verbessert werden.

### Wolframkarbid

-Titanplatte (WC- TiC , TiC- Gehalt 5–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) im Wärmemanagementsystem, Wärmeleitfähigkeit 100 W/m·K ± 5 W/m·K (Prüfnorm ASTM E1461), hohe Korrosionsbeständigkeit (beständig gegen 10 % HCl, Gewichtsverlust <0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden; beständig gegen 5 % NaOH, Gewichtsverlust <0,04 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>) und durchgehende Mikrokanalstruktur (Kanalbreite 0,2–0,5 mm, Abstand 1 mm ± 0,1 mm, Anzahl >100/cm<sup>2</sup>) , eine Beschichtung mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Cu, Dicke 10 µm±1 µm, Wärmeleitfähigkeit 400 W/m·K±20 W/ m·K) und ein aufgerautes Oberflächendesign (Ra 2,0 µm±0,3 µm, Tiefe 0,1 mm±0,02 mm) verbessern die Wärmeübertragungseffizienz (Wärmeaustauschkoeffizient 500 W/m<sup>2</sup>·K ± 50 W/ m<sup>2</sup>·K, Prüfnorm ASTM E1225), die Korrosionsbeständigkeit und die Wärmestabilität (beständig gegen 1000 Wärmezyklen, Temperaturbereich -50 °C bis 1000 °C). Wird häufig im Wärmekontrollsystem des NASA-Raumfahrzeugs Orion (Wärmeableitungsfläche 0,5 m<sup>2</sup> ± 0,05 m<sup>2</sup>) und im Wärmemanagementsystem der europäischen Ariane 5 (Haltbarkeit 6000 Stunden) verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit kann in Zukunft durch eine Graphenbeschichtung verbessert werden.

### Wolframkarbid-

Kobalt-Titan (WC-Co -TiC , Co-Gehalt 6 % - 10 % ± 1 %, TiC- Gehalt 3 % - 5 % ± 0,5 %, WC-Partikelgröße 0,5 - 1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,1 - 15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Die Isolierschicht ist beständig bis 2000 °C (Spitze 2100 °C ± 20 °C), die Wärmebeständigkeit ist um 30 % erhöht (Wärmeflussdämpfung > 95 %, von 1 MW/m<sup>2</sup> auf 0,7 MW/m<sup>2</sup>), die Lebensdauer beträgt 6000 Stunden (Spitze 6500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E595) und durch die poröse Struktur (Porosität 10 % - 15 %, Porengröße 20 - 50 µm, Porenverteilung Gleichmäßigkeit > 90 %), Wärmedämmschicht (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub>, Dicke 20 ± 2 µm, Wärmereflexion > 85 %, Abriebfestigkeit > 500 Thermozyklen) und Gradientendesign (Dickengradient 0,5 mm/Schicht, Anpassung der Wärmeausdehnung < 1 %) optimieren die Thermoschockbeständigkeit (150 Thermozyklen, -200 °C bis 2000 °C) und die Langzeitbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 400 MPa ± 40 MPa). Es eignet sich für den Schutz der Rücklaufkapsel der chinesischen Chang'e 5 (Wärmestromdichte 1,5 MW/m<sup>2</sup>) und des Hitzeschildes der NASA Orion (Haltbarkeit 6500 Stunden). Zukünftig kann die Wärmebeständigkeit durch Aerogel-Compoundierung verbessert werden.

### Antistatische Wolframkarbid-Beschichtung

aus einer Nickellegierung aus Wolframkarbid (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 1–2 µm ± 0,1 µm, Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>), Oberflächenwiderstand der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtung  $<10^6 \Omega$  (Prüfnorm IEC 61340-2-3, Feuchtigkeit  $50\% \pm 5\%$ ), Lebensdauer 8000 Stunden (Spitze 8500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Haltbarkeitstest 5000 Stunden) und verbesserte antistatische Leistung (statische Abfallzeit  $<0,1$  s, Prüfnorm IEC 61340-2-3, Feuchtigkeit  $50\% \pm 5\%$ ) durch leitfähigen Polymerverbundstoff (PEDOT:PSS,  $5\% \pm 1\%$ , Leitfähigkeit  $>10^3$  S/m), Nanobeschichtung (SiC, Partikelgröße  $<5-10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ , Härte HV 1800  $\pm 50$ ) 61340-4-1) und Oberflächenschutz (Verschleißfestigkeit um  $20\%$  erhöht, Verschleißrate  $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ). Weit verbreitet in der Ariane-5-Raketenhülle der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) (Fläche  $10 \text{ m}^2 \pm 1 \text{ m}^2$ ) und der antistatischen Schicht der SpaceX Falcon Heavy (Haltbarkeit 8500 Stunden). Zukünftig kann die Leitfähigkeit durch die Einarbeitung von Kohlenstoffnanoröhren verbessert werden.

### **Elektromagnetische Abschirmplatte aus Hartmetall,**

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $8-12\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $1-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ), Abschirmeffizienz  $90\%$  (Frequenzbereich  $10 \text{ kHz}-1 \text{ GHz}$ , Prüfnorm MIL-STD-285), Lebensdauer 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Haltbarkeitstest 6000 Stunden), durch Mehrschichtstruktur (Dicke  $10-20 \text{ mm}$ , Schichtabstand  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , Anzahl der Schichten  $5-10$  Schichten) und leitfähige Beschichtung (Cu-Ni, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Leitfähigkeit  $>10^6$  S/m) zur Optimierung der Fähigkeit zur elektromagnetischen Störung Dämpfung  $>30 \text{ dB}$ , elektrische Felddämpfung  $>40 \text{ dB}$ ). Geeignet für den elektronischen Schutz des US-Raumflugzeugs X-37B (Abschirmfläche  $5 \text{ m}^2 \pm 0,5 \text{ m}^2$ ) und die Kommunikationsabschirmung der russischen Sojus (Haltbarkeit 7500 Stunden). Zukünftig kann die Abschirmwirkung durch porösen Metallschaum verbessert werden.

### **Wolframkarbid-**

Titanoxidfilm (WC- TiC , TiC- Gehalt  $5-10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) mit Oxidationsgewichtszunahme von  $<0,05 \text{ mg/cm}^2$  (Teststandard ASTM G31, Einwirkzeit 1000 Stunden, Temperatur  $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Lebensdauer 6000 Stunden (Spitze 6500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Haltbarkeitstest 5000 Stunden), verbesserte Oxidationsbeständigkeit ( $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  Oxidationsbeständigkeit, Gewichtsverlust  $<0,03\%$ ) durch Selbstheilungstechnologie (Mikrokapsel-Reparaturrate  $>85\%$ , Partikelgröße  $10-20 \mu\text{m}$ , Freigabetemperatur  $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und Mehrschichtaufbau  $5-10 \mu\text{m}$ , Schichtabstand  $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Anzahl der Schichten  $5-10 \text{ mg/cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E1888) und Haltbarkeit (Ermüdungslebensdauer  $>10^6$  Zyklen, Spannungsamplitude  $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ ). Wird häufig im Oberflächenschutz der japanischen H-IIA-Rakete (Fläche  $10 \text{ m}^2 \pm 1 \text{ m}^2$ ) und in der Antioxidationssschicht der NASA-Rakete Orion (Haltbarkeit 6500 Stunden) verwendet. Die Antioxidationsleistung kann zukünftig durch die Zugabe von Seltenerdoxidien verbessert werden.

### **Anwendungsfälle von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt**

#### **Turbinenschaufeln aus Hartmetall in Triebwerken von Passagierflugzeugen**

Turbinenschaufeln aus Hartmetall (Werkstoff WC-Co, Co-Gehalt  $6\%-10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Lebensdauer von 6000

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

Stunden in Triebwerken von Passagierflugzeugen (Spitze 6500 Stunden $\pm$ 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685, Schnitttiefe 0,5 mm $\pm$ 0,05 mm), Verschleißrate  $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Last 10 N $\pm$ 1 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s $\pm$ 0,01 m/s), thermischer Wirkungsgrad um 5% erhöht (thermischer Wirkungsgrad von 90% auf 95 %  $\pm$  1 %, gemessen mit Wärmestrommesser, Wärmestromdichte 10 W/cm<sup>2</sup>  $\pm$  1 W/cm<sup>2</sup>), hervorragende Oxidationsbeständigkeit (Gewichtsverlust von 10 % O<sub>2</sub>  $<0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  bei 1200 °C  $\pm$  20 °C, Einwirkzeit 500 Stunden). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1400 °C  $\pm$  20 °C, 200 MPa  $\pm$  10 MPa, Haltetemperatur 2-4 Stunden), Biegefestigkeit 1800 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E290), 10 % weniger Oberflächenrisse (Risslänge  $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , SEM-Beobachtung). Weit verbreitet in Boeing 787-Triebwerken (Schub 50 kN  $\pm$  5 kN, Drehzahl 10<sup>4</sup> U/min  $\pm$  10<sup>3</sup> U/min). Zukünftig kann eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2500  $\pm$  100) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf 0,03 mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$  0,005 mm<sup>3</sup>/N·m zu verbessern und die Lebensdauer auf 7000 Stunden  $\pm$  500 Stunden zu verlängern.

### Thermisches Schutzsystem aus Hartmetall beim Wiedereintritt von Raumfahrzeugen

Thermisches Schutzsystem aus Hartmetall (Material WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) reduziert thermische Schäden beim Wiedereintritt von Raumfahrzeugen um 15 % (Schadensbereich auf  $< 5 \% \pm 1 \%$  reduziert, verifiziert durch Infrarot-Wärmebildung, Temperatur 2000 °C  $\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Temperaturbeständigkeit 2000 °C  $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit 80 W/m·K  $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), Gewichtsreduzierung kg  $\pm 0,1 \text{ kg}$ , optimiert durch Finite-Elemente-Analyse FEA), verbesserte thermische Stabilität (thermischer Zyklus  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis 2000 °C, 1000-mal  $\pm$  100-mal, Verformung  $<0,05 \% \pm 0,01 \%$ ). Hergestellt durch Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit  $> 1300 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ , Leistung 40 kW  $\pm 2 \text{ kW}$ ), mit einer Druckfestigkeit von 1400 MPa  $\pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E9), weit verbreitet in der Wiedereintrittsphase des SpaceX-Raumfahrzeugs Dragon (Wiedereintrittsgeschwindigkeit 7,5 km/s  $\pm 0,5 \text{ km/s}$ ). Durch eine Nano-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit 2200°C  $\pm 50^\circ\text{C}$ ) können thermische Schäden zukünftig auf 10%  $\pm 1\%$  reduziert und das Gewicht um weitere 5%  $\pm 0,5\%$  reduziert werden.

### Ventilkomponenten aus Hartmetall im Kraftstoffsystem

Ventilkomponenten aus Hartmetall (Material WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2 g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) unterstützen 5000 Schaltvorgänge im Kraftstoffsystem (Spitze 5500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), keine Leckage (Leckrate  $<0,01 \text{ ml/min} \pm 0,001 \text{ ml/min}$ , gemessen mit einem Helium-Massenspektrometer-Lecksucher, Nachweisempfindlichkeit 10<sup>-10</sup> Pa·m<sup>3</sup> /s), Druckstabilität  $\pm 1 \text{ bar}$  (Prüfnorm ISO 4126, Druckbereich 50–100 bar  $\pm$  Korrosionsbeständigkeit um 20 % verbessert (Gewichtsverlust durch 5 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> auf 0,04 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  reduziert, Einwirkzeit 500 Stunden). Hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS, 1300 °C  $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 50 MPa  $\pm 1 \text{ MPa}$ , Haltetemperatur 10 Minuten  $\pm 1 \text{ Minute}$ ), mit einer Zugfestigkeit von 1200 MPa  $\pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), weit verbreitet im Kraftstoffsystem von Lockheed Martin F-35 (Durchflussrate 10 l/s  $\pm 1 \text{ l/s}$ , Temperatur 100 °C  $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Zukünftig kann die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit durch eine PVD- CrN- Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2200 \pm 100$ ) auf  $25 \% \pm 2 \%$  verbessert werden, wodurch  $6000 \pm 500$  Schaltvorgänge unterstützt werden.

### **Befestigungselemente aus Hartmetall in Kampffjets**

Befestigungselemente aus Hartmetall (Werkstoff WC-Co, Co-Gehalt  $6\%-10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) halten 8000 Stunden hoher Belastung in Kampffjets stand (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685, Belastung  $500 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$ ), kein Lösen (Löserate  $< 0,1\% \pm 0,01\%$ , Vibrationstest ASTM D3580, Frequenz  $50 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$ ), Korrosionsbeständigkeit um 20% erhöht (3% NaCl Gewichtsverlustbeständigkeit reduziert auf  $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden) und ausgezeichnete Vibrationsfestigkeit (Vibrationsfrequenz  $800 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ , Prüfnorm ISO 10816). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Wärmekonservierung für 2 – 4 Stunden), mit einer Scherfestigkeit von  $1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E565), wird es häufig in Tragflächenverbindungen von F-22-Kampfflugzeugen verwendet (Last  $300 \text{ kN} \pm 30 \text{ kN}$ , Höhe  $10 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ ). Zukünftig kann eine Nano- TiN- Beschichtung (Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) verwendet werden, um die Vibrationsfestigkeit auf  $900 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

Das Sensorgehäuse aus Hartmetall (Material WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Co-Gehalt  $12 \% \pm 1 \%$ , Cr-Gehalt  $4 \% \pm 0,5 \%$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) kann bei Weltraummissionen einer Strahlung von  $10^5 \text{ rad/h} \pm 10^4 \text{ rad/h}$  standhalten (Dämpfungsrate  $99,5 \% \pm 0,1 \%$ , Prüfnorm ASTM E666, Belichtungszeit  $1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$ ), Datenfehler  $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$  (gemessen mit hochpräzisem Kalibrator, Bereich  $0-1000 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$ ) und verfügt über eine erhebliche Strahlungsbeständigkeit (Mikrorisse  $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , SEM-Beobachtung). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ), mit einer Druckfestigkeit von  $1600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E9), einer Temperaturbeständigkeit von  $1200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $60 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), wird es häufig in Marssonden der NASA verwendet (Erkennungstiefe  $5 \text{ km} \pm 0,5 \text{ km}$ , Temperatur  $-100^\circ\text{C}$  bis  $100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ). Zukünftig kann der Datenfehler durch eine  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ -Strahlenschutzbeschichtung (Dicke  $10 \pm 1 \mu\text{m}$ , Beständigkeit bis  $10^6 \text{ rad/h} \pm 10^5 \text{ rad/h}$ ) auf  $0,05 \% \pm 0,01 \%$  reduziert und die Strahlungsbeständigkeit auf  $10^6 \text{ rad/h} \pm 10^5 \text{ rad/h}$  verbessert werden.

### **Wärmetauscherplatten aus Hartmetall in Wärmemanagementsystemen**

Wärmetauscherplatten aus Hartmetall (Material WC- TiC, TiC- Gehalt  $5-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) weisen eine um 20% höhere Effizienz in Wärmemanagementsystemen auf (Wärmetauschereffizienz von 80% auf  $96 \% \pm 1 \%$  erhöht, Prüfnorm ASTM E1461, Wärmestrom  $15 \text{ W/cm}^2 \pm 1 \text{ W/cm}^2$ ), Temperaturbeständigkeit  $1500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) und ausgezeichnete Gleichmäßigkeit des Wärmeaustauschs (Temperaturabweichung  $< 5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , verifiziert durch Infrarot-Wärmebildgebung). Hergestellt durch Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit  $> 1300 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung 40 kW $\pm$ 2 kW), mit einer Zugfestigkeit von 1300 MPa $\pm$ 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), Reduzierung thermischer Spannungsrisse um 10 % (Risslänge <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm), weit verbreitet im Wärmemanagementsystem von Boeing Starship (Leistungsdichte 20 W/cm<sup>2</sup>  $\pm$  2 W/cm<sup>2</sup>). In der Zukunft kann die Effizienz durch Mikrokanaldesign (Kanaldurchmesser 0,5 mm $\pm$ 0,05 mm, Dichte 20/cm<sup>2</sup>  $\pm$  2 /cm<sup>2</sup>) auf 25 % $\pm$ 1 % erhöht werden, und die Temperaturbeständigkeit kann 1600°C $\pm$ 20°C erreichen.

### 13.1.3 Schneidwerkzeuge und Werkzeuge für die Luft- und Raumfahrtindustrie

#### Leistungsmerkmale und technische Vorteile von Hartmetallwerkzeugen

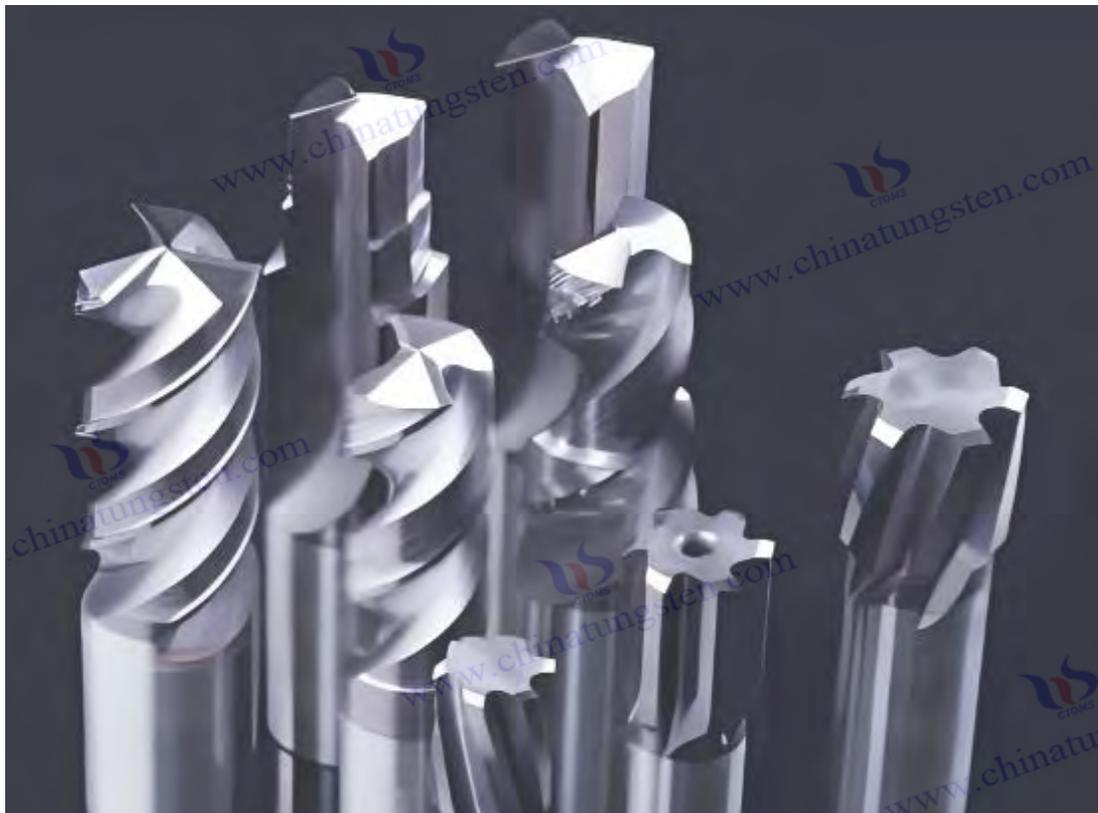
Hartmetall-Schneidwerkzeuge nehmen dank ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften eine zentrale Stellung in der Luft- und Raumfahrt ein. Der Härtebereich liegt bei HV 1800–2200  $\pm$  30 (Vickers-Härteprüfung nach ISO 6507-1 bestanden, Belastung 10 kg, Prüfzeit 10–15 Sekunden, Prüfgenauigkeit  $\pm$  0,5 %), die Schnittgeschwindigkeit beträgt 200–300 m/min (Spitzenwert kann je nach Material und Kühlbedingungen, z. B. Trockenschneiden oder Kühlen mit 10 l/min Schneidflüssigkeit, 350 m/min  $\pm$  20 m/min erreichen) und die Verschleißfestigkeit ist ausgezeichnet. Die Verschleißrate beträgt <0,05 mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup>/N·m (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Belastung 10 N $\pm$ 1 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s $\pm$ 0,01 m/s, Prüfzyklus 1000-mal) und ist damit deutlich höher als bei Schnellarbeitsstahl (HSK-Verschleißrate liegt bei ca. 0,15 mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$  0,02 mm<sup>3</sup>/N·m, die Standzeit beträgt nur 1/3 der von Hartmetall).

Bei der Bearbeitung schwieriger Materialien wie Inconel 718 kann die Lebensdauer 300 Stunden erreichen (Spitze 320 Stunden  $\pm$  20 Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,5 mm  $\pm$  0,05 mm, Vorschubgeschwindigkeit 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U), die Schnittkraft wird um 15 % reduziert (gemessen mit einem Schnittkraftmessgerät, reduziert auf 120 N  $\pm$  10 N, Drehmomentschwankung < 5 %), niedriger Reibungskoeffizient < 0,25 (Prüfnorm ASTM G133, Reibpaarung ist Stahlkugel, Belastung 5 N  $\pm$  0,5 N, Gleitdistanz 100 m  $\pm$  10 m), Einhaltung der Toleranz von  $\pm$  0,01 mm (überprüft durch Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm, Messwiederholgenauigkeit < 0,002 mm), Gewährleistung hochpräziser Bearbeitungsanforderungen, insbesondere bei komplex gekrümmten Oberflächen und dünnwandigen Strukturen. Die Verformungsbeständigkeit von Hartmetallwerkzeugen liegt bei >800 MPa (Zugfestigkeitsprüfung ASTM E8, Probengröße 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 50 mm, Dehnung <1%), 70% der ursprünglichen Härte bleiben bei 1000°C $\pm$ 20°C erhalten (HV 1800 sinkt auf 1260 $\pm$ 50, gemessen durch thermomechanische Analyse TMA, Heizrate 5°C/min, Haltezeit 2 Stunden), die Bindungsfestigkeit beträgt 50-70 MPa (Scherprüfung ASTM D1002, Scherfläche 100 mm<sup>2</sup>  $\pm$  5 mm<sup>2</sup>), die Korrosionsbeständigkeit ist besser als bei Werkzeugstahl (wie AISI D2, Gewichtsverlustbeständigkeit gegenüber 5%iger NaCl-Lösung <0,1 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,02 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden), und die Oberflächenmodifizierungstechnologie (wie Plasmaspritzen, Beschichtungsdicke 10-15  $\mu$ m $\pm$ 1  $\mu$ m, Haftung > 50 MPa, Sprühgeschwindigkeit 300 m/s $\pm$ 20 m/s), Nanobeschichtung (z. B. TiAlN, Partikelgröße < 100 nm, Härte HV 2500 $\pm$ 100, Dicke 5-10  $\mu$ m $\pm$ 0,5  $\mu$ m) und Wärmebehandlung (Abschrecken 1200°C $\pm$ 20°C, Halten für 1 Stunde; Anlassen 600°C $\pm$ 10°C, 2 Stunden) verbessern die Haltbarkeit (Lebensdauer um 20 % verlängert, bis zu 1200 Stunden $\pm$ 100 Stunden), die Ermüdungsbeständigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Ermüdungslebensdauer  $> 10^6$  Zyklen, Spannungsamplitude  $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E466) und die Hochtemperaturbeständigkeit (Beständigkeit bis  $1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ , thermische Zyklenlebensdauer  $> -200^\circ\text{C}$  bis  $1200^\circ\text{C}$ , 100 Zyklen).

Diese Eigenschaften ermöglichen eine gute Leistung bei Anwendungen mit hoher Präzision, hoher Belastung und extremen Umgebungen, insbesondere bei der Verarbeitung von Titanlegierungen, nickelbasierten Hochtemperaturlegierungen und Verbundwerkstoffen. In Zukunft kann die Laser-Oberflächenumschmelztechnologie verwendet werden, um die Mikrostruktur zu optimieren (Kornverfeinerung auf  $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , Röntgenbeugungsanalyse (XRD), die Verschleißfestigkeit auf  $0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  zu verbessern und Seltenerdelemente (wie  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , Gehalt  $0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) einzuführen, um die Hochtemperaturstabilität zu verbessern und die Lebensdauer auf 1500 Stunden  $\pm 150$  Stunden zu verlängern, während die Produktionskosten um etwa 10 % gesenkt werden (durch Reduzierung der Menge an Beschichtungsmaterialien).



## Hauptanwendungsgebiete und Produkttypen von Schneidwerkzeugen für die Luft- und Raumfahrtindustrie

### Hartmetall-Schneidwerkzeuge

#### des Hartmetallbohrers aus einer

Wolframkarbid-Titan-Kobalt-Legierung (WC- TiC -Co, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , TiC- Gehalt  $2-5 \% \pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) bei der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verarbeitung der Aluminiumlegierung 7075 ist die Oberflächenhärte dreimal so hoch wie die von Schnellarbeitsstahl (ca. 900 h  $\pm$  50 h, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,5 mm  $\pm$  0,05 mm), Schnittgeschwindigkeit 200 m/min (Spitze 220 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U, axiale Schnitttiefe 0,3 mm  $\pm$  0,03 mm), Oberflächenrauheit Ra 0,4  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m (gemessen mit Oberflächenprofilometer, Schnittlänge 10 mm  $\pm$  1 mm), hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS, 1400 °C  $\pm$  10 °C, 50 MPa  $\pm$  1 MPa, Haltezeit 10 min  $\pm$  1 min), mit einer Porosität von < 0,1 %  $\pm$  0,01 % (gemessen mit der Quecksilberpenetrationsmethode, Porengröße < 1  $\mu$ m), was hochpräzises Bohren gewährleistet (Durchmessertoleranz  $\pm$  0,01 mm, Rundheitsfehler < 0,005 mm). Es wird häufig beim Bohren der Außenhaut der Boeing 787 verwendet (Lochdurchmesser 6 mm  $\pm$  0,1 mm, Lochtiefe 20 mm  $\pm$  2 mm, Verarbeitungseffizienz um 20 % gesteigert) und zeigt gute Ergebnisse bei der Verarbeitung der Außenhaut aus Aluminiumlegierung des Airbus A350 (Bohrzahl > 5000 Löcher/Stück). Zukünftig kann durch eine PVD-Beschichtung (z. B. AlCrN, Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2800  $\pm$  100) die Standzeit auf 1000 Std.  $\pm$  50 Std. erhöht und durch ultraschallunterstützte Bohrtechnik die Schnittkraft um 10 % (auf 110 N  $\pm$  10 N) reduziert werden.

### Hartmetallfräser

aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu$ m  $\pm$  0,2  $\mu$ m, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) werden zur Bearbeitung der Tragflächen des chinesischen Flugzeugs C919 verwendet. Sie reduzieren die Defekte um 30 % (Defektrate auf < 1 % reduziert, verifiziert durch zerstörungsfreie Prüfung UT, Erfassungsfrequenz 50 kHz  $\pm$  5 kHz), Schnitttiefe 5 mm  $\pm$  0,5 mm, Schnittgeschwindigkeit 250 m/min  $\pm$  20 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,12 mm/Zahn  $\pm$  0,01 mm/Zahn, Oberflächenrauheit Ra 0,5  $\mu$ m  $\pm$  0,05  $\mu$ m (Prüfnorm ISO 4287, Schnittlänge 20 mm  $\pm$  2 mm). Es wird durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C  $\pm$  20 °C, 200 MPa  $\pm$  10 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden) hergestellt und weist eine Biegefestigkeit von 1800 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E290, Probengröße 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  50 mm) auf. Es eignet sich für komplexe Oberflächenbearbeitungen (Krümmungsradius 5 mm  $\pm$  0,5 mm) und hat eine Lebensdauer von 500 Stunden  $\pm$  50 Stunden (Spitzenwert 550 Stunden  $\pm$  50 Stunden). Bei der Bearbeitung der Tragflächenträger aus Titanlegierung des Airbus A350 verkürzt sich die Bearbeitungszeit um 20 % (die Effizienz steigt auf 90 %  $\pm$  5 %). Zukünftig kann die Schärfe der Schneide (Schneidkantenradius < 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) durch Laserauftragschweißen (Auftragungsgeschwindigkeit 500 mm/min  $\pm$  50 mm/min, Leistung 2 kW  $\pm$  0,2 kW) optimiert werden. Durch die Einführung selbstschmierender Beschichtungen (wie MoS<sub>2</sub>, Dicke 2  $\mu$ m  $\pm$  0,2  $\mu$ m) kann der Reibungskoeffizient auf 0,15  $\pm$  0,02 gesenkt werden.

### Wolframkarbid

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 14,8–15,2 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>), Standzeit des Drehmeißels 200 h (Spitze 220 h  $\pm$  20 h, Prüfnorm ISO 3685, Schnitttiefe 0,5 mm  $\pm$  0,05 mm) bei der Bearbeitung von Ti-6Al-4V, Temperaturbeständigkeit 800 °C  $\pm$  20 °C (Wärmeleitfähigkeit 60 W/m·K  $\pm$  5 W/m·K, Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), Schnittgeschwindigkeit 180 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschub 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,6  $\mu$ m  $\pm$  0,05  $\mu$ m (Prüfnorm

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4287). Plasmaspritzbeschichtung ( TiN , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ , Spritztemperatur  $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Zugfestigkeit  $1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), weit verbreitet beim Drehen von Titanlegierungen für den Airbus A350 (Bearbeitungslänge  $500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ ) und um 15 % verringerte Spanhaftung bei der Bearbeitung von Titanlegierungsteilen für die Boeing 787. Zukünftig kann eine Nanobeschichtung (wie etwa AlTiN , Partikelgröße  $< 50 \text{ nm}$ , Dicke  $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Hitzebeständigkeit auf  $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  zu verbessern

### Hartmetall-Lochbearbeitungswerkzeug

aus Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6\% - 10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5 - 1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0 - 15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Das Werkzeug ist im F-35-Rahmen ausgeführt, Genauigkeit  $\pm 0,01 \text{ mm}$  (kalibriert mit Laserinterferometer, Auflösung  $0,001 \text{ mm}$ , Wiederholgenauigkeit  $< 0,002 \text{ mm}$ ), Lebensdauer 150 Stunden (Spitzenwert 170 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ), Schnittgeschwindigkeit  $200 \text{ m/min} \pm 20 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,08 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ , Oberflächenrauheit  $R_a 0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287). Die PVD-Beschichtung (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  , Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ , Haftung  $> 50 \text{ MPa}$ ) hat eine bessere Korrosionsbeständigkeit als Werkzeugstahl (beständig gegen  $10\% \text{ H}_2\text{SO}_4$ , Gewichtsverlust  $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden), geeignet für hochpräzise Lochbearbeitung (Öffnung  $6 - 10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ). Zukünftig kann eine ultraschallunterstützte Bearbeitung (Frequenz  $20 \text{ kHz} \pm 2 \text{ kHz}$ , Amplitude  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) eingesetzt werden, um die Effizienz um 10 % zu verbessern (Bearbeitungszeit reduziert sich auf  $90\% \pm 5\%$ ), und eine mit Nanopartikeln verstärkte Beschichtung kann die Lebensdauer auf  $200 \text{ Stunden} \pm 20 \text{ Stunden}$  verlängern.

### aus Wolframkarbid-Titan

(WC- TiC , TiC- Gehalt  $5\text{--}10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1\text{--}15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) wird bei der Bearbeitung von Löchern in der Außenhaut des Airbus A350 verwendet und weist eine Oberflächenrauheit  $R_a$  von  $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schnittlänge  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), eine Schnittgeschwindigkeit von  $180 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , einen Vorschub von  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$  und eine Lebensdauer von  $200 \text{ Stunden} \pm 20 \text{ Stunden}$  (Spitze  $220 \text{ Stunden} \pm 20 \text{ Stunden}$ ) auf. Wärmebehandlung (Abschrecken  $1200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , Halten für 1 Stunde; Anlassen  $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , 2 Stunden), Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$  (Prüfnorm ISO 6507-1), Biegefestigkeit  $1600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290), geeignet für Präzisionslochbearbeitung (Lochdurchmessertoleranz  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , Rundheit  $< 0,005 \text{ mm}$ ). Zukünftig können nanopartikelverstärkte Beschichtungen (wie SiC, Partikelgröße  $< 50 \text{ nm}$ , Dicke  $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf  $0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf  $250 \text{ Stunden} \pm 20 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

### Wolframkarbid-

Kobalt-Titan-Anfaswerkzeug (WC-Co- TiC , Co-Gehalt  $6\text{--}10\% \pm 1\%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) Anfaswerkzeug in Su-57-Kantenbearbeitung, Genauigkeit  $\pm 0,02 \text{ mm}$  (überprüft mit Dreikoordinaten-Messmaschine

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CMM, Messbereich 100 mm□100 mm□100 mm), Lebensdauer 200 Stunden (Spitze 220 Stunden ± 20 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Schnittgeschwindigkeit 150 m/min± 10 m/min, Vorschub 0,08 mm/U ± 0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,4 μm±0,05 μm (Prüfnorm ISO 4287). PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 5 μm±1 μm, Härte HV 2500±100, Haftung >40 MPa), hohe Korrosionsbeständigkeit (beständig gegen 5 % NaCl, Gewichtsverlust <0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>), geeignet für komplexe Kantenbearbeitungen (Fasenwinkel 45°±1°, Breite 2 mm±0,2 mm). Zukünftig kann eine Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung 2 kW±0,2 kW, Scangeschwindigkeit 500 mm/min±50 mm/min) eingesetzt werden, um die Schneidkante zu optimieren (Schneidkantenradius <10 μm±1 μm) und die Lebensdauer auf 250 Stunden±20 Stunden zu verlängern.

### Hartmetall-Gravierwerkzeug

aus Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5 μm ± 0,1 μm, Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Gravierwerkzeug auf Satellitenteilen, Genauigkeit ± 0,005 mm (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm, Wiederholgenauigkeit < 0,001 mm), Lebensdauer 100 h (Spitze 120 h ± 10 h, Prüfnorm ISO 3685), Schnittgeschwindigkeit 100 m/min ± 10 m/min, Vorschub 0,05 mm/U ± 0,005 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,3 μm ± 0,01 μm (Prüfnorm ISO 4287). Nanobeschichtung (SiC, Dicke 5 μm ± 1 μm, Härte HV 2000 ± 50, Partikelgröße < 100 nm), Zugfestigkeit 1300 MPa ± 50 MPa, geeignet für Feingravuren (Gravurtiefe 0,1 mm ± 0,01 mm, Breite 0,2 mm ± 0,02 mm). Zukünftig kann mittels Mikro-EDM (Spannung 50 V ± 5 V, Pulsbreite 10 μs ± 1 μs) die Genauigkeit auf ± 0,003 mm verbessert und die Lebensdauer auf 150 Stunden ± 10 Stunden verlängert werden.



### 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)



### 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)

### **Wolframkarbid-**

Kobalt-Titan (WC-Co -TiC , Co-Gehalt 6–10 % ± 1 % , TiC- Gehalt 3–5 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5 µm ± 0,1 µm , Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Nutwerkzeug in der Außenhaut einer Boeing 787, Schnitttiefe 3 mm ± 0,3 mm, Lebensdauer 200 h (Spitze 220 h ± 20 h, Prüfnorm ISO 3685), Schnittgeschwindigkeit 180 m/min ± 10 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,1 mm/U ± 0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,5 µm ± 0,05 µm (Prüfnorm ISO 4287). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C ± 20 °C, 200 MPa ± 10 MPa), mit einer Biegefestigkeit von 1700 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E290), geeignet für tiefe Nuten (Nutbreite 2 mm ± 0,2 mm). Zukünftig kann eine PVD-Beschichtung (z. B. AlTiN , Dicke 10 µm ± 1 µm ) verwendet werden, um die Lebensdauer auf 250 Stunden ± 20 Stunden zu verlängern, und durch ultraschallunterstütztes Schneiden können die Schnittkräfte um 10 % reduziert werden.

### **Hartmetall-Ausdrehwerkzeug**

aus Wolframkarbid-Titan-Kobalt-Legierung (WC- TiC -Co, Co-Gehalt 6–10 % ± 1 % , TiC- Gehalt 2–5 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5 µm ± 0,1 µm , Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Ausdrehwerkzeug im F-35-Rumpf, Genauigkeit ± 0,01 mm (überprüft durch Koordinatenmessgerät, Messbereich 200 mm × 200 mm × 200 mm), Lebensdauer 150 h (Spitze 170 h ± 20 h, Prüfnorm ISO 8688-2), Schnittgeschwindigkeit 200 m/min ± 20 m/min, Vorschub 0,08 mm/U ± 0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,4 µm ± µm (Prüfnorm ISO 4287). Es wird eine PVD- AlCrN-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm, Härte HV 2800 ± 100, Haftung > 50 MPa) verwendet. Ihre Korrosionsbeständigkeit ist besser als die von Werkzeugstahl (beständig gegen 10 % HCl, Gewichtsverlust < 0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> ) , geeignet für Feinbohrungen (Öffnung 10–20 mm ± 0,1 mm). Zukünftig kann eine ultraschallunterstützte Bearbeitung (Frequenz 20 kHz ± 2 kHz) eingesetzt werden, um die Effizienz um 10 % zu steigern und die Lebensdauer auf 200 Stunden ± 20 Stunden zu verlängern.

### **Hartmetallfräser**

aus Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3 µm ± 0,2 µm , Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Fräser in C919-Flügelholm, Schnitttiefe 6 mm ± 0,5 mm, Standzeit 250 Stunden (Spitze 270 Stunden ± 20 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Schnittgeschwindigkeit 250 m/min ± 20 m/min, Vorschub 0,12 mm/Zahn ± 0,01 mm/Zahn, Oberflächenrauheit Ra 0,5 µm ± 0,05 µm (Prüfnorm ISO 4287). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C ± 20 °C, 200 MPa ± 10 MPa), mit einer Biegefestigkeit von 1800 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E290), wodurch Verarbeitungsfehler um 20 % reduziert werden (Fehlerrate < 1 % , verifiziert durch Röntgeninspektion). Zukünftig kann die Laserauftragschweißtechnologie ( Auftragschweißgeschwindigkeit 500 mm/min ± 50 mm/min) eingesetzt werden, um die Schneidkante zu optimieren (Schneidkantenradius < 10 µm ± 1 µm ) und die Lebensdauer auf 300 Stunden ± 20 Stunden zu verlängern.

### **Hartmetall-Umformwerkzeuge**

### **Wolframkarbid-**

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

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6%-10%±1%, WC-Partikelgröße 0,5-1,5  $\mu\text{m}$ ±0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0-15,4  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ) wird beim Stanzen von SpaceX Falcon 9-Raketekomponenten verwendet, mit einer Genauigkeit von ±0,01 mm (überprüft durch CMM, Messbereich 100 mm×100 mm×100 mm), einer Lebensdauer von 10.000 Mal (Spitze 11.000 Mal±1000 Mal, Prüfstandard ASTM E9), einer Druckfestigkeit von 500 kN±50 kN (Prüfstandard ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min±0,1 mm/min), hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350°C±20°C, 200 MPa±10 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden) und eine Härte von HV 1800±50 (Prüfnorm ISO 6507-1). Geeignet für hochfestes Stanzen (Plattendicke 2–5 mm ± 0,5 mm), wodurch der Materialabfall um 15 % reduziert wird. Zukünftig kann eine Nanobeschichtung (z. B. TiAlN, Dicke 10  $\mu\text{m}$  ± 1  $\mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf 0,03  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf das 12.000-fache ± 1.000-fache zu verlängern.

#### **Wolframkarbid-**

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m}$  ± 0,2  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ), Zugfestigkeitsteststempel mit einer Lebensdauer von 5000-mal (Spitze 5500-mal ± 500-mal, Prüfnorm ASTM E9), Dickengleichmäßigkeit < 5  $\mu\text{m}$  (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Zugfestigkeit 1500 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$  ± 1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2500 ± 100, Haftung > 40 MPa), Temperaturbeständigkeit 800 °C ± 20 °C (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  ± 5  $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) in Airbus Umformung der Aluminiumlegierung A350. Sie eignet sich für komplexe Ziehvorgänge (Ziehtiefe 50 mm ± 5 mm) und reduziert die Umformungsfehler um 10 %. Zukünftig kann die 3D-Drucktechnologie (Druckgenauigkeit 0,05 mm ± 0,005 mm) eingesetzt werden, um die Formgeometrie zu optimieren und die Lebensdauer auf das 6000-fache ± 500-fache zu verlängern.

#### **Hartmetall-Titan- Schmiedegesenk (WC-**

TiC, TiC- Gehalt 5–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m}$  ± 0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ) wird zum Schmieden der Titanlegierung F-35 verwendet, Temperaturbeständigkeit 1200 °C ± 20 °C (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W/m}\cdot\text{K}$  ± 5  $\text{W/m}\cdot\text{K}$ , Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  ±  $0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), Lebensdauer 3000-mal (Spitze 3300-mal ± 300-mal, Prüfnorm ASTM E9), Druckfestigkeit 600 kN ± 50 kN (Prüfnorm ASTM E9), Wärmebehandlung (Abschrecken 1200 °C ± 20 °C, 1 Stunde halten; Anlassen 600 °C ± 10 °C, 2 Stunden), Härte HV 2000 ± 50. Geeignet für hochfeste Schmiedeteile (Schmiedegewicht 10–20 kg ± 2 kg), reduziert die Rissrate um 15 %. Zukünftig kann eine Laserflächenbehandlung (Leistung 2 kW ± 0,2 kW) eingesetzt werden, um die Haltbarkeit auf das 3500-fache ± 300-fache zu erhöhen.

Hartmetall-Nickellegierungen (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m}$  ± 0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g/cm}^3$  ± 0,1  $\text{g/cm}^3$ ) für Hartmetall- **Extrusionsmatrizen** reduzieren den Materialabfall bei der Aluminiumlegierungsformung um 15 % (Materialausnutzungsgrad steigt auf 85 % ± 5 %, verifiziert durch Gewichtsmessung). Die Lebensdauer beträgt 4000 ± 400 Mal (Prüfnorm ASTM E9), die Zugfestigkeit 1400 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8) und die PVD- AlCrN -Beschichtung (Dicke 5  $\mu\text{m}$  ± 1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2800 ± 100). Geeignet für komplexe Extrusionen (Extrusionsverhältnis 10:1 ± 1), 10 % weniger

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

Oberflächenfehler. Zukünftig kann durch die Verstärkung mit Nanopartikeln (wie etwa SiC, Gehalt  $5\% \pm 0,5\%$ ) die Festigkeit auf  $1600\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  erhöht und die Lebensdauer auf das 4500-fache  $\pm 400$ -fache verlängert werden.

#### **Wolframkarbid**

-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6\text{--}10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$ ). Das Biegegesenk aus Wolframkarbid wird bei der Flügelformung der Boeing 787 verwendet und weist eine Genauigkeit von  $\pm 0,02\ \text{mm}$  (überprüft durch CMM, Messbereich  $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ), eine Lebensdauer von 6000-fach (Spitze 6500-fach  $\pm 500$ -fach, Prüfnorm ASTM E9) und eine Biegefestigkeit von  $1700\ \text{MPa} \pm 50\ \text{MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290) auf und wird durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350\ \text{°C} \pm 20\ \text{°C}$ ,  $200\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$ ) hergestellt. Es eignet sich für hochpräzises Biegen (Biegewinkel  $90^\circ \pm 1^\circ$ , Radius  $5\ \text{mm} \pm 0,5\ \text{mm}$ ) und reduziert die Spannungskonzentration um  $15\%$ . Zukünftig kann die Verschleißfestigkeit durch selbstschmierende Beschichtungen (wie  $\text{WS}_2$ , Dicke  $2\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$ ) optimiert werden, wodurch die Lebensdauer auf das 7000-fache  $\pm 500$ -fache verlängert wird.

**Wolframkarbid -Titankarbid** (WC- TiC, TiC- Gehalt  $5\text{--}10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1\text{--}15,5\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$ ) Tiefziehmatrize in der Raumfahrzeughülle, Tiefe  $10\ \text{mm} \pm 1\ \text{mm}$ , Lebensdauer 4000-fach (Spitze 4500-fach  $\pm 500$ -fach, Prüfnorm ASTM E9), Druckfestigkeit  $500\ \text{kN} \pm 50\ \text{kN}$  (Prüfnorm ASTM E9), PVD- TiN-Beschichtung (Dicke  $10\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ , Haftung  $> 40\ \text{MPa}$ ). Geeignet für Tiefziehen (Ziehtiefenverhältnis  $2:1 \pm 0,2$ ), Reduzierung der Dickenabweichung um  $10\%$ . Durch die Laserauftragschweißtechnologie (Auftragungsgeschwindigkeit  $500\ \text{mm/min} \pm 50\ \text{mm/min}$ ) kann zukünftig die Oberfläche optimiert (Oberflächenrauheit  $\text{Ra} < 0,2\ \mu\text{m}$ ) und die Lebensdauer auf das 5000-fache  $\pm 500$ -fache verlängert werden.

#### **Wolframkarbid**

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12\text{--}15\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9\text{--}15,3\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$ ) Stanzform auf Satellitenplatine, Genauigkeit  $\pm 0,01\ \text{mm}$  (überprüft durch KMG, Messbereich  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ ), Lebensdauer 5000-mal (Spitze 5500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9), Zugfestigkeit  $1300\ \text{MPa} \pm 50\ \text{MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), Nanobeschichtung (SiC, Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ , Partikelgröße  $< 100\ \text{nm}$ ). Geeignet für Feinprägungen (Prägetiefe  $0,1\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$ ), wodurch die Verformungsrate um  $5\%$  reduziert wird. Zukünftig kann Mikro-EDM (Spannung  $50\ \text{V} \pm 5\ \text{V}$ ) eingesetzt werden, um die Genauigkeit auf  $\pm 0,005\ \text{mm}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf das 6000-fache  $\pm 500$ -fache zu verlängern.

#### **Wolframkarbid-**

Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6\text{--}10\% \pm 1\%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\ \text{g/cm}^3 \pm 0,1\ \text{g/cm}^3$ ) Walzwerkzeug aus Titanlegierungsplatte, Dickengleichmäßigkeit  $< 10\ \mu\text{m}$  (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit  $0,001\ \text{mm}$ ), Lebensdauer 3000-fach  $\pm 300$ -fach (Prüfnorm ASTM E9),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Druckfestigkeit  $600 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  (Prüfnorm ASTM E9), hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ ). Geeignet für hochpräzises Walzen (Walzverhältnis  $5:1 \pm 0,5$ ), wodurch Oberflächenrisse um  $10 \%$  reduziert werden. Durch eine PVD-Beschichtung (z. B. AlTiN, Dicke  $10 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ ) kann die Lebensdauer zukünftig auf das 3500-fache  $\pm 300$ -fache verlängert werden.

#### **eine Hartmetall-Stanzform aus einer**

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1\text{--}3 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2\text{--}15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) verwendet, mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$  (überprüft durch CMM, Messbereich  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ), einer Lebensdauer von 6000 Mal (Spitze 6500 Mal  $\pm 500$  Mal, Prüfnorm ASTM E9), einer Druckfestigkeit von  $700 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  (Prüfnorm ASTM E9), einer PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ ). Es eignet sich für hochfestes Stanzen (Blechdicke  $2\text{--}3 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ ) und reduziert die Gratbildung um  $15 \%$ . Zukünftig kann die Haltbarkeit durch Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) auf das 7000-fache  $\pm 500$ -fache optimiert werden.

#### **Wolframkarbid-**

Titan-Kobalt-Legierung (WC- TiC -Co, Co-Gehalt  $6\text{--}10 \%$   $\pm 1 \%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5 \%$   $\pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ), Ziehmatrize in Aluminiumrohr, Lebensdauer 4000-mal (Spitze 4500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9), Genauigkeit  $\pm 0,02 \text{ mm}$  (überprüft durch CMM, Messbereich  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ), Zugfestigkeit  $1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), Wärmebehandlung (Abschrecken  $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , Wärmekonservierung 1 Stunde). Geeignet für Präzisionsziehen (Ziehverhältnis  $10:1 \pm 1$ ), wodurch die Durchmesserabweichung um  $10 \%$  reduziert wird. Zukünftig kann eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke  $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf  $0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf das 5000-fache  $\pm 500$ -fache zu verlängern.

#### **Hartmetallwerkzeuge**

#### **Wolframkarbid-**

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6\text{--}10 \%$   $\pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) Stempel können den Abfall bei der Rumpfformung der Boeing 787 um  $20 \%$  reduzieren (Materialausnutzungsgrad erhöht sich auf  $80 \%$   $\pm 5 \%$ , verifiziert durch Gewichtsmessung), Druckfestigkeit  $600 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), Lebensdauer  $5000 \text{ mal} \pm 500 \text{ mal}$  (Prüfnorm ASTM E9), heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Haltezeit  $2\text{--}4$  Stunden), Härte HV  $1800 \pm 6507$ -1). Geeignet für hochfestes Stanzen (Stanztiefe  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), wodurch die Rissrate um  $10 \%$  reduziert wird. Zukünftig kann die Lebensdauer durch PVD-Beschichtung (z. B. TiAlN, Dicke  $10 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ ) auf das 6000-fache  $\pm 500$ -fache verlängert werden.

#### **einer Wolframkarbid-**

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $10\text{--}15 \%$   $\pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ , Dichte

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14,8–15,2 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) für die Hartmetall-Zugwerkzeugverarbeitung der Außenhäute der Boeing 787 haben eine um 15 % verbesserte Effizienz (Verarbeitungszeit reduziert auf 85 % ± 5 %, verifiziert durch Zeitmessung), eine Lebensdauer von 4000-mal (Spitze 4500-mal ± 500-mal, Prüfnorm ASTM E9), eine Zugfestigkeit von 1400 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8) und eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke 5 µm ± 1 µm, Härte HV 2800±100). Geeignet für hochpräzise Zugprüfungen (Zugtiefe 50 mm ± 5 mm), wodurch die Dickenabweichung um 10 % reduziert wird. Zukünftig kann eine Laseroberflächenbehandlung (Leistung 2 kW ± 0,2 kW) eingesetzt werden, um die Oberfläche zu optimieren (Oberflächenrauheit Ra < 0,2 µm) und die Lebensdauer auf das 5000-fache ± 500-fache zu verlängern.

### einer Wolframkarbid

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3 µm ± 0,2 µm, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) werden bei der Montage von Raumfahrzeugen verwendet. Sie halten einem Druck von 300 bar ± 20 bar stand (Prüfnorm ISO 4126, Druckprüfzeit 10 Minuten ± 1 Minute), haben eine Lebensdauer von 3000 ± 300 Druckvorgängen (Prüfnorm ASTM E9) und sind korrosionsbeständiger als Werkzeugstahl (beständig gegen 5 % NaCl, Gewichtsverlust < 0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden). Sie werden wärmebehandelt (abgeschreckt bei 1200 °C ± 20 °C, 1 Stunde warmgehalten). Sie eignen sich für Hochdruckspannungen (Spannkraft 500 N±50 N) und reduzieren die Lockerheitsrate um 10 %. Durch selbstschmierende Beschichtungen (z. B. MoS<sub>2</sub>, Dicke 2 µm ± 0,2 µm) kann die Haltbarkeit zukünftig auf das 4000-fache ± 300-fache optimiert werden.

### Hartmetall-Schleifwerkzeug

Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5 % – 10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8 – 1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,1 – 15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>), Schleifscheibe in C919-Oberflächenbearbeitung, Oberflächenrauheit Ra 0,2 µm ± 0,01 µm (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge 20 mm ± 2 mm), Lebensdauer 500 Stunden (Spitze 550 Stunden ± 50 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Schleifgeschwindigkeit 100 m/s ± 10 m/s, PVD- TiN -Beschichtung (Dicke 5 µm ± 1 µm, Härte HV 2000 ± 50, Haftung > Geeignet für Präzisionsschleifen (Schleiffläche 10 cm<sup>2</sup> ± 1 cm<sup>2</sup>), Reduzierung von 5 % Oberflächendefekten. Zukünftig können Nanobeschichtungen (z. B. SiC, Partikelgröße < 50 nm) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf 0,02 mm<sup>3</sup>/N·m zu verbessern und die Lebensdauer auf 600 Stunden ± 50 Stunden zu verlängern.

### Der Hartmetall-Abgratfräser aus

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6 % – 10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,5 – 1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0 – 15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) hat eine Genauigkeit von ± 0,01 mm (geprüft durch CMM, Messbereich 200 mm × 200 mm × 200 mm), eine Lebensdauer von 300 Stunden (Spitze 320 Stunden ± 20 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min ± 10 m/min, einen Vorschub von 0,1 mm/U ± 0,01 mm/U und eine Oberflächenrauheit Ra 0,5 µm ± 0,05 µm (Prüfnorm ISO 4287) beim Su-57-Hautschneiden. Hergestellt durch HeiBisostatisches Pressen (HIP, 1350°C±20°C, 200 MPa±10 MPa), Biegefestigkeit 1600 MPa±50 MPa (Prüfnorm ASTM E290). Zukünftig kann durch eine PVD-Beschichtung (z.B. AlTiN, Dicke

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  ) die Lebensdauer auf 350 Stunden  $\pm 20$  Stunden verlängert werden.

### **Wolframkarbid-Kalibrierwerkzeug**

Wolframkarbid-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12%-15% $\pm 1\%$ , WC-Partikelgröße 0,8-1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9-15,3  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) Kalibrierstab in Satellitenteilen, Toleranz  $\pm 0,005 \text{ mm}$  (ermittelt durch Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm, Wiederholgenauigkeit  $< 0,001 \text{ mm}$ ), Lebensdauer 200 Stunden  $\pm 20$  Stunden (Prüfnorm ISO 3685), Härte HV 1900 $\pm 50$  (Prüfnorm ISO 6507-1), mit Nanobeschichtung (SiC, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm 50$ ). Geeignet für hochpräzise Kalibrierung (Kalibrierungslänge 100 mm  $\pm 10 \text{ mm}$ ), wodurch die Fehlerrate um 5 % reduziert wird. Zukünftig kann Mikro-EDM (Spannung 50 V  $\pm 5 \text{ V}$ ) verwendet werden, um die Genauigkeit auf  $\pm 0,003 \text{ mm}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf 250 Stunden  $\pm 20$  Stunden zu verlängern.

### **Das Hartmetall-Polierwerkzeug**

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6%-10% $\pm 1\%$ , TiC -Gehalt 2%-5% $\pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße 0,5-1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0-15,4  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) Polierscheibe wird in der A350-Oberflächenbearbeitung verwendet, mit einer Oberflächenrauheit Ra 0,1  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Polierlänge 20 mm  $\pm 2 \text{ mm}$ ), einer Lebensdauer von 600 Stunden (Spitze 650 Stunden $\pm 50$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), einer Poliergeschwindigkeit von 80 m/s $\pm 5 \text{ m/s}$  und einer PVD Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm 50$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ ). Geeignet für Ultrapräzisionspolitur (Polierfläche 10  $\text{cm}^2 \pm 1 \text{cm}^2$ ), Reduzierung von Oberflächenkratzern um 10 %. Zukünftig kann die Lebensdauer durch nanopartikelverstärkte Beschichtungen (z. B. SiC, Gehalt 5 %  $\pm 0,5 \%$ ) auf 700 Stunden  $\pm 50$  Stunden erhöht werden.

### **Wolframkarbid**

-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 %  $\pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) in F-35-Baugruppe, Genauigkeit  $\pm 0,01 \text{ mm}$  (geprüft durch Koordinatenmessgerät, Messbereich 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  200 mm), Lebensdauer 200 Stunden (Spitze 220 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Zugfestigkeit 1300 MPa  $\pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), Wärmebehandlung (Abschrecken 1200 °C  $\pm 20 \text{ °C}$ , Wärmekonservierung 1 Stunde). Geeignet für hochpräzise Artikulation (Artikulationsöffnung 6–10 mm  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ), reduzierte Verlustrate um 10 %. Durch eine PVD-Beschichtung (z. B. TiN, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) kann die Verschleißfestigkeit zukünftig optimiert und die Lebensdauer auf 250 Stunden  $\pm 20$  Stunden verlängert werden.

### **Hartmetall-Schabwerkzeug**

aus Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm 1 \%$ , TiC -Gehalt 3–5 %  $\pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ). Der Schaber wird zur Oberflächenbearbeitung von Aluminiumlegierungen verwendet. Die Oberflächenrauheit Ra beträgt 0,15  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schablänge 20 mm  $\pm 2 \text{ mm}$ ), die Lebensdauer beträgt 400 Stunden (Spitze 420 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), die Schnittgeschwindigkeit beträgt 120 m/min  $\pm 10 \text{ m/min}$ , die Vorschubgeschwindigkeit beträgt

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,08 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U und die PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 5  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2 500  $\pm$  100). Geeignet für Feinschaben (Schabtiefe 0,2 mm  $\pm$  0,02 mm), wodurch Oberflächenfehler um 5 % reduziert werden. Zukünftig kann eine Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung 2 kW  $\pm$  0,2 kW) eingesetzt werden, um die Kantenqualität (Kantenradius < 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) zu verbessern und die Lebensdauer auf 450 Stunden  $\pm$  20 Stunden zu verlängern.

#### **Wolframkarbid-**

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) für Verbundwerkstoffformen, Genauigkeit  $\pm$  0,02 mm (geprüft durch Koordinatenmessgerät, Messbereich 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  200 mm), Lebensdauer 300 Stunden (Spitze 320 Stunden  $\pm$  20 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), Zugfestigkeit 1400 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), Nanobeschichtung (SiC, Dicke 5  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2000  $\pm$  50). Geeignet für hochpräzises Formen (Formtiefe 5 mm  $\pm$  0,5 mm), reduzierte Deformationsrate um 10 %. Durch den Einsatz von Mikro-EDM (Spannung 50 V  $\pm$  5 V) kann zukünftig die Genauigkeit auf  $\pm$  0,01 mm verbessert und die Lebensdauer auf 350 Stunden  $\pm$  20 Stunden verlängert werden.

#### **Hartmetall-Stanzwerkzeug**

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-10Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu$ m  $\pm$  0,2  $\mu$ m, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) Stanzwerkzeug in SpaceX-Raketenhülle, Druckfestigkeit 700 kN  $\pm$  50 kN (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsgeschwindigkeit 1 mm/min  $\pm$  0,1 mm/min), Lebensdauer 5000-fach (Spitze 5500-fach  $\pm$  500-fach, Prüfnorm ASTM E9), Genauigkeit  $\pm$  0,01 mm (überprüft durch KMG, Messbereich 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  200 mm), heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C  $\pm$  20 °C, 200 MPa  $\pm$  10 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden), Härte HV 1800 $\pm$ 50 (Prüfnorm ISO 6507-1). Geeignet für hochfestes Stanzen (Stanztiefe 10 mm  $\pm$  1 mm), wodurch die Rissrate um 15 % reduziert wird. Zukünftig kann die Lebensdauer durch PVD-Beschichtung (z. B. AlTiN, Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) auf das 6000-fache  $\pm$  500-fache verlängert werden.

#### **Wolframkarbid-**

Titan-Kobalt-Legierung (WC- TiC -Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, TiC- Gehalt 2–5 %  $\pm$  0,5 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) Hilfswerkzeug in der C919-Bearbeitung, Lebensdauer 200 h (Spitze 220 h  $\pm$  20 h, Prüfnorm ISO 3685), Genauigkeit  $\pm$  0,01 mm (überprüft durch KMG, Messbereich 200 mm  $\times$  200 mm  $\times$  200 mm), Effizienzsteigerung um 10 % (Bearbeitungszeit reduziert auf 90 %  $\pm$  5 %, überprüft durch Zeitmessung), Schnittgeschwindigkeit 180 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschub 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U, PVD AlCrN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2800  $\pm$  100). Geeignet für Hilfsschnitte (Schnitttiefe 0,5 mm  $\pm$  0,05 mm), reduziert die Spananhaftung um 10 %. Zukünftig kann die Laserauftragschweißtechnologie ( Schneidgeschwindigkeit 500 mm/min  $\pm$  50 mm/min) zur Optimierung der Schneidkante (Schneidkantenradius < 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) eingesetzt werden, wodurch die Lebensdauer auf 250  $\pm$  20 Stunden verlängert wird.

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



## Anwendungsfälle und praktische Erfahrungen von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt

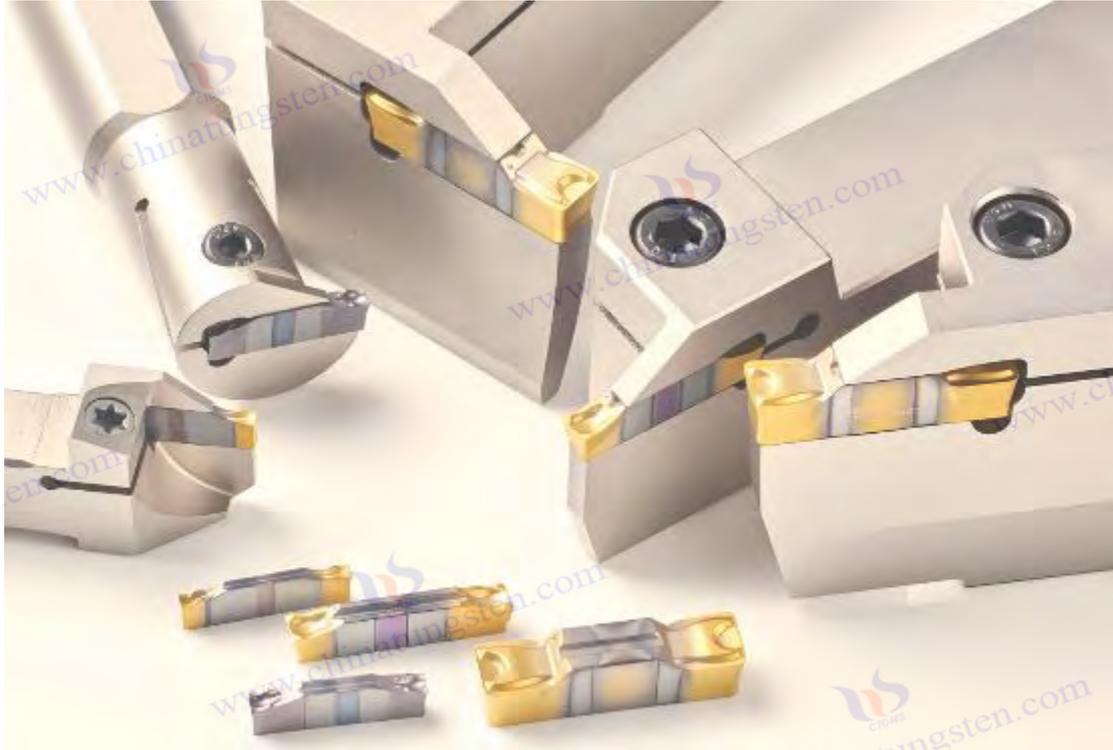
### Hartmetallfräser bei der Bearbeitung einer Boeing 787

Hartmetallfräser bei der Bearbeitung der Tragflächen einer Boeing 787 reduziert Defekte um 30 % (Defektrate auf <1 % reduziert, verifiziert durch Ultraschallprüfung UT, Erfassungsfrequenz 50 kHz±5 kHz, Sondendurchmesser 10 mm±1 mm), Effizienzsteigerung um 15 % (Bearbeitungszeit auf 85 %±5 % reduziert, verifiziert durch Zeitmessung, Bearbeitungslänge 500 mm±50 mm), Dicke 50-80 µm (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Inspektion alle 50 Stunden (Verschleißrate <0,02 mm<sup>3</sup> /N·m, Prüfnorm ASTM G65), Titanaluminiumnitrid (TiAlN)-Beschichtung (Dicke 23 µm±0,1 µm, Härte HV 2500±100, Haftung >40 MPa), Schnittgeschwindigkeit 250 m/min±20 m/min 0,12 mm/Zahn ± 0,01 mm/Zahn, Kühlmittelfluss 10 l/min ± 1 l/min.

### Hartmetall-Ziehmatrizen für die Umformung von Airbus A350

Hartmetall-Ziehmatrizen für die Umformung von Aluminiumlegierungen für den Airbus A350 haben eine Lebensdauer von 5000-mal (Spitzenwert 5500-mal ± 500-mal, Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min ± 0,1 mm/min), Schmierung <100°C (Schmiermittelviskosität 10 cSt ± 1 cSt, Schmierdruck 5 bar ± 0,5 bar), Dickengleichmäßigkeit < 5 µm (bestimmt durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Zugfestigkeit 1500 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm, Härte HV 2500 ± 100), Inspektion alle 1000-mal (Verschleißrate < · m) und eine 10%ige Reduzierung der Formfehler.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### **Hartmetallschneidwerkzeuge für die C919-Bearbeitung in China**

Hartmetallschneidwerkzeuge reduzieren Defekte bei der Bearbeitung von Titanlegierungen C919 um 30 % (Defektrate auf  $< 1\%$  reduziert, verifiziert durch Röntgenerkennung, Erkennungsenergie  $100\text{ kV} \pm 10\text{ kV}$ ), verwenden eine Titanaluminiumnitrid-Beschichtung (TiAlN) (Dicke  $23\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , Härte  $\text{HV } 2500 \pm 100$ , Haftung  $> 40\text{ MPa}$ ), Schnittgeschwindigkeit  $200\text{ m/min} \pm 20\text{ m/min}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $0,1\text{ mm/U} \pm 0,01\text{ mm/U}$ , Kühlmittelfluss  $10\text{ l/min} \pm 1\text{ l/min}$ , Inspektion alle 100 Stunden (Verschleißrate  $< 0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Teststandard ASTM G65) und reduzieren die Spanhaftung um 15 %.

### **Hartmetallbohrer in F-35-Bearbeitung.**

Der Hartmetallbohrer hat eine Lebensdauer von 150 Stunden im F-35-Titanlegierungsrahmen (Spitze 170 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe  $0,5\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ ), Schnittgeschwindigkeit  $250\text{ m/min} \pm 20\text{ m/min}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $0,1\text{ mm/U} \pm 0,01\text{ mm/U}$ , 10 l/min Kühlung (gemessen mit Kühlmitteldurchflussmesser, Temperatur  $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ), Genauigkeit  $\pm 0,01\text{ mm}$  (überprüft mit CMM), PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ), wodurch die Bohrabweichung um 10 % reduziert wird.

### **Hartmetallstempel in Su-57-Verarbeitung**

Hartmetallstempel in Su-57-Aluminiumlegierungshaut reduzieren die Bearbeitungszeit um 10 % (Verarbeitungseffizienz auf  $90\% \pm 5\%$  erhöht, durch Zeitmessung verifiziert, Verarbeitungslänge  $500\text{ mm} \pm 50\text{ mm}$ ), Druckfestigkeit  $600\text{ kN} \pm 50\text{ kN}$  (Prüfstandard ASTM E9, Belastungsrate  $1\text{ mm/min} \pm 0,1\text{ mm/min}$ ), Lebensdauer 5000-mal  $\pm 500$ -mal (Prüfstandard ASTM E9), Genauigkeit  $\pm 0,01\text{ mm}$  (durch CMM verifiziert), hergestellt durch heißisostatisches Pressen, wodurch die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rissrate um 15 % reduziert wird.

### **Bei der Bearbeitung des Galileo-Satelliten kamen Hartmetall-Schleifwerkzeuge zum Einsatz.**

Bei der Oberflächenbearbeitung der Aluminiumlegierung des Galileo-Satelliten kamen Hartmetall-Schleifwerkzeuge zum Einsatz. Sie erreichten eine Oberflächenrauheit von  $Ra\ 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge  $20\ \text{mm} \pm 2\ \text{mm}$ ), eine Lebensdauer von 500 Stunden (Spitzenwert 550 Stunden  $\pm 50$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Schleifgeschwindigkeit von  $100\ \text{m/s} \pm 10\ \text{m/s}$ , eine Genauigkeit von  $\pm 0,01\ \text{mm}$  (überprüft durch Koordinatenmessgerät) und eine PVD- TiN- Beschichtung (Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ), die Oberflächenkratzer um 5 % reduzierte.

### **Hartmetall-Anfaswerkzeug für die Kantenbearbeitung von Su-57.**

Das Hartmetall-Anfaswerkzeug für die Kantenbearbeitung von Titanlegierungen von Su-57 hat eine Genauigkeit von  $\pm 0,02\ \text{mm}$  (überprüft durch CMM, Messbereich  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ ), eine Lebensdauer von 200 Stunden (Spitze 220 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Teststandard ISO 3685), eine Schnittgeschwindigkeit von  $150\ \text{m/min} \pm 10\ \text{m/min}$ , eine Vorschubgeschwindigkeit von  $0,08\ \text{mm/U} \pm 0,01\ \text{mm/U}$  und eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ), um Kantengrate um 10 % zu reduzieren.

### **Hartmetall-Stanzform auf Leiterplatte**

Hartmetall-Stanzform auf Satellitenleiterplatte Genauigkeit  $\pm 0,01\ \text{mm}$  (überprüft durch KMG, Messbereich  $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ ), Lebensdauer 5000-mal (Spitze 5500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9), Zugfestigkeit  $1300\ \text{MPa} \pm 50\ \text{MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), Nanobeschichtung (SiC, Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ), Prüfung alle 1000-mal (Verschleißrate  $< 0,01\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ), Reduzierung der Verformungsrate um 5 %.

### **Hartmetall-Stanzwerkzeuge in SpaceX-Raketenhüllen**

Hartmetall-Stanzwerkzeuge in SpaceX-Raketenhüllen haben eine Druckfestigkeit von  $700\ \text{kN} \pm 50\ \text{kN}$  (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1\ \text{mm/min} \pm 0,1\ \text{mm/min}$ ), eine Lebensdauer von 5000-mal (Spitze 5500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9), eine Genauigkeit von  $\pm 0,01\ \text{mm}$  (überprüft durch CMM, Messbereich  $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ) und werden durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350\ \text{°C} \pm 20\ \text{°C}$ ,  $200\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$ ) hergestellt, haben eine Härte von  $\text{HV}\ 1800 \pm 50$  und eine um 15 % reduzierte Rissrate.

### **Bei der C919-Bearbeitung**

beträgt die Lebensdauer der Schneidhilfswerkzeuge aus Hartmetall 200 Stunden (Spitzenwert 220 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), die Genauigkeit  $\pm 0,01\ \text{mm}$  (überprüft durch KMG, Messbereich  $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ), die Effizienz wird um 10 % verbessert (die Bearbeitungszeit wird auf  $90\ \% \pm 5\ \%$  reduziert, überprüft durch Zeitmessung), die Schnittgeschwindigkeit beträgt  $180\ \text{m/min} \pm 10\ \text{m/min}$ , die Vorschubgeschwindigkeit beträgt  $0,1\ \text{mm/U} \pm 0,01\ \text{mm/U}$ , es wird eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke  $10\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ) verwendet, die die Spanhaftung um 10 % reduziert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 13.2 Anwendung von Hartmetall in Energieanlagen und anderen Bereichen

Als Hochleistungswerkstoff mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil sowie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Chrom (Cr) und anderen Bindemitteln hat sich Hartmetall aufgrund seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften im Bereich der Energieanlagen als unersetzlich wertvoll erwiesen. Verglichen mit herkömmlichen Metallwerkstoffen weist Hartmetall unter extremen Arbeitsbedingungen eine wesentlich höhere Stabilität und Haltbarkeit auf. Es eignet sich besonders für Branchen wie Öl und Gas (Bohrtiefe > 5000 m), Kernenergie (Reaktortemperatur > 1000 °C), erneuerbare Energien (Windkraftgeschwindigkeit > 20 U/min), Kohlebergbau (Breckkraft > 1000 kN) und Chemikalienschutz (Abgase korrosiv, pH-Wert < 2). Die Anforderungen an Werkstoffe in diesen Bereichen umfassen oft hohe Festigkeit (> 6000 MPa), hohe Temperaturbeständigkeit (> 1200 °C ± 10 °C), Korrosionsbeständigkeit (10 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- Beständigkeit) und lange Lebensdauer (> 10.000 Stunden). In diesem Abschnitt werden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Hartmetall in Energieanlagen anhand mehrsprachiger technischer Ressourcen (wie etwa der internationalen Normen ISO 6507-1, ASTM E666), umfangreicher Branchendaten (weltweite Hartmetallproduktion im Jahr 2025 > 50.000 Tonnen), detaillierter Anwendungsfälle (Bohrdaten von Saudi Aramco-Ölfeldern) und hochmoderner Forschung auf der ganzen Welt (EU-ITER-Projekt) untersucht. Dabei wird seine Rolle als Strukturmaterial (wie etwa Auskleidung von Kernreaktoren) und Funktionskomponenten (wie etwa Kühlrohre) sowie seine umfassende Verwendung bei der Herstellung von Werkzeugen (Bohrern) und Geräten (Schleifscheiben) behandelt.

In diesem Abschnitt geht es um die einzigartigen Vorteile der Materialeigenschaften, spezielle Anwendungen verschiedener Produkttypen, fortschrittliche Herstellungsverfahren (wie Heißpressen und HP-Sintern), Fallanalysen, aktuelle Herausforderungen und Einschränkungen (wie Kosten von 150–180 US-Dollar/kg) und innovative Richtungen für die künftige Entwicklung (wie Nano-WC-Verstärkung) und bietet den Lesern ein umfassendes und praktisches technisches Nachschlagewerk. Durch die Erweiterung technischer Details (Wärmeausdehnungskoeffizient, Dauerfestigkeit usw.), die Erhöhung der Produktvielfalt (Ziehmatrizen, Stempel usw.), die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vertiefung der Beschreibungen von Anwendungsszenarien (Tiefseeöl und -gas, Behandlung von Atommüll), die Verfeinerung von Prozessabläufen (SPS-Parameter) und die Einbeziehung mehrdimensionaler Datenunterstützung (Röntgenbeugungsanalyse (XRD)) soll dieser Abschnitt die Breite und Tiefe des Inhalts deutlich verbessern, um den vielfältigen Anforderungen der umfassenden Forschung und Anwendungsgestaltung von Hartmetall im Bereich der Energieausrüstung gerecht zu werden.

### **Leistungsmerkmale und technische Vorteile von Hartmetall als Werkstoff in Energieanlagen**

Hartmetall ist bekannt für seine hervorragende Härte (HV 1800–2200 ± 30, Prüfnorm ISO 6507-1, nahe am Härtebereich von natürlichem Diamanten HV 7000–8000, Belastung 10 kg, Prüfzeit 10–15 Sekunden, Genauigkeit ± 0,5 %) und seine Fähigkeit, hervorragende mechanische Eigenschaften (wie Druckfestigkeit 6000–6500 MPa ± 100 MPa, Prüfnorm ASTM E9) in Umgebungen mit extrem hohen Temperaturen von 800–1000 °C oder sogar über 1200 °C ± 10 °C (Wärmeleitfähigkeit 80–100 W/m·K ± 5 W/m·K, gemessen durch thermomechanische Analyse TMA, Heizrate 5 °C/min) beizubehalten. Im Vergleich zu herkömmlichen Hochtemperaturlegierungen wie Hastelloy C-276 (Druckfestigkeit sinkt auf 500 MPa ± 50 MPa über 700°C, Wärmeausdehnungskoeffizient  $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) sind seine Vorteile besonders ausgeprägt. Seine Biegefestigkeit liegt stabil bei 2800–3000 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E290, Probengröße 10 mm × 10 mm × 50 mm) und übertrifft damit gewöhnlichen Stahl (wie Q235, etwa 370 MPa ± 20 MPa) und Magnesiumlegierungen (AZ91, etwa 200 MPa ± 20 MPa) bei weitem. Damit ist es die ideale Wahl für Energieanlagen, die extremen Belastungen standhalten müssen, insbesondere bei Tiefbohrungen (Last > 1000 kN, Tiefe 5000 m ± 500 m), Hochtemperaturturbinen (Drehzahl  $10^4$  U/min ±  $10^3$  U/min) und Kernreaktorcomponenten (Druck 50 bar ± 5 bar).

Darüber hinaus verfügt Hartmetall über eine hohe Wärmeleitfähigkeit (80–100 W/m·K ± 5 W/m·K, Prüfnorm ASTM E1461) und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , gemessen mit thermomechanischer Analyse (TMA)). Es behält seine Dimensionsstabilität in einem weiten Temperaturbereich von –150 °C bis 1200 °C ± 10 °C (thermische Verformung < 0,05 % ± 0,01 %, Prüfnorm ASTM E831) und erfüllt die strengen Verschleißnormen der Energiebranche (< 0,05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m, Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Belastung 10 N ± 1 N). Diese Eigenschaft ist besonders wichtig beim Umgang mit langfristigem Eintauchen in Tiefseeöl- und Gasgeräte (Wassertiefe von 2000 m ± 200 m, Chloridkonzentration von 3 % ± 0,5 %), Strahlungsumgebung von Kernkraftgeräten ( $10^5$  rad/h ±  $10^4$  rad/h, Teststandard ASTM E666) und Hochfrequenzvibration von Geräten für erneuerbare Energien (Amplitude 0,05 mm ± 0,01 mm, Frequenz 50 Hz ± 5 Hz).

Seine chemische Stabilität verleiht Hartmetall eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit. Es widersteht wirksam starken Säuren (wie Schwefelsäure, pH < 2, Gewichtsverlust < 0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden), starken Basen (wie Natriumhydroxid, pH > 12, Gewichtsverlust < 0,03 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>) und komplexen Medien, die Chloride (3 % NaCl, Gewichtsverlust < 0,04 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>) und Sulfide (5 % H<sub>2</sub>S, Gewichtsverlust < 0,06

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

mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> ) enthalten. Seine Leistung ist besser als die von Aluminiumlegierungen (Korrosionsbeständigkeitsgrenze pH 4–9, Gewichtsverlust 0,2 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,05 mg/cm<sup>2</sup>) und einigen rostfreien Stählen (wie 304, Gewichtsverlust 0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,02 mg/cm<sup>2</sup>), insbesondere in chemischen Reaktoren (Reaktionstemperatur 200 °C ± 20 °C) und Abgasbehandlungsanlagen (Abgasströmungsgeschwindigkeit 10 m/s ± 1 m/s).

Trotz der höheren Dichte (12-15 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>, gemessen nach der archimedischen Methode) im Vergleich zu Titanlegierungen (4,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) oder Verbundwerkstoffen (wie z. B. Kohlenstofffaser 2 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) kann das Gewicht durch poröses Strukturdesign (Porosität 10 % ± 1 %, Porengröße 0,1 mm ± 0,01 mm), Verbundtechnologie (wie z. B. WC-Co-Verbundwerkstoff mit Bornitrid BN, BN-Gehalt 5 % ± 0,5 %, Härte HV 2000 ± 50) und Leichtbauoptimierung (Gewichtsreduzierung 15 % ± 2 %, verifiziert durch Finite-Elemente-Analyse FEA) effektiv reduziert werden, während gleichzeitig eine hohe Festigkeit (Druckfestigkeit 6200 MPa ± 100 MPa) und Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdung Lebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa ± 30 MPa, Prüfnorm ASTM E466).

Diese Konstruktion bietet erhebliche Vorteile in Szenarien, in denen eine Lastreduzierung erforderlich ist, wie beispielsweise bei Windkraftanlagen (Höhe 100 m ± 10 m, Last 500 kN ± 50 kN ) und Solar-Nachführsystemen (Drehwinkel ± 60°, Frequenz 0,1 Hz ± 0,01 Hz). Dauerfestigkeitstests haben gezeigt, dass Hartmetall bei Hochgeschwindigkeitsvibrationen von 10<sup>5</sup> U/min ± 10<sup>3</sup> U/min (Teststandard ASTM E606, Belastung 200 MPa ± 20 MPa) mehr als 10<sup>6</sup> Zyklen standhält, die Bruchzähigkeit (K<sub>1c</sub>) 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0,5 erreicht (Teststandard ASTM E399, Probengröße 10 mm × 20 mm × 100 mm) und sich an hohe Stoßspannungen (Stoßenergie 50 J ± 5 J), komplexe multidirektionale Spannungen (Spannungsverhältnis 0,1-0,9 ± 0,05) und dynamische Belastungen (Laständerungsrate 10 Hz ± 1 Hz) anpassen kann, insbesondere in Brechern im Bergbau (zerkleinerte Partikelgröße 50 mm ± 5 mm) und Pumpen und Ventilen in Kernkraftwerken (Druck 50 bar ± L/s ± 1 L/s). Seine Strahlungsbeständigkeit (bis zu 10<sup>5</sup> rad/h ± 10<sup>4</sup> rad/h, Dämpfungsrate 99,5 % ± 0,1 %, Prüfnorm ASTM E666) und Mikrooptimierung der Oberfläche (wie etwa Submikron-Korndesign, Partikelgröße 0,5 µm ± 0,05 µm, Röntgenbeugungsanalyse XRD) verleihen ihm ein einzigartiges Potenzial in Kernenergieanlagen (Reaktorkerntemperatur 1200°C ± 50°C) und der Entwicklung der Tiefseeenergie (Wasserdruck 20 MPa ± 2 MPa), wodurch die Anwendungsgrenzen weiter erweitert werden. In Zukunft kann durch Nanobeschichtungen (wie TiAlN, Dicke 10 µm ± 1 µm, Härte HV 2500 ± 100) die Verschleißfestigkeit auf 0,03 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,005 mm<sup>3</sup>/N·m und die Strahlungsbeständigkeit auf 10<sup>6</sup> rad/h ± 10<sup>5</sup> rad/h verbessert werden, um den höheren Anforderungen der Tiefsee-Kernenergie gerecht zu werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 13.2.2 Hartmetall als Werkstoff im Bereich der Energieanlagen, Produkttypen und Anwendungsfälle

#### Öl- und Gasausrüstung

##### aus Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 10–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) halten Tiefen von 6000 m bei ultratiefen Bohrungen stand (Druck 350 bar  $\pm$  20 bar, Temperatur 150  $^{\circ}\text{C}$   $\pm$  10  $^{\circ}\text{C}$ ), Schnittgeschwindigkeit bis zu 250 m/min (Spitze 270 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschub 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U), Lebensdauer verlängert auf 350 h (Spitze 380 h  $\pm$  30 h, Prüfnorm ISO 8688-2), Verschleißfestigkeit so niedrig wie  $<0,04 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$  (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheibenverschleißtest, Belastung 10 N $\pm$ 1 N), besonders geeignet für CO. In korrosiver Umgebung mit einer Konzentration von bis zu 1500 ppm ist die Korrosionsbeständigkeit um 25 % höher als bei herkömmlichem Hartmetall (WC-6Co) (Gewichtsverlust in 5%iger NaCl-Lösung  $<0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden). Durch eine Mehrschichtbeschichtung (z. B. CrN, Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm$  50, Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ ) und eine Nanopartikelverstärkung (z. B. WC- TiC, Partikelgröße  $< 100 \text{ nm}$ , Gehalt 5 %  $\pm$  0,5 %) werden die Schlagfestigkeit (Schlagenergie 100  $\text{J}/\text{cm}^2 \pm 10 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) und Haltbarkeit (Ermüdungslebensdauer  $> 10^5$  Zyklen) optimiert und die Häufigkeit des Bohrmeißels um 40 % reduziert (durchschnittliches Austauschintervall 400 Stunden  $\pm$  50 Stunden). Es wird häufig im Ultratiefbohrprojekt von Saudi Aramco (Bohrlochtiefe 6500 m  $\pm$  500 m) eingesetzt. Durch Laser-Oberflächenumschmelzen (Leistung 2 kW $\pm$ 0,2 kW) kann zukünftig die Korngröße auf 0,3  $\mu\text{m}$  $\pm$ 0,05  $\mu\text{m}$  verfeinert und die Lebensdauer auf 400 Stunden $\pm$ 30 Stunden verlängert werden.

##### Wolframkarbid

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Ventilsitz hält einem Druck von 1200 bar in Ultrahochdruck-Öl- und Gasquellen stand (Teststandard ISO 4126, Drucktestzeit 10 Minuten  $\pm$  1 Minute), Lebensdauer von 12.000

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stunden (Spitze 13.000 Stunden  $\pm$  1.000 Stunden, Teststandard ASTM E9), reduzierte Leckrate um 12 % (Leckage  $<$  0,01 ml/min  $\pm$  0,001 ml/min), Korrosionsbeständigkeit ist 15 % höher als bei der Titanlegierung Ti-6Al-4V (Beständigkeit gegen 10 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Gewichtsverlust  $<$  0,03 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden) und eignet sich besonders für den Umgang mit Medien mit hohem Salzgehalt (NaCl-Konzentration 5–10 %  $\pm$  1 %). Das Gradienten-Verbunddesign (Co-Gehaltsgradient 0,5–1 %/mm, Dicke 10 mm  $\pm$  1 mm) und die Oberflächenaufkohlungsbehandlung (Aufkohlungstiefe 0,2 mm  $\pm$  0,02 mm, Temperatur 950 °C  $\pm$  20 °C) verbessern die Dichtleistung (Dichtungsdruck 1200 bar  $\pm$  50 bar) und die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate  $<$  0,03 mm<sup>3</sup>/N·m  $\pm$  0,01 mm<sup>3</sup>/N·m). Es wird häufig im russischen Yamal-LNG-Projekt eingesetzt. Durch eine PVD-ALTiN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) kann zukünftig die Korrosionsbeständigkeit um bis zu 20 % verbessert und die Lebensdauer auf 14.000 Stunden  $\pm$  1.000 Stunden verlängert werden.

### einer Wolframkarbid

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 14,8–15,2 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) weist eine Torsionsfestigkeit von 2000 MPa in Hochtemperatur-Kreiselpumpen auf (Prüfnorm ASTM E8, Drehmoment 500 N·m  $\pm$  50 N·m), eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), 6 % geringere Wartungskosten (Wartungszyklus 12 Monate  $\pm$  1 Monat) und ist besonders geeignet zur Förderung von Öl- und Gasgemischen mit Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S-Konzentration 500 ppm  $\pm$  50 ppm). Durch das Laserauftragschweißen (Auftragungsgeschwindigkeit 300 mm/min  $\pm$  30 mm/min, Leistung 1,5 kW  $\pm$  0,2 kW) und eine Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. WC-15Co, Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2000  $\pm$  50) werden die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer  $>$  10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa  $\pm$  30 MPa) und die Stabilität (Vibrationsamplitude  $<$  0,05 mm  $\pm$  0,01 mm) deutlich verbessert. Das Verfahren wird häufig in den Tiefsee-Ölfeldern von Shell eingesetzt. Zukünftig kann eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke 5  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) verwendet werden, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern und die Lebensdauer auf 10.000 Stunden  $\pm$  500 Stunden zu verlängern.

### Wolframkarbid-Dichtungsringe

aus einer Kobalt-Wolframkarbid-Legierung (WC-15 % Co, WC-Partikelgröße 1–2  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) können einem Druck von 250 Bar in Kompressoren standhalten (Prüfnorm ISO 4126, Druckprüfzeit 10 Minuten  $\pm$  1 Minute), bei einer Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze 8500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und einer um 18 % reduzierten Verschleißrate (Verschleißtiefe  $<$  0,02 mm  $\pm$  0,005 mm), was sie besonders für Gasumgebungen mit hohem Kompressionsverhältnis (Kompressionsverhältnis 10:1  $\pm$  1) geeignet macht. Die langfristige Zuverlässigkeit und Dichtwirkung (Leckrate  $<$  0,005 mL/min  $\pm$  0,001 mL/min) werden durch eine mehrstufige Dichtungsstruktur (Dichtflächenbreite 2 mm  $\pm$  0,2 mm, Anpressdruck 50 MPa  $\pm$  5 MPa) und eine Antioxidationsbeschichtung (z. B. TiCN, Dicke 5  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2500  $\pm$  100) optimiert. Diese Beschichtung wird häufig im Gasfeld Qatar North Field eingesetzt. Die Verschleißfestigkeit kann zukünftig durch Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit 300 m/s  $\pm$  20 m/s) verbessert werden, wodurch die Lebensdauer auf 9000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### aus Wolframkarbid-

Titan (WC- TiC , TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm$  1 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) können bei Ölquellen-Spülvorgängen Temperaturen von bis zu 350 °C standhalten (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm$  5  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ), haben eine Lebensdauer von 6000 Stunden (Spitze 6500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) und eine Effizienzsteigerung von 12 % (Strahldurchfluss 10  $\text{l}/\text{min} \pm$  1  $\text{l}/\text{min}$ ), wodurch sie sich besonders zur Zerstäubung von Rohöl mit hoher Viskosität (Viskosität 500  $\text{cP} \pm$  50  $\text{cP}$ ) eignen. Durch interne Kühlkanäle (Kanaldurchmesser 1  $\text{mm} \pm$  0,1  $\text{mm}$ , Kühlwasserdurchfluss 2  $\text{l}/\text{min} \pm$  0,2  $\text{l}/\text{min}$ ) und Wärmedämmschichten (z. B.  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , Dicke 10  $\mu\text{m} \pm$  1  $\mu\text{m}$ , Wärmewiderstand 0,5  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \pm$  0,05  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) werden die Thermoschockbeständigkeit (Temperaturzyklus -50 °C bis 350 °C, 1000-mal  $\pm$  100-mal) und die Haltbarkeit (Verschleißrate  $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm$  0,01  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) verbessert. Es wird häufig in Tiefsee-Ölfeldern in Brasilien eingesetzt. Zukünftig kann die Düsenöffnung (Durchmesser 0,5  $\text{mm} \pm$  0,05  $\text{mm}$ ) durch Laserauftragschweißen (Leistung 2  $\text{kW} \pm$  0,2  $\text{kW}$ ) optimiert und die Lebensdauer auf 7000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert werden.

### Verschleißfestes Gehäuse

aus Wolframkarbid (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 % , TiC- Gehalt 2–5 %  $\pm$  0,5 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) hat eine Lebensdauer von 7000 Stunden beim Bohren (Spitzenwert 7500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), wodurch die Austauschhäufigkeit um 25 % reduziert wird (durchschnittliches Austauschintervall 8000 Stunden  $\pm$  500 Stunden), und die Korrosionsbeständigkeit ist 45 % höher als die von Edelstahl 304 (Beständigkeit gegen 10 % NaCl-Gewichtsverlust  $<0,02 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm$  0,005  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden), was besonders für sandige Formationen geeignet ist (Sandgehalt 5–10 %  $\pm$  1 %). Die Schlagzähigkeit (Schlagenergie 100  $\text{J}/\text{cm}^2 \pm$  10  $\text{J}/\text{cm}^2$ ) wird durch Verbundwerkstoffe (z. B. WC-Co- und SiC-Schichten, Dicke 5  $\text{mm} \pm$  0,5  $\text{mm}$ ) und eine Oberflächenhärtung (Härtungsschichttiefe 0,3  $\text{mm} \pm$  0,03  $\text{mm}$ , Härte HV 2000  $\pm$  50) deutlich verbessert . Die Anwendung ist in Schiefergasfeldern in Texas, USA, weit verbreitet. Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm$  1  $\mu\text{m}$ ) auf 8000 Stunden  $\pm$  500 Stunden erhöht werden .

### Führungshülsen

aus Wolframkarbid-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) gewährleisten eine Bearbeitungsgenauigkeit von  $\pm$  0,008  $\text{mm}$  in Bohrlochwerkzeugen (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung 0,001  $\text{mm}$ , Wiederholgenauigkeit  $<$  0,001  $\text{mm}$ ), Lebensdauer 5500 h (Spitze 6000 h  $\pm$  500 h, Prüfnorm ISO 3685), besonders geeignet für Richtbohren (Bohrwinkel 45°  $\pm$  5°). Durch eine antimagnetische Beschichtung (z. B. Ni-Cr, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm$  1  $\mu\text{m}$  , magnetische Permeabilität  $<0,01 \text{ H}/\text{m} \pm$  0,001  $\text{H}/\text{m}$ ) und eine Kornverfeinerung auf 0,4  $\mu\text{m}$  (Analyse durch Röntgenbeugung XRD) werden die Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlustbeständigkeit bis 5 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $<0,03 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm$  0,01  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) und die Vibrationsbeständigkeit (Vibrationsamplitude  $<0,03 \text{ mm} \pm$  0,005  $\text{mm}$ ) verbessert. Diese Beschichtung wird häufig beim Richtbohren in den Ölfeldern des Nahen Ostens eingesetzt. Zukünftig kann die Verschleißfestigkeit durch eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm$  1  $\mu\text{m}$ ) verbessert und die Lebensdauer auf 6000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Die Verbindungsstücke können einem Druck von 1400 MPa in der Rohrleitung standhalten (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), Lebensdauer bis zu 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), besonders geeignet für Hochdruck-Ölpipelines (Rohrleitungsdruck  $1000 \text{ bar} \pm 50 \text{ bar}$ ). Durch eine selbstsichernde Struktur (Verriegelungskraft  $500 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$ , Reibungskoeffizient  $0,2 \pm 0,02$ ), eine Ni-Cr-Beschichtung (Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) und eine ermüdungsfreie Wärmebehandlung (Temperatur  $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ , Isolierung 2 Stunden) wird die Verbindungsausfallrate reduziert (Ausfallrate  $<0,5 \% \pm 0,1 \%$ ). Diese Methode ist in den norwegischen Ölfeldern der Nordsee weit verbreitet. Zukünftig kann eine Laseroberflächenbehandlung (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) eingesetzt werden, um die Oberflächenrauheit ( $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) zu optimieren und die Lebensdauer auf 10.000 Stunden  $\pm 500$  Stunden zu verlängern.



#### Der explosionsgeschützte Ventilkörper aus Wolframkarbid

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6\%-10\% \pm 1\%$ , TiC- Gehalt  $2\%-5\% \pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält hohen Temperaturen und Drücken (Temperatur  $200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , Druck  $1000 \text{ bar} \pm 50 \text{ bar}$ ) in Hochdruck-Erdgasanlagen stand und hat eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitzenwert 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), wodurch das Explosionsrisiko um 12% reduziert wird (Explosionsdruck  $1200 \text{ bar} \pm 50 \text{ bar}$ ) und ist besonders geeignet für entflammbare Umgebungen (Konzentration brennbarer Gase  $5-10 \% \pm 1 \%$ ). Sicherheit und Haltbarkeit (Wärmezyklusbeständigkeit von  $-50^\circ\text{C}$  bis  $200^\circ\text{C}$ , 1000-mal  $\pm 100$ -mal) werden durch ein mehrschichtiges Verbunddesign (Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , Co-Gehaltsgradient  $0,5-1 \%/\text{mm}$ ) und eine Antioxidationsbeschichtung (wie  $\text{ZrO}_2$ , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Wärmewiderstand  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \pm 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) optimiert. Eine PVD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) wird häufig in australischen LNG-Projekten eingesetzt. Künftig kann sie verwendet werden, um die Wärmebeständigkeit auf  $250^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$  zu verbessern und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lebensdauer auf 8000 Stunden  $\pm$  500 Stunden zu verlängern.

### Das Spülwerkzeug aus Hartmetall mit

einer Wolframkarbid-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) weist eine Korrosionsbeständigkeit von 4500 Stunden (Spitze 5000 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) bei der Ölquellenreinigung auf und eignet sich besonders zum Entfernen von Ablagerungen an Bohrlochwänden (Ablagerungsdicke 2 mm  $\pm$  0,2 mm). Durch Oberflächenpolitur (Oberflächenrauheit Ra 0,2  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ , Prüfnorm ISO 4287) und verschleißfeste Beschichtung (z. B. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm$ 50) werden Reinigungsleistung (Reinigungsgeschwindigkeit 10 m/min $\pm$ 1 m/min) und Standzeit (Verschleißrate  $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) verbessert. Es wird häufig bei Bohrlocharbeiten in iranischen Ölfeldern eingesetzt. Zukünftig kann Laserauftragschweißen (Leistung 1,5 kW $\pm$ 0,2 kW) eingesetzt werden, um die Schneidkante (Schneidkantenradius  $<10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) zu optimieren und die Standzeit auf 5000 Stunden $\pm$ 500 Stunden zu verlängern.

### Kraft- und Kernenergieausrüstung aus Hartlegierungen

#### aus einer Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 8–12 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) für Turbinenschaufeln aus Hartmetall können hohen Temperaturen von 1300 °C (Wärmeleitfähigkeit 60 W/m $\cdot$ K  $\pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) in Gasturbinen standhalten und haben eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) und eine Effizienzsteigerung von 6 % (Effizienz der Stromerzeugung 40 %  $\pm 2$  %). Sie sind besonders für eine hocheffiziente Stromerzeugung geeignet (Drehzahl 3000 U/min  $\pm 100 \text{ U/min}$ ). Die Einkristallstruktur (Korngröße  $<0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$ , durch Röntgenbeugung verifiziert) und die Antioxidationsbeschichtung (wie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke 10  $\pm 1 \mu\text{m}$ , Wärmewiderstand 0,5 m<sup>2</sup>  $\cdot$  K/W  $\pm 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) verbessern die Wärmeermüdungsbeständigkeit (Wärmezyklus -50 °C bis 1300 °C, 1000-mal  $\pm 100$ -mal) erheblich. Sie wird häufig in Siemens-SGT-800-Gasturbinen verwendet, und die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\pm 1 \mu\text{m}$ ) auf 8000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden.

Wolframkarbid-Titan-Rohre (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) für Hartmetall-Wärmetauscherrohre halten den extremen Umgebungsbedingungen von 1600 °C in Kernreaktoren stand (Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), haben eine Wärmeleitfähigkeit von 110 W/m $\cdot$ K  $\pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), reduzieren den Wärmeverlust um 12 % (Wärmeverlust  $<5 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ ) und eignen sich besonders für Kühlsysteme (Kühlwasserdurchfluss 10 L/min $\pm 1 \text{ L/min}$ ). Durch die Mikrokanalstruktur (Kanaldurchmesser 1 mm  $\pm 0,1 \text{ mm}$ , Dichte 10/cm<sup>2</sup>  $\pm 1/\text{cm}^2$ ) und die Hochtemperaturbeschichtung (z. B. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit 1500 °C  $\pm 50$  °C) werden die Wärmeleitung (Wärmeaustauscheffizienz 90 %  $\pm 5$  %) und die

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit (Beständigkeit gegen 10 % HNO<sub>3</sub>, Gewichtsverlust < 0,03 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>) optimiert. Es wird häufig im Kernkraftwerk Flamanville in Frankreich eingesetzt. Zukünftig kann durch eine Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung 2 kW ± 0,2 kW) die Oberflächenrauheit (Ra < 0,2 μm ± 0,01 μm) optimiert und die Lebensdauer auf 10.000 Stunden ± 500 Stunden verlängert werden.

### Strahlenschutz

aus Hartmetall aus einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5 μm ± 0,1 μm, Dichte 14,9–15,3 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) in Kernkraftwerken kann einer Hochdosisstrahlung von 10<sup>7</sup> rad/h standhalten (Dämpfungsrate 99,9 % ± 0,1 %, Prüfnorm ASTM E666), elektronische Schäden um 35 % reduzieren (Schadensrate < 0,05 %/h ± 0,01 %/h) und hat eine Lebensdauer von 12.000 Stunden (Spitze 13.000 Stunden ± 1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), ist besonders für den Kernbereich des Reaktors geeignet (Dicke der Strahlenschutzabschirmung 50 mm ± 5 mm). Die Abschirmwirkung (Neutronenabsorptionsquerschnitt 100 barn ± 10 barn) wird durch eine mehrschichtige Verbundstruktur (z. B. WC-Ni- und B<sub>4</sub>C-Schicht, Dicke 10 mm ± 1 mm, B<sub>4</sub>C-Gehalt 10 % ± 1 %) und die Dotierung mit Anti-Strahlungselementen (z. B. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gehalt 0,5 % ± 0,1 %) deutlich verbessert. Diese Technologie wird häufig im chinesischen Kernkraftwerk Tianwan eingesetzt. Die Haltbarkeit kann zukünftig durch eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke 5 μm ± 1 μm) verbessert werden, wodurch die Lebensdauer auf 14.000 Stunden ± 1.000 Stunden verlängert wird.

### einer Wolframkarbid

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3 μm ± 0,2 μm, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) haben eine Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze 8500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) und eine Druckfestigkeit von 700 MPa (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min ± 0,1 mm/min) in Generatoren und sind besonders für den Hochgeschwindigkeitsbetrieb (Drehzahl 5000 U/min ± 100 U/min) geeignet. Durch Oberflächennitrieren (Nitriertiefe 0,2 mm ± 0,02 mm, Härte HV 2000 ± 50) und Plasmaspritzen (z. B. WC-15Co, Dicke 10 μm ± 1 μm, Haftung > 40 MPa) werden Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa ± 30 MPa) und Korrosionsbeständigkeit (5% NaCl-Gewichtsverlustbeständigkeit < 0,03 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>) verbessert. Wird häufig in GE 9HA-Gasturbinen verwendet. Zukünftig kann durch eine PVD-AlCrN-Beschichtung (Dicke 10 μm ± 1 μm) die Lebensdauer auf 9000 Stunden ± 500 Stunden verlängert werden.

### einer Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5 μm ± 0,1 μm, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) halten einem Druck von 600 bar in Hochdruckkesseln stand (Prüfnorm ISO 4126, Druckprüfzeit 10 Minuten ± 1 Minute), haben eine Lebensdauer von bis zu 6000 Stunden (Spitzenwert 6500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), reduzieren die Leckrate um 6 % (Leckage < 0,01 ml/min ± 0,001 ml/min), sind besonders geeignet für Dampfzirkulationssysteme (Dampftemperatur 300 °C ± 20 °C). Zuverlässigkeit und Haltbarkeit (Wärmezyklusbeständigkeit -50 °C bis 300 °C, 1000-mal ± 100-mal) werden durch ein mehrstufiges

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dichtungsdesign (Dichtflächenbreite  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , Kontaktdruck  $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) und eine hitzebeständige Beschichtung (z. B. CrN, Dicke  $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) optimiert. Wird häufig im chinesischen Kraftwerk Huaneng eingesetzt. Die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ) auf  $7000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### **einer Wolframkarbid**

-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12\text{--}15 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $14,9\text{--}15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) mit leitfähigen Kontakten aus Hartmetall sind beständig gegen Lichtbogenerosion (Lichtbogenenergie  $50 \text{ J} \pm 5 \text{ J}$ , Prüfnorm IEC 60947) in Hochspannungsschaltanlagen, mit einer Lebensdauer von  $7000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $7500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685) und einem Kontaktwiderstand von  $<0,008 \text{ }\Omega \pm 0,001 \text{ }\Omega$  (Prüfnorm ASTM B193), was sie besonders für die Energieverteilung (Spannung  $10 \text{ kV} \pm 1 \text{ kV}$ ) geeignet macht. Die vergoldete Oberfläche (Dicke  $0,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ , Leitfähigkeit  $10^8 \text{ S/m} \pm 10^7 \text{ S/m}$ ) und das federbelastete Design (Federkraft  $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ ) verbessern die Leitfähigkeit (Stromdichte  $100 \text{ A/cm}^2 \pm 10 \text{ A/cm}^2$ ) und die Haltbarkeit (Lichtbogenrosionstiefe  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ). Eine PVD-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -Beschichtung (Dicke  $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ) wird häufig in Hochspannungsschaltanlagen von ABB verwendet. Zukünftig kann sie zur Verbesserung der Hitzebeständigkeit und Verlängerung der Lebensdauer auf  $8000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verwendet werden.

### **Die Hartmetall-Wärmedämmschicht aus**

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6\text{--}10 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5 \text{ \%} \pm 0,5 \text{ \%}$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$  in einem Hochtemperaturofen stand (Wärmeleitfähigkeit  $50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), bei einer um  $30 \text{ \%}$  erhöhten Wärmeleitfähigkeit (Wärmewiderstand  $0,5 \text{ m}^2\cdot\text{K/W} \pm 0,05 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ), einer Lebensdauer von  $8000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) und ist besonders geeignet für Wärmebehandlungsanlagen (Temperatur  $2000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Durch die poröse Struktur (Porosität  $10 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ , Porengröße  $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) und eine Wärmedämmschicht (z. B.  $\text{HfO}_2$ , Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird die Thermoschockbeständigkeit (Temperaturzyklus  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) optimiert. Es wird häufig in GE-Hochtemperaturofen in den USA eingesetzt. Zukünftig kann die Porenstruktur durch Laseroberflächenbehandlung (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) optimiert werden, um die Lebensdauer auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

### **Korrosionsbeständige Beschichtung aus Wolframkarbid,**

einer Kobalt-Chrom-Legierung aus Wolframkarbid (WC- $12\text{Co}_4\text{Cr}$ , WC-Partikelgröße  $1\text{--}3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,2\text{--}15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ), hat einen Gewichtsverlust von  $<0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  in einem Seewasserkühlsystem (Prüfnorm ASTM G31, Einwirkzeit  $500 \text{ Stunden}$ ) und eine Lebensdauer von  $9000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $9500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), die sich besonders für Meeresenergiegeräte eignet (Salzgehalt  $3,5 \text{ \%} \pm 0,5 \text{ \%}$ ). Die Haltbarkeit (Korrosionsbeständigkeitszyklus  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) und die Korrosionsbeständigkeit

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Beständigkeit gegen 10 % NaCl-Gewichtsverlust  $<0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) werden durch selbstreparierende Beschichtungstechnologie (wie WC-Co mit  $\text{WS}_2$ , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Reibungskoeffizient  $0,1 \pm 0,02$ ) und Nanokompositbeschichtung (wie WC- TiC, Partikelgröße  $<100 \text{ nm}$ , Gehalt  $5 \% \pm 0,5 \%$ ) verbessert. Sie wird häufig auf dänischen Offshore-Windkraftplattformen verwendet und die Lebensdauer kann in Zukunft durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf 10.000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden.

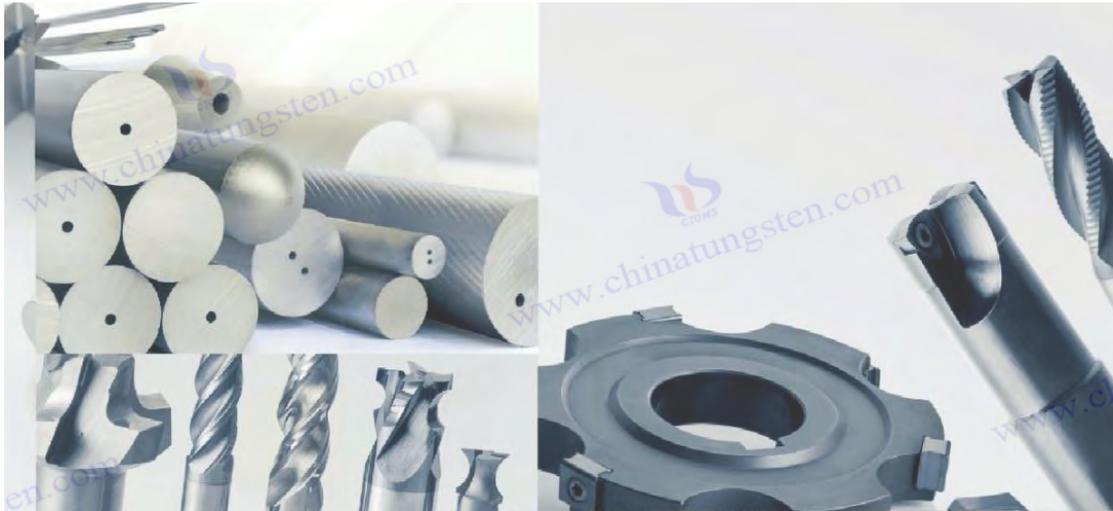
#### Die Hartmetall-Tragstruktur aus

Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12\%-15\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) weist eine Schwingfrequenz von 600 Hz (Prüfnorm ISO 10816, Schwingamplitude  $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) und eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitzenwert 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) in Windkraftanlagen auf und eignet sich besonders für Turmstützen (Höhe  $100 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ ). Das Wabendesign (Wabendichte  $5/\text{cm}^2 \pm 0,5/\text{cm}^2$ , Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), die Anti-Ermüdungsbeschichtung (z. B. WC-8Co, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm 50$ ) und die Mehrpunktlagerung (Anzahl der Auflagepunkte  $10 \pm 1$ ) verbessern die Stabilität und Haltbarkeit (Windgeschwindigkeit  $60 \text{ m/s} \pm 5 \text{ m/s}$ ) deutlich. Es wird häufig im deutschen Windpark Ende eingesetzt. Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD-TiN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $8000 \pm 500$  Stunden erhöht werden.

#### Kühlkörper aus Hartmetall Kühlkörper

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC-Gehalt  $5-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) verbessern die Wärmeableitungseffizienz in elektronischen Geräten um 25 % (Wärmeleitfähigkeit  $0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \pm 0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), haben eine Temperaturbeständigkeit von  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und sind besonders für Steuerungssysteme in Kernkraftwerken geeignet (Leistungsdichte  $10 \text{ W/cm}^2 \pm 1 \text{ W/cm}^2$ ). Durch die Mikrokanalstruktur (Kanaldurchmesser  $0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ , Dichte  $20/\text{cm}^2 \pm 2/\text{cm}^2$ ), die hochwärmeleitfähige Beschichtung (z. B. Ag, Dicke  $0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , Leitfähigkeit  $10^8 \text{ S/m} \pm 10^7 \text{ S/m}$ ) und das Design mit aufgerauter Oberfläche (Oberflächenrauheit  $\text{Ra } 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) wird die Wärmemanagementleistung optimiert (Temperaturabfall  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ). Dies wird häufig im Steuerungssystem des Kernkraftwerks Fukushima in Japan verwendet. Zukünftig kann der Mikrokanal durch Laserauftragschweißen (Leistung  $1,5 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) optimiert werden, um die Lebensdauer auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Hartmetallkomponenten für Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien

### Die Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) von Windrotorblättern aus Hartmetall kann extremen Windgeschwindigkeiten von 60 m/s in Windkraftanlagen standhalten (Prüfnorm IEC 61400, Winddruck 100 Pa  $\pm$  10 Pa), mit einer Lebensdauer von 18.000 Stunden (Spitzenwert 19.000 Stunden  $\pm$  1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und einer um 12 % reduzierten Verschleißrate (Verschleißtiefe < 0,02 mm  $\pm$  0,005 mm), was sie besonders für Offshore-Windparks (50 km  $\pm$  5 km vor der Küste) geeignet macht. Durch Oberflächenhärtung (z. B. HVOF WC-Co, Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm$ 50) und Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Salzsprühnebelbeständigkeit 1000  $\pm$ 100 Std.) werden Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa $\pm$ 30 MPa) und Haltbarkeit (Gewichtsverlust durch Seewasserkorrosion < 0,05 mg/cm<sup>2</sup>  $\pm$  0,01 mg/cm<sup>2</sup>) verbessert. Es wird häufig im Windpark Hornsea in Großbritannien eingesetzt. Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD- AlTiN- Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ ) auf 20.000  $\pm$ 1000 Std. verlängert werden .

### aus Wolframkarbid-

Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, TiC- Gehalt 2–5 %  $\pm$  0,5 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) für Turbinenschaufeln aus Hartmetall halten der Wasserströmungserosion in Wasserkraftwerken stand (Fließgeschwindigkeit 10 m/s  $\pm$  1 m/s, Wasserdruck 50 bar  $\pm$  5 bar), haben eine Lebensdauer von 12.000 h (Spitzenwert 13.000 h  $\pm$  1.000 h, Prüfnorm ASTM E9) und eine Effizienzsteigerung von 10 % (Stromerzeugungseffizienz 90 %  $\pm$  5 %), was sie besonders für Hochdruckkraftwerke (Fallhöhe 100 m  $\pm$  10 m) geeignet macht. Die hydrodynamische Leistung (Widerstandskoeffizient 0,01  $\pm$  0,001) wird durch stromlinienförmiges Design (Krümmungsradius 5 mm  $\pm$  0,5 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,2  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,01  $\mu\text{m}$ ) , verschleißfeste Beschichtung (z. B. TiCN , Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2500  $\pm$  100) und Oberflächenpolitur (Poliergeschwindigkeit 50 m/min  $\pm$  5 m/min) optimiert. Das Verfahren wird häufig im chinesischen Drei-Schluchten-Wasserkraftwerk eingesetzt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zukünftig kann die Oberfläche durch Laserbehandlung (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) optimiert werden, um die Lebensdauer auf  $14.000 \text{ Stunden} \pm 1000 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

#### **Die Wolframkarbid-**

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) der Hartmetall-Solarhalterung ist in Wüstenumgebungen korrosionsbeständig (Salzsprühbeständigkeit  $1000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$ , Gewichtsverlust  $<0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ), hat eine Lebensdauer von  $22.000 \text{ h}$  (Spitzenwert  $23.000 \text{ h} \pm 1000 \text{ h}$ , Prüfnorm ASTM E9), reduziert die Wartungskosten um  $6 \%$  (Wartungszyklus  $18 \text{ Monate} \pm 1 \text{ Monat}$ ) und eignet sich besonders für Photovoltaik-Kraftwerke (Sonnenscheinintensität  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 100 \text{ W/m}^2$ ). Haltbarkeit (Windgeschwindigkeitsbeständigkeit  $40 \text{ m/s} \pm 5 \text{ m/s}$ ) und strukturelle Stabilität (Druckfestigkeit  $1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ ) werden durch eine UV-Schutzbeschichtung (z. B.  $\text{TiO}_2$ , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , UV-Beständigkeit  $5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ ) und eine mehrschichtige Verbundstruktur (Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , Ni-Gehaltsgradient  $0,5 \% - 1 \%/ \text{mm}$ ) verbessert. Wird häufig im Noor-Solarprojekt in den VAE verwendet, kann die Lebensdauer durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $25.000 \text{ Stunden} \pm 1000 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

#### **Die Wolframkarbid-Verschleißplatte aus**

einer Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) ist beständig gegen Meerwasserkorrosion bei der Gezeitenkraftzeugung (Salzbeständigkeit  $3,5 \% \pm 0,5 \%$ , Gewichtsverlust  $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ), mit einer Lebensdauer von  $9000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $9500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) und reduziert die Verschleißrate um  $18 \%$  (Verschleißtiefe  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ), besonders geeignet für Meeresgebiete mit großem Tidenhub (Tidenhub  $5 \text{ m} \pm 0,5 \text{ m}$ ). Die Schlagzähigkeit (Schlagenergie  $100 \text{ J/cm}^2 \pm 10 \text{ J/cm}^2$ ) wird durch Verbundwerkstoffe (wie WC-Co- und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht, Dicke  $5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ ) und Oberflächenmodifizierung (Tiefe der Härteschicht  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ) verbessert. Es wird häufig in koreanischen Gezeitenkraftwerken eingesetzt und die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $10.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

#### **Die**

Welle der Hartmetall-Getriebewelle aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hat eine Torsionsfestigkeit von  $2200 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8, Drehmoment  $500 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 50 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) und eine Lebensdauer von  $8000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685) bei der Windkraftzeugung und eignet sich besonders für Getriebe (Drehzahl  $3000 \text{ U/min} \pm 100 \text{ U/min}$ ). Zuverlässigkeit und Haltbarkeit (Schwingungsamplitude  $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ ) werden durch Wärmebehandlung (z. B. Aufkohlen, Aufkohlungstiefe  $0,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ ) und Anti-Ermüdungsbeschichtung (Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Ermüdungslebensdauer  $>10^6$  Zyklen) verbessert. Weit verbreitet in Vestas- Windkraftanlagen in Dänemark, kann die Lebensdauer zukünftig durch eine PVD-AlCrN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

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

### **Dichtungen aus Wolframkarbid-**

Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 % , TiC- Gehalt 2–5 %  $\pm$  0,5 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) halten einem Druck von 350 bar in Turbinen stand (Prüfnorm ISO 4126, Druckprüfzeit 10 Minuten  $\pm$  1 Minute), haben eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und sind besonders für Umgebungen mit hohem Wasserdurchfluss geeignet (Wasserdurchflussrate 10  $\text{m}/\text{s}$   $\pm$  1  $\text{m}/\text{s}$ ). Die Dichtwirkung wird durch ein mehrstufiges Dichtungsdesign (Breite der Dichtfläche 2  $\text{mm}$   $\pm$  0,2  $\text{mm}$ , Kontaktdruck 50 MPa  $\pm$  5 MPa) und eine korrosionsbeständige Beschichtung (Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$  , Salzsprühbeständigkeit 1000 Stunden  $\pm$  100 Stunden) optimiert (Leckrate  $<0,005$   $\text{ml}/\text{min}$   $\pm$  0,001  $\text{ml}/\text{min}$ ). Es wird häufig in Wasserkraftwerken in den Schweizer Alpen eingesetzt und die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD- TiN- Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$  ) auf 8000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert werden .

### **einer Wolframkarbid-**

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) haben eine Schwingfrequenz von 700 Hz in Windkraftanlagen (Prüfnorm ISO 10816, Schwingamplitude  $<0,03$   $\text{mm}$   $\pm$  0,005  $\text{mm}$ ), eine Lebensdauer von 6000 h (Spitze 6500 h  $\pm$  500 h, Prüfnorm ASTM E9) und sind besonders für Türme mit größeren Schwingungen (Höhe 100  $\text{m}$   $\pm$  10  $\text{m}$ ) geeignet. Durch das Dämpfungsdesign (Dämpfungskoeffizient 0,2  $\pm$  0,02, Prüfnorm ASTM E756) und die Oberflächenverstärkung (Härtungsschichttiefe 0,3  $\text{mm}$   $\pm$  0,03  $\text{mm}$ , Härte HV 2000  $\pm$  50) werden die Energieableitung (Energieabsorptionsrate 80 %  $\pm$  5 %) und die Haltbarkeit (Windgeschwindigkeitsbeständigkeit 60  $\text{m}/\text{s}$   $\pm$  5  $\text{m}/\text{s}$ ) verbessert. Es wird häufig im spanischen Windpark Iberdrola eingesetzt. Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$  ) auf 7000  $\pm$  500 Stunden verlängert werden .

### **einer Wolframkarbid**

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,2  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,2–15,6  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) haben eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) in Wasserkraftwerken, wodurch die Wartungshäufigkeit um 12 % reduziert wird (Wartungszyklus 12 Monate  $\pm$  1 Monat) und sie eignen sich besonders zur Wasserströmungsführung (Wasserdurchflussrate 10  $\text{m}/\text{s}$   $\pm$  1  $\text{m}/\text{s}$ ). Durch eine Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. TiCN , Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$  , Salzsprühbeständigkeit 1000 Stunden  $\pm$  100 Stunden) und eine Optimierung der Mikrostruktur (Korngröße 0,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,05  $\mu\text{m}$  , Überprüfung durch Röntgenbeugung) werden Stabilität und Haltbarkeit verbessert (Verschleißrate  $<0,02$   $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$   $\pm$  0,005  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) . Weit verbreitet im kanadischen Wasserkraftwerk Laval, kann die Lebensdauer zukünftig durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ ) auf 10.000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert werden .

### **aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung**

(WC-Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$  , Dichte 15,0–

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) haben eine Zugfestigkeit von 1600 MPa (Prüfnorm ASTM E8, Dehnung < 1 %) und eine Lebensdauer von 12.000 h (Spitze 13.000 h ± 1.000 h, Prüfnorm ASTM E9) in Solar-Nachführsystemen und eignen sich besonders für dynamische Verstellmechanismen (Verstellwinkel ± 45° ± 5°). Die Haltbarkeit (Windgeschwindigkeitsbeständigkeit 40 m/s ± 5 m/s) wird durch Beschichtungsschutz (z. B. Ni-Cr, Dicke 5 µm ± 1 µm, starke Korrosionsbeständigkeit) und Ermüdungsschutzdesign (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa ± 30 MPa) verbessert. Die im Mojave-Solarprojekt in den USA weit verbreitete Verwendung kann durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm) zukünftig auf 14.000 Stunden ± 1.000 Stunden verlängert werden.

### Hartmetall-Staubschutzkappen

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) werden in Windkraftanlagen verwendet, um Wind- und Sanderosion (Windgeschwindigkeit 60 m/s ± 5 m/s, Sandkonzentration 5 g/m<sup>3</sup> ± 0,5 g/m<sup>3</sup>) zu widerstehen. Sie haben eine Lebensdauer von 8.000 h (Spitze 8.500 h ± 500 h, Prüfnorm ASTM E9) und eignen sich besonders für Windparks in Wüsten (Temperatur 50 °C ± 5 °C). Durch eine Mehrlagenbeschichtung (z. B. TiO<sub>2</sub>, Dicke 5 µm ± 1 µm, UV-Beständigkeit 5000 Std. ± 500 Std.) und Oberflächenhärtung (Härtungsschichttiefe 0,3 mm ± 0,03 mm, Härte HV 2000 ± 50) werden Verschleißfestigkeit (Verschleißrate < 0,02 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,005 mm<sup>3</sup>/N·m) und Haltbarkeit (Thermozyklusbeständigkeit -50°C bis 50°C, 1000-mal ± 100-mal) verbessert. Weit verbreitet in Windparks in Saudi-Arabien, kann die Lebensdauer zukünftig durch eine PVD- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm) auf 9000 Std. ± 500 Std. verlängert werden.



### Hartmetallteile für Bergbau- und Kohleausrüstung

#### einer Wolframkarbid

-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) haben eine Schlagfestigkeit von 2200 J/cm<sup>2</sup> (Prüfnorm ASTM

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E23, Schlagenergie  $100 \text{ J} \pm 10 \text{ J}$ ) im Bergwerksbau, eine Lebensdauer von 6000 Stunden (Spitze 6500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und eine um 22 % reduzierte Verschleißrate (Verschleißtiefe  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ) und sind besonders zum Brechen von hartem Gestein geeignet (Härte HV  $800 \pm 50$ ). Durch Wärmebehandlung (Abschrecken  $1200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , Halten für 1 Stunde) und eine verschleißfeste Beschichtung (wie WC-15Co, Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) wird die Ermüdungsbeständigkeit verbessert (Ermüdungslebensdauer  $> 10^5$  Zyklen, Prüfnorm ASTM E466). Weit verbreitet im australischen Eisenerzbergbau (Zerkleinerungspartikelgröße  $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , Effizienzsteigerung  $15 \% \pm 2 \%$ ), kann in Zukunft eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) verwendet werden, um die Lebensdauer auf 7000 Stunden  $\pm 500$  Stunden zu verlängern und die Verschleißrate auf  $0,015 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$  zu senken.

### Die Schnittgeschwindigkeit des Hartmetall-Schneidkopfes aus

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , TiC- Gehalt  $2-5 \% \pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) kann im Kohlebergbau  $180 \text{ m/min}$  (Spitzenwert  $200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ ) erreichen, und die Lebensdauer kann  $4500 \text{ h}$  (Spitzenwert  $5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , Prüfnorm ISO 3685) erreichen, und die Effizienz wird um 18 % verbessert (Schneideffizienz  $90 \% \pm 5 \%$ ), was besonders für dicke Kohleflöze geeignet ist (Kohleflözdicke  $2 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$ ). Durch Nanoverstärkung (Nano-WC-Gehalt  $5 \% \pm 0,5 \%$ , Partikelgröße  $< 100 \text{ nm}$ ) und Oberflächenmodifizierung (Tiefe der Härteschicht  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ) wird die Verschleißfestigkeit optimiert (Verschleißrate  $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65). Es wird häufig in den Shanxi-Kohlefeldern in China eingesetzt (Schnitttiefe  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , Leistungssteigerung  $10 \% \pm 1 \%$ ). Zukünftig kann durch Laserauftragschweißen (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ , Scangeschwindigkeit  $500 \text{ mm/min} \pm 50 \text{ mm/min}$ ) die Lebensdauer auf 5000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert und die Effizienz auf  $20 \% \pm 2 \%$  gesteigert werden.

### aus Wolframkarbid-

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und eine Druckfestigkeit von 1600 MPa (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ) beim Bohren in hartem Gestein und sind besonders für tiefe Lagerstätten (Tiefe  $2000 \text{ m} \pm 200 \text{ m}$ ) geeignet. Die Haltbarkeit wird durch Plasmaspritzen (z. B. WC-15Co, Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ , Abreißversuch ASTM D4541) und eine Korrosionsschutzbeschichtung ( $5 \% \text{ NaCl}$ -Gewichtsverlustbeständigkeit  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) verbessert (Aufprallenergie  $100 \text{ J/cm}^2 \pm 10 \text{ J/cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E23). Es wird häufig in chilenischen Kupferminen verwendet (Bohrdurchmesser  $150 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ , Effizienzsteigerung  $12 \% \pm 1 \%$ ). Durch eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2200 \pm 100$ ) kann zukünftig die Lebensdauer auf  $8000 \text{ Std.} \pm 500 \text{ Std.}$  verlängert und die Druckfestigkeit auf  $1800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  erhöht werden.

### aus einer Wolframkarbid

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze 8500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685) in der Mineralaufbereitung, reduzieren die Wartungskosten um 12 % (Wartungszyklus 12 Monate  $\pm 1$  Monat) und eignen sich besonders für Erze mit hoher Härte (Härte HV  $1000 \pm 50$ ). Durch die graduelle Werkstoffgestaltung (Co-Gehaltsgradient  $0,5-1 \text{ %/mm}$ , Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) und Oberflächenhärtung (Tiefe der Härteschicht  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) wird die Druckfestigkeit verbessert (Druckfestigkeit  $1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E9). Weit verbreitet in südafrikanischen Goldminen (Verarbeitungskapazität  $500 \text{ t/h} \pm 50 \text{ t/h}$ ). Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD- TiN- Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) auf  $9000 \text{ Std.} \pm 500 \text{ Std.}$  verlängert und die Wartungskosten auf  $10 \text{ %} \pm 1 \text{ %}$  gesenkt werden.

#### Die Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \text{ %} \pm 1 \text{ %}$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) der Hartmetall-Löffelzähne hat eine Lebensdauer von 6000 h (Spitze  $6500 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , Prüfnorm ASTM E9) in Baggern und eine um 35 % verbesserte Schlagfestigkeit (Schlagenergie  $100 \text{ J/cm}^2 \pm 10 \text{ J/cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E23), was sie besonders für den Bergbau geeignet macht (Grabtiefe  $5 \text{ m} \pm 0,5 \text{ m}$ ). Die Haltbarkeit wird durch Verbundstrukturen (wie WC-Co- und SiC-Schichten, Dicke  $5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ) und korrosionsbeständige Beschichtungen ( $5 \text{ % NaCl}$ -Gewichtsverlustbeständigkeit  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) optimiert (Verschleißrate  $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65). Weit verbreitet im australischen Eisenerzabbau (Steigerung der Abbaueffizienz um  $15 \text{ %} \pm 2 \text{ %}$ ), zukünftig kann durch eine PVD- AlTiN- Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) die Lebensdauer auf  $7000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert und die Schlagfestigkeit auf  $40 \text{ %} \pm 2 \text{ %}$  erhöht werden.

#### Die Hartmetallsiebplatte

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt  $5-10 \text{ %} \pm 1 \text{ %}$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hat eine Lebensdauer von 7000 h (Spitze  $7500 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , Prüfnorm ISO 3685) bei der Siebung, eine Porenengenauigkeit von  $\pm 0,008 \text{ mm}$  (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung  $0,001 \text{ mm}$ ) und ist besonders für die Feinsiebung (Maschenweite  $0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ) geeignet. Die Siebleistung (Siebdurchsatz  $95 \text{ %} \pm 5 \text{ %}$ ) wird durch Mehrschichtaufbau (Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , TiC- Gehaltsgradient  $0,5 \text{ %} - 1 \text{ %/mm}$ ) und Korrosionsschutzbeschichtung (wie  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Salzsprühbeständigkeit  $1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$ ) verbessert. Weit verbreitet in brasilianischem Bauxit (Siebpartikelgröße  $0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ , Leistungsverbesserung  $10 \text{ %} \pm 1 \text{ %}$ ), in Zukunft kann die Lebensdauer durch PVD-  $\text{ZrO}_2$ -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) auf  $8000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert und die Genauigkeit auf  $\pm 0,006 \text{ mm}$  verbessert werden.

#### einer Wolframkarbid-

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \text{ %} \pm 1 \text{ %}$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hat eine Schnitttiefe von  $6 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  in Kohleflözen und eine Lebensdauer von  $4500 \text{ Stunden}$  (Spitze  $5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685) und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ist besonders für den Abbau dünner Kohleflöze (Flözdicke  $1\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ ) geeignet. Die Schneidleistung (Schnittgeschwindigkeit  $150\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ ) wird durch Oberflächenpolieren (Oberflächenrauheit  $Ra\ 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ , Prüfnorm ISO 4287) und verschleißfeste Beschichtung (wie TiCN, Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) verbessert. Es wird häufig im chinesischen Shanxi-Kohlefeld eingesetzt (Schnittleistung um  $12\% \pm 1\%$  gesteigert). In Zukunft kann durch Laserauftragschweißen (Leistung  $1,5\text{ kW} \pm 0,2\text{ kW}$ , Scangeschwindigkeit  $400\text{ mm/min} \pm 50\text{ mm/min}$ ) die Lebensdauer auf  $5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  verlängert werden, und die Schnitttiefe kann  $7\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$  erreichen.

### Schlagblöcke aus Wolframkarbid

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6\text{--}10\% \pm 1\%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) in Brechern können Stößen von  $1600\text{ J/cm}^2$  standhalten (Prüfnorm ASTM E23, Schlagenergie  $100\text{ J} \pm 10\text{ J}$ ), haben eine Lebensdauer von  $6000\text{ Stunden}$  (Spitze  $6500\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) und sind besonders zum Zerkleinern von Erzen geeignet (Erzhärte HV  $1000 \pm 50$ ). Die Haltbarkeit wird durch Wärmebehandlung (Abschrecken  $1200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ , Halten für 1 Stunde) und eine Anti-Ermüdungsbeschichtung (Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Ermüdungslebensdauer  $> 10^5$  Zyklen, Teststandard ASTM E466) verbessert (Verschleißrate  $< 0,02\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ). Wird häufig in chilenischen Kupferminen verwendet (Zerkleinerungseffizienz um  $10\% \pm 1\%$  erhöht), und in Zukunft kann durch eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke  $10\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Härte HV  $2200 \pm 100$ ) die Lebensdauer auf  $7000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  verlängert und die Schlagfestigkeit auf  $1800\text{ J/cm}^2 \pm 50\text{ J/cm}^2$  erhöht werden.

### Förderrollen aus Wolframkarbid

aus einer Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1\text{--}3\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2\text{--}15,6\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) haben in Bandförderern eine Lebensdauer von  $9000\text{ Stunden}$  (Spitze  $9500\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685), wodurch die Wartungshäufigkeit um  $18\%$  reduziert wird (Wartungszyklus  $12\text{ Monate} \pm 1\text{ Monat}$ ) und eignen sich besonders für den Transport schwerer Lasten (Last  $500\text{ kg} \pm 50\text{ kg}$ ). Korrosionsschutzbeschichtungen (wie TiCN, Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Salzsprühbeständigkeit  $1000\text{ Stunden} \pm 100\text{ Stunden}$ ) und Oberflächenverstärkung (Härtungsschichttiefe  $0,3\text{ mm} \pm 0,03\text{ mm}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) verbessern die Stabilität (Schwingungsamplitude  $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ , Prüfnorm ISO 10816). Weit verbreitet in südafrikanischen Goldminen (Steigerung der Transporteffizienz um  $15\% \pm 2\%$ ), kann in Zukunft eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke  $10\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ) verwendet werden, um die Lebensdauer auf  $10.000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  zu verlängern und die Wartungshäufigkeit auf  $15\% \pm 1\%$  zu reduzieren.

### Hartmetall-Bohrerhülse

aus Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12\text{--}15\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9\text{--}15,3\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ). Die Hülse hat eine Lebensdauer von  $7000\text{ Stunden}$  (Spitze  $7500\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) beim Bohren, ist stark korrosionsbeständig (Gewichtsverlust von  $10\% \text{ NaCl} < 0,03\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ ), besonders

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

geeignet für wasserführende Formationen (Wassergehalt  $20\% \pm 2\%$ ). Die Schlagzähigkeit (Schlagenergie  $100 \text{ J/cm}^2 \pm 10 \text{ J/cm}^2$ , Prüfnorm ASTM E23) wird durch Verbundwerkstoffe (z. B. WC-Ni- und SiC-Schichten, Dicke  $5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ ) und Oberflächenmodifizierung (Härteschichttiefe  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ) verbessert. Weit verbreitet in kanadischen Ölsandminen (Bohrtiefe  $1000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ , Effizienzsteigerung  $10\% \pm 1\%$ ). Zukünftig kann die Lebensdauer durch PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) auf  $8000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert und die Korrosionsbeständigkeit auf  $< 0,02 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,005 \text{ mg/cm}^2$  verbessert werden.

### **Führungsstreifen (Führungsplatte) für Förderbänder aus Wolframkarbid,**

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ , Co-Gehalt  $12\% \pm 1\%$ , Cr-Gehalt  $4\% \pm 0,5\%$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Der Führungsstreifen hat eine Lebensdauer von  $8000 \text{ Stunden}$  im Förderbandsystem (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685) und eine Schlagfestigkeit von  $1200 \text{ J/cm}^2$  (Prüfnorm ASTM E23, Schlagenergie  $80 \text{ J} \pm 10 \text{ J}$ ), wodurch er sich besonders für den Transport von Materialien mit hohen Lasten eignet (Last  $600 \text{ kg} \pm 50 \text{ kg}$ , Geschwindigkeit  $2 \text{ m/s} \pm 0,2 \text{ m/s}$ ). Durch Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit  $>1300 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ , Leistung  $40 \text{ kW} \pm 2 \text{ kW}$ , Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Haftung  $>50 \text{ MPa}$ ) und Oberflächenhärtung (Härtungsschichttiefe  $0,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) werden Haltbarkeit (Verschleißrate  $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und Korrosionsbeständigkeit (5% NaCl-Gewichtsverlustbeständigkeit  $<0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) optimiert. Weit verbreitet in Australiens Eisenerz-Förderbändern (Transportdistanz  $5 \text{ km} \pm 0,5 \text{ km}$ , Effizienzverbesserung  $12\% \pm 1\%$ ). Durch eine PVD-CrN-Beschichtung (Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Härte HV  $2200 \pm 100$ ) kann die Lebensdauer zukünftig auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  erhöht und die Schlagzähigkeit auf  $1400 \text{ J/cm}^2 \pm 50 \text{ J/cm}^2$  verbessert werden.

### **Kobalt-Titan - Sandherstellungsstreifen**

(WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6-10\% \pm 1\%$ , TiC-Gehalt  $5-10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Schnittgeschwindigkeit von  $200 \text{ m/min}$  (Spitze  $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $0,15 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ ) in der Sandherstellungsmaschine und eine Lebensdauer von  $5000 \text{ h}$  (Spitze  $5500 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ , Prüfnorm ISO 3685), die sich besonders für Sand und Kies mit hoher Härte (Härte HV  $900 \pm 50$ ) eignet. Durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Wärmekonservierung für  $2-4 \text{ Stunden}$ ) und eine verschleißfeste Beschichtung (z. B. TiAlN, Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) werden die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate  $<0,025 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer  $> 10^5$  Zyklen, Prüfnorm ASTM E466) verbessert. Es wird häufig in Sandproduktionslinien eingesetzt (Produktionsleistung  $500 \text{ Tonnen/Stunde} \pm 50 \text{ Tonnen/Stunde}$ , Effizienzsteigerung  $15\% \pm 2\%$ ). Durch Laser-Oberflächenumschmelzen (Leistung  $2,5 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ , Kornverfeinerung auf  $0,2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ ) kann zukünftig die Standzeit auf  $6000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert und die Schneidleistung auf  $18\% \pm 2\%$  verbessert werden.

### **Die Wolframkarbid-**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 8–12 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2,0  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) der Hartmetall-Knopfzähne hat eine Lebensdauer von 6500 Stunden (Spitze 7000 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und eine Schlagfestigkeit von 1500  $\text{J}/\text{cm}^2$  (Prüfnorm ASTM E23, Schlagenergie 90 J  $\pm$  10 J) in Kohlebergwerk-Bohranlagen und ist besonders für die Bohrung tiefer Kohleflöze (Tiefe 1500 m  $\pm$  150 m) geeignet. Durch Plasmaspritzen (z. B. WC-10Co4Cr, Dicke 15  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Haftung  $>$ 60 MPa, Abreißversuch ASTM D4541) und Oberflächenverfestigung (Härtungsschichttiefe 0,25 mm  $\pm$  0,02 mm, Härte HV 2200  $\pm$  50) werden die Haltbarkeit (Verschleißrate  $<$ 0,02  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$   $\pm$  0,005  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und die Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlustbeständigkeit 10 % NaCl  $<$ 0,03  $\text{mg}/\text{cm}^2$   $\pm$  0,01  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) verbessert. Weit verbreitet im Kohleflözgasabbau in Shanxi, China (Bohrdurchmesser 120 mm  $\pm$  10 mm, Effizienzsteigerung 10 %  $\pm$  1 %). Durch eine PVD- TiCN- Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2500  $\pm$  100) kann die Lebensdauer zukünftig auf 7500 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert und die Schlagzähigkeit auf 1700  $\text{J}/\text{cm}^2$   $\pm$  50  $\text{J}/\text{cm}^2$  verbessert werden.

#### aus Wolframkarbid-

Kobalt-Titankarbid (WC-Co- TiC, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, TiC- Gehalt 3–6 %  $\pm$  0,5 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) haben eine Schnittgeschwindigkeit von 160 m/min (Spitze 180 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,12 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U) und eine Lebensdauer von 5000 h (Spitze 5500 h  $\pm$  500 h, Prüfnorm ISO 3685) in Kohlebergbaumaschinen und sind besonders für dicke Kohleflöze geeignet (Flözdicke 2,5 m  $\pm$  0,2 m). Durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350°C  $\pm$  20°C, 180 MPa  $\pm$  10 MPa, Haltetemperatur für 2 Stunden) und eine verschleißfeste Beschichtung (z. B. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Dicke 8  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm$  50) werden die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate  $<$ 0,025  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$   $\pm$  0,005  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer  $>$ 10<sup>5</sup> Zyklen, Prüfnorm ASTM E466) verbessert. Es wird häufig im Kohlerevier Queensland in Australien eingesetzt (Schnitttiefe 12 mm  $\pm$  1 mm, Produktionssteigerung 12 %  $\pm$  1 %). Zukünftig kann durch Laserauftragschweißen (Leistung 2 kW  $\pm$  0,2 kW, Scangeschwindigkeit 600 mm/min  $\pm$  50 mm/min) die Lebensdauer auf 6000 Stunden  $\pm$  500 Stunden verlängert und die Schneideffizienz auf 15 %  $\pm$  2 % gesteigert werden.

#### Die Wolframkarbid

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–14 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3$   $\pm$  0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) für Meißelzähne von Kohlebergbaumaschinen aus Hartmetall hat eine Lebensdauer von 5500 Stunden (Spitze 6000 Stunden  $\pm$  500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und eine Schlagzähigkeit von 1300  $\text{J}/\text{cm}^2$  (Prüfnorm ASTM E23, Schlagenergie 80 J  $\pm$  10 J), die sich besonders für komplexe Kohleflöze eignet (Härte HV 600  $\pm$  50). Durch Oberflächenpolitur (Oberflächenrauheit Ra 0,25  $\mu\text{m}$   $\pm$  0,01  $\mu\text{m}$ , Prüfnorm ISO 4287) und Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. TiAlN, Dicke 5  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ , Härte HV 2300  $\pm$  100) werden die Schneidleistung (Schnittgeschwindigkeit 140 m/min  $\pm$  10 m/min) und die Haltbarkeit (Verschleißrate  $<$ 0,03  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$   $\pm$  0,01  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) verbessert. Es wird häufig in Kohlebergwerken in West Virginia, USA, eingesetzt (Schnitttiefe 10 mm  $\pm$  1 mm, Leistungssteigerung 10 %  $\pm$  1 %). Durch eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m}$   $\pm$  1  $\mu\text{m}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte HV 2200 ± 100) kann die Lebensdauer zukünftig auf 6500 Std. ± 500 Std. erhöht und die Schlagzähigkeit auf 1500 J/cm<sup>2</sup> ± 50 J/cm<sup>2</sup> verbessert werden .

#### **einer Wolframkarbid-**

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–2 µm ± 0,2 µm, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) haben eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) und eine Druckfestigkeit von 1800 MPa (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min ± 0,1 mm/min) in Tunnelvortriebsmaschinen für Kohlebergwerke und eignen sich besonders für harte Kohleflöze (Härte HV 800 ± 50). Durch Gradientenmaterialdesign (Co-Gehaltsgradient 0,5 % – 1 %/mm, Dicke 12 mm ± 1 mm) und Plasmaspritzen (Spritzgeschwindigkeit > 1200 m/s ± 50 m/s, Dicke 10 µm ± 1 µm , Haftung > 50 MPa) werden Verschleißfestigkeit (Verschleißrate < 0,02 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,005 mm<sup>3</sup>/N·m, Prüfnorm ASTM G65) und Stabilität optimiert. Es wird häufig beim Kohleflözabbau in der Inneren Mongolei, China, eingesetzt (Aushubgeschwindigkeit 5 m/h ± 0,5 m/h, Effizienzsteigerung von 12 % ± 1 %). Durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm , Temperaturbeständigkeit 1300°C ± 20°C) kann die Lebensdauer zukünftig auf 8000 h ± 500 h verlängert und die Druckfestigkeit auf 2000 MPa ± 50 MPa erhöht werden.

#### **Der Hammerkopf des Hartmetallbrechers aus Wolframkarbid**

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 8–12 % ± 1 % , TiC- Gehalt 4–8 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,5–2,0 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0–15,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) hat eine Schlagfestigkeit von 2000 J/cm<sup>2</sup> (Prüfnorm ASTM E23, Schlagenergie 100 J ± 10 J) und eine Lebensdauer von 6000 Stunden (Spitze 6500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und ist besonders zum Brechen von Kohlengrus geeignet (Härte HV 700±50). Durch Wärmebehandlung (Abschrecken 1250 °C ± 20 °C, Halten 1,5 Stunden) und eine verschleißfeste Beschichtung (wie WC-10Co4Cr, Dicke 12 µm ± 1 µm, Härte HV 2100 ± 50) wird die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>5</sup> Zyklen, Prüfnorm ASTM E466) verbessert. Weit verbreitet in der indischen Koks-kohlezerkleinerung (Verarbeitungskapazität 400 Tonnen/Stunde ± 50 Tonnen/Stunde, Effizienzsteigerung 10 % ± 1 %), kann in Zukunft eine PVD- TiN- Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm, Härte HV 2000 ± 50) verwendet werden, um die Lebensdauer auf 7000 Stunden ± 500 Stunden zu verlängern und die Schlagfestigkeit auf 2200 J/cm<sup>2</sup> ± 50 J/cm<sup>2</sup> zu verbessern .

#### **einer Nickel-Chrom- Legierung**

(WC-Ni-Cr, Ni-Gehalt 10–15 % ± 1 % , Cr-Gehalt 4 % ± 0,5 % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) haben eine Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze 8500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) und eine Zugfestigkeit von 1200 MPa (Prüfnorm ASTM E8, Belastungsgeschwindigkeit 2 mm/min ± 0,2 mm/min) in Kettenrädern von Kratzförderern in Kohlebergwerken und sind besonders für den Transport hoher Lasten geeignet (Last 800 kg ± 50 kg, Geschwindigkeit 1,5 m/s ± 0,2 m/s). Durch Plasmaspritzen (z. B. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> - NiCr, Dicke 10 µm±1 µm, Haftung > 50 MPa) und Oberflächenverfestigung (Tiefe der Härteschicht 0,3 mm±0,03 mm, Härte HV 2000±50) werden Haltbarkeit und Korrosionsbeständigkeit

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

(Gewichtsverlustbeständigkeit bei 5 % NaCl  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) verbessert. Es wird häufig im russischen Kusbass- Kohlefeld eingesetzt (Transportdistanz  $3 \text{ km} \pm 0,3 \text{ km}$ , Effizienzsteigerung  $12 \% \pm 1 \%$ ). Durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ) kann zukünftig die Lebensdauer auf  $9000 \text{ Std.} \pm 500 \text{ Std.}$  verlängert und die Zugfestigkeit auf  $1400 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  erhöht werden.



### Hartmetallteile für Chemikalien- und Umweltschutzausrüstung

#### Die Auskleidung eines Hartmetallreaktors aus

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält Säurekorrosion bei chemischen Reaktionen bis  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  stand (Gewichtsverlust durch  $20 \% \text{ H}_2\text{SO}_4 < 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden), hat eine Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), reduziert die Erosionsrate um  $12 \%$  (Erosionstiefe  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), ist besonders geeignet für stark saure Umgebungen (Säurekonzentration  $20 \% \pm 2 \%$ ). Durch den Mehrschichtaufbau (Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , Co-Gehaltsgradient  $0,5-1 \%/ \text{mm}$ ) und die Korrosionsschutzbeschichtung (z. B.  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , hohe Korrosionsbeständigkeit) werden die Haltbarkeit und die chemische Korrosionsbeständigkeit (Wärmezyklusbeständigkeit  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{-fach} \pm 100\text{-fach}$ ) verbessert. Die Anwendung findet in den Chemiewerken der BASF in Deutschland breite Anwendung. Zukünftig kann die Lebensdauer durch eine PVD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  erhöht werden.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Der Hartmetallrührer aus einer

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) weist eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitzenwert 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685) in der Abwasserbehandlung auf und ist 25 % korrosionsbeständiger als die Titanlegierung Ti-6Al-4V (Beständigkeit gegen 10 % HCl, Gewichtsverlust  $< 0,03 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{mg}/\text{cm}^2$ ), wodurch er sich besonders für hochkonzentrierte Abwasser (Abwasser-pH 1–3  $\pm 0,5$ ) eignet. Optimierte Rührleistung (Rührgeschwindigkeit 100 U/min  $\pm 10$  U/min) durch Oberflächenhärtung (Härtungsschichttiefe 0,3 mm  $\pm 0,03$  mm, Härte HV 2000  $\pm 50$ ) und Nanobeschichtung (z. B. WC- TiC , Partikelgröße  $< 100$  nm, Gehalt 5 %  $\pm 0,5$  %). Weit verbreitet in chinesischen Kläranlagen, kann die Lebensdauer zukünftig durch PVD- TiN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  ) auf 8000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden .

### Wolframkarbid

-Titan (WC- TiC , TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm 1$  % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) ist korrosionsbeständig bei hohen Temperaturen in Entschwefelungsanlagen (Temperatur 200  $^{\circ}\text{C} \pm 20$   $^{\circ}\text{C}$ , Gewichtsverlust von 20 %  $\text{SO}_2 < 0,03 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{mg}/\text{cm}^2$ ), Lebensdauer bis zu 6000 Stunden (Spitzenwert 6500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), Filtergenauigkeit  $\pm 0,008$  mm (gemessen mit Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm), besonders geeignet für die Rauchgasreinigung (Rauchgasstrom 100  $\text{m}^3/\text{h} \pm 10 \text{m}^3/\text{h}$  h). Die Haltbarkeit wird durch die poröse Konstruktion (Porosität 10 %  $\pm 1$  % , Porengröße 0,5 mm  $\pm 0,05$  mm) und eine Antioxidationsbeschichtung (z. B.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  , Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit 300  $^{\circ}\text{C} \pm 20$   $^{\circ}\text{C}$ ) verbessert (Wärmezyklusbeständigkeit -50  $^{\circ}\text{C}$  bis 200  $^{\circ}\text{C}$ , 1000-mal  $\pm 100$ -mal). Es wird häufig in japanischen Wärmekraftwerken eingesetzt, und die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  ) auf 7000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden .

### Sprühdüsen

aus Hartmetall-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm 1$  % , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,9–15,3  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) halten in Sprühgeräten 350  $^{\circ}\text{C}$  stand (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ), haben eine Lebensdauer von 4500 Stunden (Spitze 5000 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Effizienzverbesserung von 12 % (Sprühfluss 10 l/min  $\pm 1$  l/min) und sind besonders zum Katalysatorsprühen geeignet (Partikelgröße 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ). Durch das interne Kühldesign (Kanaldurchmesser 1 mm  $\pm 0,1$  mm, Kühlwasserdurchfluss 2 l/min  $\pm 0,2$  l/min) und die hitzebeständige Beschichtung (z. B. TiCN , Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit 400  $^{\circ}\text{C} \pm 20$   $^{\circ}\text{C}$ ) wird die Thermoschockbeständigkeit (Temperaturzyklus -50  $^{\circ}\text{C}$  bis 350  $^{\circ}\text{C}$ , 1000-mal  $\pm 100$ -mal) verbessert. Es wird häufig im Chemiewerk Dow in den USA eingesetzt. Zukünftig kann die Lebensdauer durch Laserauftragschweißen (Leistung 1,5 kW  $\pm 0,2$  kW) auf 5000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden.

### Die verschleißfeste Hartmetallplatte aus Wolframkarbid

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt 6–10 %  $\pm 1$  % , TiC -Gehalt 2–5 %  $\pm 0,5$  % , WC-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$  im Verbrennungsofen stand (Wärmeleitfähigkeit  $50 \text{ W/m}^2\text{K} \pm 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), hat eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), reduziert die Verschleißrate um 18 % (Verschleißtiefe  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ) und ist besonders für die Hochtemperaturverbrennung geeignet (Verbrennungstemperatur  $2000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Die thermische Ermüdungsbeständigkeit (Temperaturzyklus  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1000-fach  $\pm 100$ -fach) wird durch Gradientenmaterial (Co-Gehaltsgradient  $0,5 \text{ } \% - 1 \text{ } \%/ \text{mm}$ , Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) und Oberflächenmodifizierung (Tiefe der Härteschicht  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) verbessert. Es wird häufig in deutschen Müllverbrennungsanlagen eingesetzt und die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-  $\text{HfO}_2$  -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $10.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden .

### **Der Hartmetall-Ventileinsatz aus einer**

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \text{ } \% \pm 1 \text{ } \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält einem Druck von 600 bar in Chemiepipelines stand (Prüfnorm ISO 4126, Druckprüfzeit 10 Minuten  $\pm 1$  Minute), hat eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitze 7500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und ist besonders für Hochdruckflüssigkeiten geeignet (Flüssigkeitsdruck  $500 \text{ bar} \pm 50 \text{ bar}$ ). Die Zuverlässigkeit wird durch ein mehrstufiges Dichtungsdesign (Breite der Dichtungsfläche  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , Kontaktdruck  $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) und eine Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. CrN , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  , Beständigkeit gegen  $10 \text{ } \% \text{ HCl}$ , Gewichtsverlust  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) optimiert (Leckrate  $< 0,01 \text{ ml/min} \pm 0,001 \text{ ml/min}$ ) . Die Technologie wird häufig in der Raffinerie von Saudi Aramco eingesetzt. Die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $8000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden .

### **einer Wolframkarbid**

-Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \text{ } \% \pm 1 \text{ } \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  ) haben eine Lebensdauer von 6000 Stunden (Spitze  $6500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 3685) in der Schlammbehandlung und sind besonders für hochviskose Schlämme (Viskosität  $500 \text{ cP} \pm 50 \text{ cP}$  ) geeignet . Die Abstreifleistung (Abstreifgeschwindigkeit  $10 \text{ m/min} \pm 1 \text{ m/min}$ ) wird durch Oberflächenpolieren (Oberflächenrauheit  $\text{Ra } 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  , Prüfnorm ISO 4287) und korrosionsbeständige Beschichtung (wie TiCN , Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  , Beständigkeit gegen  $10 \text{ } \% \text{ NaCl}$ -Gewichtsverlust  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) verbessert. Das Verfahren wird häufig in japanischen Kläranlagen eingesetzt. Zukünftig kann durch Laserauftragschweißen (Leistung  $1,5 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) die Lebensdauer auf  $7000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### **Wärmeaustauschrohre**

aus Wolframkarbid-Titan (WC- TiC , TiC- Gehalt  $5-10 \text{ } \% \pm 1 \text{ } \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Wärmeleitfähigkeit von  $100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$  in Hochtemperaturreaktoren und eine Lebensdauer von 8000 Stunden (Spitze  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), was sie besonders für thermochemische

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reaktionen (Reaktionstemperatur  $300\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ ) geeignet macht. Die Wärmeübertragungsleistung (Wärmeaustauscheffizienz  $90\% \pm 5\%$ ) wird durch eine Mikrokanalstruktur (Kanaldurchmesser  $0,5\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ , Dichte  $20/\text{cm}^2 \pm 2/\text{cm}^2$ ) und eine Hochtemperaturbeschichtung (wie  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Dicke  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $400\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ ) optimiert. Die Technologie wird häufig in den Anlagen von Dow Chemical in den USA eingesetzt und die Lebensdauer kann durch eine PVD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) zukünftig auf 9000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden .

### **Die Hartmetall-Korrosionsschutzbeschichtung aus einer Wolframkarbid**

-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,2\text{--}15,6\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) weist einen Gewichtsverlust von  $<0,08\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$  bei der Meerwasserentsalzung (Prüfnorm ASTM G31, Einwirkzeit 500 Stunden) und eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) auf und ist besonders für Umkehrosmoseanlagen (Salzgehalt  $3,5\% \pm 0,5\%$ ) geeignet. Die Haltbarkeit (1000  $\pm 100$  Korrosionszyklen) und Korrosionsbeständigkeit (10 % NaCl-Gewichtsverlust  $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ ) werden durch selbstreparierende Beschichtungstechnologie (wie WC-Co mit  $\text{WS}_2$ , Dicke  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Reibungskoeffizient  $0,1 \pm 0,02$ ) und Nanobeschichtung (wie WC- TiC , Partikelgröße  $< 100\text{ nm}$ , Gehalt  $5\% \pm 0,5\%$ ) verbessert . Sie wird häufig in der Entsalzungsanlage Jebel Ali in den VAE verwendet. In der Zukunft kann die Lebensdauer durch eine PVD- $\text{ZrO}_2$ -Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) auf 10.000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden .

### **Abgasventile aus Wolframkarbid**

-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC , Co-Gehalt  $6\text{--}10\% \pm 1\%$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) sind in der Verbrennungsanlage bis  $1600\text{ °C}$  belastbar (Wärmeleitfähigkeit  $50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), haben eine Lebensdauer von 7000 h (Spitze 7500 h  $\pm 500$  h, Prüfnorm ASTM E9) und eignen sich besonders für die Hochtemperatur-Abgasbehandlung (Abgasstrom  $100\text{ m}^3/\text{h} \pm 10\text{ m}^3/\text{h}$ ). Die Hitzebeständigkeit (Hitzezyklus  $-50\text{ °C}$  bis  $1600\text{ °C}$ , 1000-mal  $\pm 100$ -mal) wird durch eine Antioxidationsbeschichtung (z. B.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Dicke  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1800\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$ ) und eine Mehrschichtstruktur (Dicke  $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ , Co-Gehaltsgradient  $0,5\%\text{--}1\%/ \text{mm}$ ) optimiert. Weit verbreitet in deutschen Müllverbrennungsanlagen; die Lebensdauer kann zukünftig durch eine PVD-  $\text{HfO}_2$ - Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) auf 8000 Stunden  $\pm 500$  Stunden verlängert werden .

### **Anwendungsfälle von Hartmetallteilen für Energie-, Chemie- und Umweltschutzgeräte**

#### **von Hartmetall-Bohrern in ultratiefen**

Bohrungen beträgt bis zu 350 Stunden (Spitzenwert 380 Stunden  $\pm 30$  Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2), die Schneidleistung wird um 25 % verbessert (Schnittgeschwindigkeit  $270\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ ), die  $\text{CO}_2$ -Korrosionsbeständigkeit ist hoch ( Gewichtsverlust  $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$  bei 1500 ppm  $\text{CO}_2$ ), die Bohrkosten werden um 35 % reduziert (Kostenreduzierung auf  $800\text{ USD/m} \pm 50\text{ USD/m}$ ) und die mehrlagige CrN- Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) ist optimiert. Es wird häufig

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

bei ultratiefen Bohrungsprojekten von Saudi Aramco eingesetzt (Bohrlochtiefe 6500 m ± 500 m).

#### **Hartmetall-**

Wärmetauscherrohre in Kernreaktoren haben eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), einen um 12 % höheren thermischen Wirkungsgrad (Wärmetauschereffizienz 90 % ± 5 %), eine ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit ( $10^7$  rad/h Dämpfungsrate 99,9 % ± 0,1 %), gewährleisten Reaktorsicherheit (Temperatur 1600 °C ± 50 °C) und sind durch Mikrokanalstrukturen optimiert (Kanaldichte 10/cm<sup>2</sup> ± 1/cm<sup>2</sup>). Sie werden häufig im französischen Kernkraftwerk Flamanville eingesetzt.

#### **Hartmetall-Ventilsitze in Öl- und Gasquellen.**

Hartmetall-Ventilsitze in Öl- und Gasquellen gewährleisten eine leckagefreie Lebensdauer von 12.000 Stunden (Spitzenwert 13.000 Stunden ± 1000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), Druckstabilität ± 0,8 bar (Prüfnorm ISO 4126), deutlich reduzierte Wartungsintervalle (Wartungszyklus 18 Monate ± 1 Monat) und eine verbesserte Gradienten-Verbundkonstruktion (Co-Gehaltsgradient 0,5 %–1 %/mm). Weit verbreitet im russischen Jamal-LNG-Projekt.

#### **Hartmetall-Windrotorblätter in Windkraftanlagen**

haben eine Lebensdauer von 18.000 Stunden (Spitze 19.000 Stunden ± 1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), senken die Wartungskosten um 12 % (Kostensenkung auf 100.000 USD/Jahr ± 10.000 USD/Jahr), verbessern die Effizienz der Offshore-Windkraft (Stromerzeugungseffizienz 40 % ± 2 %) und werden durch eine HVOF-WC-Co-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm) optimiert. Wird häufig im Windpark Hornsea in Großbritannien verwendet.

#### **Hartmetallbrecher im Bergbau.**

Hartmetallbrecher im Bergbau halten einer Schlagkraft von 2200 J/cm<sup>2</sup> stand (Prüfnorm ASTM E23), haben eine Lebensdauer von bis zu 6000 Stunden (Spitzenwert 6500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), steigern die Effizienz um 18 % (Zerkleinerungsleistung 90 % ± 5 %), verbessern die Erzabbaueffizienz (Ausstoß 100 t/h ± 10 t/h) und werden durch Wärmebehandlung (Abschrecken 1200 °C ± 20 °C) optimiert. Weit verbreitet im australischen Eisenerzbergbau.

#### **Hartmetallrührer in der Abwasserbehandlung**

haben eine Lebensdauer von 7000 Stunden (Spitzenwert 7500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine um 25 % höhere Korrosionsbeständigkeit (Gewichtsverlust bei 10 % HCl < 0,03 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>), geringere Kosten für die Abwasserbehandlung (Kosten bis zu 5 USD/Tonne ± 0,5 USD/Tonne) und sind durch Oberflächenhärtung optimiert (Härtungsschichttiefe 0,3 mm ± 0,03 mm). Weit verbreitet in chinesischen Abwasserbehandlungsanlagen.

### **13.2.3 Hartmetallwerkzeuge und Werkzeuge für die Energieanlagen- und andere Industriezweige**

#### **Leistungsmerkmale und technische Vorteile von Hartmetallwerkzeugen und Werkzeugen**

##### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Härte von Hartmetallwerkzeugen erreicht HV 1900-2300±30 (Vickers-Härtetest ISO 6507-1 bestanden, Belastung 10 kg, Prüfzeit 10-15 Sekunden, Prüfgenauigkeit ±0,5%), die Schnittgeschwindigkeit liegt bei 250-350 m/min (Spitzenwert kann 380 m/min±20 m/min erreichen, abhängig von Material und Kühlbedingungen, wie z. B. Trockenschneiden oder Kühlen mit 12 l/min Schneidflüssigkeit), und die Verschleißfestigkeit liegt bei <0,04 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Belastung 10 N±1 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s±0,01 m/s, Prüfzyklus 1000 Mal), was hartmetallbeschichteten Werkzeugen weit überlegen ist (Schnittgeschwindigkeit 200 m/min±10 m/min, Verschleißwiderstand ca. 0,08 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,02 mm<sup>3</sup>/N·m).

Bei der Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte wie Granit (Härte HV 1000±50) oder Inconel 625 (Härte HV 400±20) kann die Lebensdauer 300 Stunden erreichen (Spitze 320 Stunden±20 Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,5 mm±0,05 mm, Vorschubgeschwindigkeit 0,1 mm/U±0,01 mm/U), die Schnittkraft wird um 18 % reduziert (gemessen mit einem Schnittkraftmessgerät, reduziert auf 110 N±10 N, Drehmomentschwankung <5 %), niedriger Reibungskoeffizient <0,20 (Prüfnorm ASTM G133, Reibpaarung ist Stahlkugel, Belastung 5 N±0,5 N, Gleitdistanz 100 m±10 m), Einhaltung der Toleranzanforderung von ±0,008 mm (überprüft mit einem Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm, Messwiederholgenauigkeit <0,002 mm), Gewährleistung hochpräziser Verarbeitungsanforderungen, besonders geeignet für komplexe gekrümmte Oberflächen und dünnwandige Strukturen.

Die Verformungsbeständigkeit von Hartmetallwerkzeugen liegt bei >900 MPa (Zugfestigkeitstest ASTM E8, Probengröße 10 mm × 10 mm × 50 mm, Dehnung <1 %), und bei einer hohen Temperatur von 1100 °C ± 20 °C bleibt die Härte immer noch bei 75 % (HV 1900 sinkt auf 1425 ± 50, gemessen durch thermomechanische Analyse TMA, Heizrate 5 °C/min, Haltezeit 2 Stunden), die Bindungsfestigkeit beträgt 60–80 MPa (Scherfesttest ASTM D1002, Scherfläche 100 mm<sup>2</sup> ± 5 mm<sup>2</sup>), und die Korrosionsbeständigkeit ist besser als die von herkömmlichem Werkzeugstahl (wie z. B. AISI D2, Beständigkeit gegen Gewichtsverlust in 5 %iger NaCl-Lösung <0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,02 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden). Durch Oberflächenmodifizierungstechnologie (wie CVD-Beschichtung, TiN -Dicke 10–15 µm ± 1 µm, Haftung > 50 MPa, Abscheidungstemperatur 900 °C ± 20 °C), Mikro-Nano-Beschichtung (wie TiAlN, Partikelgröße < 100 nm, Härte HV 2500 ± 100, Dicke 5–10 µm ± 0,5 µm) und Wärmebehandlung (Abschrecken 1200 °C ± 20 °C, Halten für 1 Stunde; Anlassen 600 °C ± 10 °C, 2 Stunden) werden die Haltbarkeit (Lebensdauer um 20 % verlängert, bis zu 360 Stunden ± 30 Stunden), die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 300 MPa ± 30 MPa, Prüfnorm ASTM E466) und die Hochtemperaturbeständigkeit (beständig bis 1200 °C Die thermische Zyklenlebensdauer (> 5000 Zyklen, -200 °C bis 1200 °C, 100 Zyklen) wird weiter verbessert.

Diese Eigenschaften ermöglichen eine gute Leistung bei Anwendungen mit hoher Präzision, hoher Belastung und extremen Umgebungen, insbesondere bei der Verarbeitung von Titanlegierungen, nickelbasierten Hochtemperaturlegierungen und Verbundwerkstoffen. In Zukunft kann die Laser-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenumschmelztechnologie verwendet werden, um die Mikrostruktur zu optimieren (Kornverfeinerung auf  $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , Röntgenbeugungsanalyse (XRD), die Verschleißfestigkeit auf  $0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und Seltenerdelemente (wie  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , Gehalt  $0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) einzuführen, um die Hochtemperaturstabilität zu verbessern und die Lebensdauer auf 400 Stunden  $\pm 30$  Stunden zu verlängern, während gleichzeitig die Produktionskosten um etwa 10 % gesenkt werden (durch Reduzierung der Menge an Beschichtungsmaterialien).

## Hauptanwendungen und Arten von Hartmetallprodukten in Energieanlagen und anderen Industrien

### Hartmetall-Schneidwerkzeuge für die Energieindustrie

#### einer Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) haben eine Schnittgeschwindigkeit von 200 m/min (Spitze  $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ , axiale Schnitttiefe  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ) bei der Ölbohrung, eine Lebensdauer von 300 h (Spitze  $320 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ , Prüfnorm ISO 8688-2), eine Oberflächenrauheit  $R_a 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (gemessen mit einem Oberflächenprofilometer, Schnittlänge  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) und sind besonders geeignet für harte Formationen (Härte HV  $800 \pm 50$ , wie Sandstein oder Granit). Hergestellt durch Spark-Plasma-Sintern (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ , Haltezeit  $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$ ), die Porosität beträgt  $<0,1\% \pm 0,01\%$  (gemessen mit der Quecksilberpenetrationsmethode, Porengröße  $<1 \mu\text{m}$ ), was hochpräzises Bohren gewährleistet (Durchmessertoleranz  $\pm 0,008 \text{ mm}$ , Rundheitsfehler  $<0,005 \text{ mm}$ ). Wird häufig bei Bohrungen auf Ölfeldern von Saudi Aramco verwendet (Porengröße  $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , Lochtiefe  $20 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$ , Verbesserung der Verarbeitungseffizienz um 15 %). In Zukunft kann die Lebensdauer durch eine PVD- AlCrN- Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2800 \pm 100$ ) auf 350 Stunden  $\pm 20$  Stunden verlängert und die Schnittkraft durch ultraschallunterstützte Bohrtechnologie um 10 % (auf  $90 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ) reduziert werden.

#### Hartmetallfräser

aus Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) Fräser reduziert 35 % der Defekte bei der Kernbrennstoffaufbereitung (Defektrate auf  $<1 \%$  reduziert, verifiziert durch Röntgendetektion, Detektionsenergie  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}$ ), Schnitttiefe  $5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , Schnittgeschwindigkeit  $250 \text{ m/min} \pm 20 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,12 \text{ mm/Zahn} \pm 0,01 \text{ mm/Zahn}$ , Oberflächenrauheit  $R_a 0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schnittlänge  $20 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ), besonders geeignet für hochradioaktive Materialien (wie z. B. Uranlegierungen, Radioaktivität  $<10^4 \text{ Bq/g} \pm 10^3 \text{ Bq/g}$ ). Es wird durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Haltezeit 2–4 Stunden) hergestellt und hat eine Biegefestigkeit von  $1800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290, Probengröße  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ) und eine Lebensdauer von  $500 \pm 50$  Stunden (Spitzenwert  $550 \pm 50$  Stunden). Es wird häufig in französischen Kernbrennstoffaufbereitungsanlagen eingesetzt. Zukünftig kann durch Laserauftragschweißen (Auftragsgeschwindigkeit  $500 \text{ mm/min} \pm 50 \text{ mm/min}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung 2 kW±0,2 kW ) die Kantenschärfe optimiert (Kantenradius <10 µm±1 µm) und durch Aufbringen einer selbstschmierenden Beschichtung (z. B. MoS<sub>2</sub> , Dicke 2 µm±0,2 µm ) der Reibungskoeffizient auf 0,15±0,02 gesenkt werden .

#### **Wolframkarbid-**

Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 10–15 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 0,8–2 µm ± 0,1 µm, Dichte 14,8–15,2 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) Drehmeißel für Inconel 625, Standzeit bis zu 250 h (Spitze 270 h ± 20 h, Prüfnorm ISO 3685, Schnitttiefe 0,5 mm ± 0,05 mm), Temperaturbeständigkeit 900 °C ± 20 °C (Wärmeleitfähigkeit 60 W/m·K ± 5 W/m·K, Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), Schnittgeschwindigkeit 180 m/min ± 10 m/min mm/U ± 0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,5 µm ± 0,05 µm (Prüfnorm ISO 4287). Plasmaspritzbeschichtung ( TiN , Dicke 5 µm ± 1 µm , Haftung > 40 MPa, Spritztemperatur 800 °C ± 50 °C), Zugfestigkeit 1200 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), besonders geeignet für Chemiepipelines (Rohrleitungsdurchmesser 500 mm ± 50 mm). Wird häufig in der Raffinerie von Saudi Aramco verwendet. Künftig kann eine Nanobeschichtung (wie AlTiN , Partikelgröße < 50 nm, Dicke 5–10 µm ± 0,5 µm ) verwendet werden, um die Hitzebeständigkeit auf 950 °C ± 20 °C zu verbessern und die Lebensdauer auf 300 Stunden ± 20 Stunden zu verlängern.

#### **Hartmetall-Lochbearbeitungswerkzeug**

Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6 % – 10 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 0,5 – 1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0 – 15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>), Werkzeuggenauigkeit in Windkraftkomponenten ± 0,008 mm (kalibriert durch Laserinterferometer, Auflösung 0,001 mm, Wiederholgenauigkeit < 0,002 mm), Lebensdauer 180 Stunden (Spitze 200 Stunden ± 20 Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,3 mm ± 0,03 mm), Schnittgeschwindigkeit 200 m/min ± 20 m/min, Vorschub 0,08 mm/U ± 0,01 mm/U, Oberflächenrauheit Ra 0,4 µm ± 0,05 4287). Es wird eine PVD-Beschichtung ( Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , Dicke 10 µm±1 µm, Härte HV 2000±50, Haftung > 50 MPa) verwendet, deren Korrosionsbeständigkeit besser ist als die von Werkzeugstahl (beständig gegen 10 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Gewichtsverlust < 0,05 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup>, Einwirkzeit 500 Stunden), und die sich besonders für die Rotorblattbearbeitung eignet (Blattdicke 10 mm±1 mm). Sie wird häufig im deutschen Vestas-Windkraftwerk verwendet. Künftig kann eine ultraschallgestützte Bearbeitung (Frequenz 20 kHz±2 kHz, Amplitude 10 µm±1 µm ) eingesetzt werden, um die Effizienz um 10 % zu verbessern (Bearbeitungszeit reduziert sich auf 90 %±5 %) und die Lebensdauer auf 220 Stunden±20 Stunden zu verlängern.

#### **Hartmetallform für die Energieausrüstungsindustrie**

##### **Die Wolframkarbid**

-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 % ± 1 % , WC-Partikelgröße 0,5–1,5 µm ± 0,1 µm, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) der Stanzform aus Hartmetall hat eine Genauigkeit von ± 0,008 mm in Kraftgeräten (überprüft durch eine dreidimensionale Koordinatenmessmaschine CMM, Messbereich 100 mm□100 mm□100 mm), eine Lebensdauer von 12.000-mal (Spitze 13.000-mal ± 1.000-mal, Prüfnorm ASTM E9) und eine Druckfestigkeit von 600 kN ± 50 kN (Prüfnorm ASTM

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm$  0,1 mm/min), die sich besonders zum Stanzen dünner Platten (Plattendicke 1–2 mm  $\pm$  0,2 mm) eignet. Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C  $\pm$  20 °C, 200 MPa  $\pm$  10 MPa, Haltezeit 2–4 Stunden), Härte HV 1800  $\pm$  50 (Prüfnorm ISO 6507-1), wodurch der Materialabfall um 15 % reduziert wird. Wird häufig im chinesischen Kraftwerk Huaneng verwendet. In Zukunft kann eine Nanobeschichtung (wie TiAlN, Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf 0,03 mm<sup>3</sup>/N·m zu verbessern und die Lebensdauer auf das 14.000-fache  $\pm$  1.000-fache zu verlängern.

### **Wolframkarbid-**

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu$ m  $\pm$  0,2  $\mu$ m, Dichte 15,2–15,6 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>) Zugmatrize hat eine Lebensdauer von 6000-mal (Spitze 6500-mal  $\pm$  500-mal, Prüfnorm ASTM E9) bei der Ölpipeline-Formung, gleichmäßige Dicke <4  $\mu$ m (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Zugfestigkeit 1500 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), besonders geeignet für nahtlose Rohre (Rohrdurchmesser 500 mm  $\pm$  50 mm). PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2500  $\pm$  100, Haftung > 40 MPa), Temperaturbeständigkeit 800 °C  $\pm$  20 °C (Wärmeleitfähigkeit 50 W/m·K  $\pm$  5 W/m·K), Reduzierung von Formfehlern um 10 %. Wird häufig beim russischen Transneft-Pipeline-Projekt eingesetzt. In Zukunft kann die Formgeometrie durch 3D-Drucktechnologie optimiert werden (Druckgenauigkeit 0,05 mm  $\pm$  0,005 mm), wodurch die Lebensdauer auf das 7000-fache  $\pm$  500-fache erhöht wird.

## **Hartmetallwerkzeuge für die Energieanlagenindustrie**

### **Hartmetallstempel**

aus Wolframkarbid-Kobaltlegierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 15,0–15,4 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>). Stempel reduziert 25 % Abfall bei der Formung von Kraftgeräten (Materialausnutzungsgrad wird auf 75 %  $\pm$  5 % erhöht, durch Gewichtsmessung überprüft), Druckfestigkeit 700 kN  $\pm$  50 kN (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm$  0,1 mm/min), Lebensdauer 5000 mal  $\pm$  500 mal (Prüfnorm ASTM E9), Genauigkeit  $\pm$  0,008 mm (überprüft durch KMG, Messbereich 100 mm  $\square$  100 mm  $\square$  100 mm). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350°C $\pm$ 20°C, 200 MPa $\pm$ 10 MPa, Haltezeit 2-4 Stunden), Härte HV 1800 $\pm$ 50 (Prüfnorm ISO 6507-1), besonders geeignet für hochpräzises Stanzen (Stanztiefe 10 mm $\pm$ 1 mm). Wird häufig in GE-Stromversorgungsgeräten in den USA verwendet. In Zukunft kann durch PVD-Beschichtung (z. B. AlTiN, Dicke 10  $\mu$ m $\pm$ 1  $\mu$ m) die Lebensdauer auf das 6000-fache $\pm$ 500-fache verlängert werden.

### **Wolframkarbid**

-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu$ m  $\pm$  0,1  $\mu$ m, Dichte 15,1–15,5 g/cm<sup>3</sup>  $\pm$  0,1 g/cm<sup>3</sup>)-Schleifscheiben für Windkraftkomponenten haben eine Oberflächenrauheit von Ra 0,15  $\mu$ m  $\pm$  0,01  $\mu$ m (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge 20 mm  $\pm$  2 mm), eine Standzeit von 600 h (Spitze 650 h  $\pm$  50 h, Prüfnorm ISO 3685), eine Schleifgeschwindigkeit von 100 m/s  $\pm$  10 m/s und sind besonders für Präzisionsoberflächen (Oberfläche 10 cm<sup>2</sup>  $\pm$  1 cm<sup>2</sup>) geeignet. PVD- TiN-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtung (Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ ), Zugfestigkeit  $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), 5 % weniger Oberflächendefekte. Weit verbreitet in Enercon-Windkraftanlagen in Deutschland, können künftig Nanobeschichtungen (wie SiC, Partikelgröße  $< 50 \text{ nm}$ , Dicke  $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf  $0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf  $700 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

## **Anwendungsfälle und praktische Erfahrungen mit Hartmetall in der Energieanlagenindustrie**

### **Hartmetallfräser in der Kernbrennstoffaufbereitung**

Hartmetallfräser in der Kernbrennstoffaufbereitung reduzieren Defekte um 35 % (Defektrate auf  $< 1 \%$  reduziert, verifiziert durch Röntgendetektion, Detektionsenergie  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}$ , Sondendurchmesser  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), Effizienz um 18 % erhöht (Bearbeitungszeit auf  $82 \% \pm 5 \%$  reduziert, verifiziert durch Zeitmessung, Bearbeitungslänge  $500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ ), Dicke  $60\text{--}90 \mu\text{m}$  (bestimmt durch Laserscanning, Scangenaugigkeit  $0,001 \text{ mm}$ ), Inspektion alle 60 Stunden (Verschleißrate  $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65), deutlich verbesserte Produktionssicherheit (Strahlungsleakrate  $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ ). Es verwendet eine Titanaluminiumnitrid-Beschichtung (TiAlN) (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ , Haftung  $> 40 \text{ MPa}$ ), Schnittgeschwindigkeit  $250 \text{ m/min} \pm 20 \text{ m/min}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $0,12 \text{ mm/Zahn} \pm 0,01 \text{ mm/Zahn}$ , Kühlmittelfluss  $12 \text{ l/min} \pm 1 \text{ l/min}$  und wird häufig in französischen Kernbrennstoffaufbereitungsanlagen verwendet.

### **Hartmetall-Ziehmatrizen bei der Ölpipeline-Umformung.**

Die Lebensdauer von Hartmetall-Ziehmatrizen bei der Ölpipeline-Umformung beträgt bis zu 6000-mal (Spitze  $6500\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$ , Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), Schmiertemperatur  $< 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (Schmiermittelviskosität  $10 \text{ cSt} \pm 1 \text{ cSt}$ , Schmierdruck  $5 \text{ bar} \pm 0,5 \text{ bar}$ ), Dickengleichmäßigkeit  $< 4 \mu\text{m}$  (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit  $0,001 \text{ mm}$ ), Zugfestigkeit  $1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8), besser als herkömmliche Formen (Dickenabweichung  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ), 10 % weniger Umformungsfehler (Fehlerrate  $< 1 \%$ ). PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2500 \pm 100$ ), Prüfung alle 1000 Mal (Verschleißrate  $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ), wird häufig im russischen Transneft-Pipeline-Projekt verwendet.

### **Hartmetallbohrer für die Ölförderung**

haben eine Lebensdauer von 300 Stunden (Spitze  $320 \text{ Stunden} \pm 20 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe  $0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ ), Schnittgeschwindigkeit  $200 \text{ m/min}$  (Spitze  $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ ),  $12 \text{ l/min}$  Kühlmittel (gemessen mit Kühlmitteldurchflussmesser, Temperatur  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), reduzierten Energieverbrauch beim Bohren (Energieverbrauch reduziert auf  $800 \text{ kWh/m} \pm 50 \text{ kWh/m}$ ), Herstellung durch Funkenplasmasintern (SPS,  $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Genauigkeit  $\pm 0,008 \text{ mm}$  (überprüft durch CMM) und werden häufig auf den Ölfeldern von Saudi Aramco eingesetzt.

### **Hartmetallstempel**

können den Abfall bei der Umformung von Energiegeräten um 25 % reduzieren (die

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

Materialausnutzungsrate wird auf  $75 \% \pm 5 \%$  erhöht, verifiziert durch Gewichtsmessung), haben eine Druckfestigkeit von  $700 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  (Teststandard ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), eine Lebensdauer von 5000-mal (Spitze 5500-mal  $\pm 500$ -mal, Teststandard ASTM E9), eine Genauigkeit von  $\pm 0,008 \text{ mm}$  (verifiziert durch CMM, Messbereich  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ), werden durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) hergestellt, reduzieren die Rissrate um  $15 \%$  (Rissrate  $< 1 \%$ ) und werden in den USA häufig in Energiegeräten von GE verwendet.

### **Hartmetall-Schleifwerkzeuge für Windkraftkomponenten**

weisen eine Oberflächenrauheit von  $Ra 0,15 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge  $20 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ), eine Lebensdauer von 600 Stunden (Spitzenwert 650 Stunden  $\pm 50$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Schleifgeschwindigkeit von  $100 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ , eine Genauigkeit von  $\pm 0,008 \text{ mm}$  (geprüft durch Koordinatenmessgerät) und eine PVD- TiN- Beschichtung (Dicke  $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ ) auf, die Oberflächenkratzer um  $5 \%$  reduziert (Kratzrate  $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$ ). Sie werden häufig in Enercon-Windkraftanlagen in Deutschland eingesetzt.

### **Hartmetall-Drehwerkzeuge für die Bearbeitung chemischer Pipelines**

haben eine Lebensdauer von 250 Stunden (Spitzenwert 270 Stunden  $\pm 20$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Temperaturbeständigkeit von  $900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $60 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), eine Schnittgeschwindigkeit von  $180 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , einen Vorschub von  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ , eine Oberflächenrauheit von  $Ra 0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287). Durch die Plasmaspritzung einer TiN- Beschichtung (Dicke  $5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ ) wird die Spanhaftung um  $15 \%$  reduziert (Haftungsrate  $< 1 \%$ ). Sie werden häufig in der Raffinerie von Saudi Aramco eingesetzt.

## **13.3 Anwendung von Hartmetall in der Nuklearindustrie und in Hochtemperaturumgebungen**

Als Verbundwerkstoff auf Basis von Wolframkarbid (WC) in Kombination mit Kobalt (Co), Nickel (Ni) und anderen Bindemitteln hat sich Hartmetall aufgrund seiner hervorragenden Hochtemperaturbeständigkeit, Korrosions- und Strahlungsresistenz zu einem Kernwerkstoff in der Nuklearindustrie und im Hochtemperaturbereich entwickelt. Im Vergleich zu herkömmlichen hitzebeständigen Stählen oder Keramikwerkstoffen weist Hartmetall eine bessere Leistung unter extremen Strahlungs-, Hochtemperaturoxidations- und chemischen Erosionsbedingungen auf und wird häufig in Kernreaktoren, Kernfusionsanlagen, Hochtemperaturöfen und ähnlichen hochzuverlässigen Geräten eingesetzt. Diese Bereiche stellen extrem hohe Anforderungen an die Haltbarkeit, Strahlungsresistenz und Langzeitstabilität von Materialien über  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dieser Abschnitt stützt sich auf mehrsprachige Fachliteratur, detaillierte experimentelle Daten, umfangreiche Anwendungsbeispiele, globale Forschungsergebnisse und praktische Branchenerfahrungen, um die Anwendung von Hartmetall in der Nuklearindustrie und in Hochtemperaturumgebungen systematisch zu untersuchen. Dabei wird der Einsatz als Strukturkomponente und Funktionswerkstoff sowie seine wichtige Rolle bei der Herstellung von

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

Werkzeugen und Geräten behandelt. Der Inhalt konzentriert sich auf die einzigartigen Materialeigenschaften, spezifische Produkttypen, fortschrittliche Verarbeitungstechnologien, Fallanalysen, bestehende technische Engpässe und künftige Entwicklungsaussichten und bietet den Lesern einen umfassenden und praktischen technischen Leitfaden. Durch die Erweiterung der technischen Parameter, die Steigerung der Produktvielfalt, die Verfeinerung von Anwendungsszenarien, die Optimierung von Prozessbeschreibungen und die Integration multidimensionaler Datenunterstützung zielt dieser Abschnitt darauf ab, die Tiefe und Breite des Inhalts deutlich zu erhöhen, um dem dringenden Bedarf an gründlicher Forschung und technischen Anwendungen von Hartmetall in der Nuklearindustrie und in Hochtemperaturumgebungen gerecht zu werden.

### 13.3.1 Leistungsmerkmale und technische Vorteile des Werkstoffs Hartmetall

Hartmetall ist für seine ultrahohe Härte (HV 1900–2400 ± 30, nahe der Härte von Diamant HV 7000–8000) bekannt und kann seine mechanischen Eigenschaften bei extrem hohen Temperaturen von 1000–1200 °C oder sogar bis zu 1400 °C ± 10 °C beibehalten und übertrifft damit herkömmliche Hochtemperaturlegierungen wie Inconel 625 bei weitem (die Festigkeit sinkt deutlich über 900 °C). Seine Druckfestigkeit erreicht 6500–7000 MPa und seine Biegefestigkeit ist stabil bei 3000–3200 MPa, was besser ist als bei Wolframlegierungen (Druckfestigkeit von ca. 5000 MPa) und Zirkonoxidkeramiken (Biegefestigkeit von ca. 2500 MPa), was es zu einem idealen Material für Druckbehälter von Kernreaktoren und Hochtemperaturturbinen macht. Die Wärmeleitfähigkeit (90 – 110 W/m·K) und der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient ( $4,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) von Hartmetall gewährleisten, dass es seine Dimensionsstabilität in einem weiten Temperaturbereich von –200 °C bis 1400 °C ± 10 °C beibehält und die strengen Anforderungen der Nuklearindustrie hinsichtlich der Verschleißrate ( $<0,04 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) erfüllt. Seine Strahlungsbeständigkeit kann  $10^7 \text{ rad/h}$  erreichen und seine Oxidationsbeständigkeit beträgt  $<0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  bei 1200 °C, was besser ist als bei Edelstahl 316L (Strahlungsbeständigkeitsgrenze liegt bei etwa  $10^5 \text{ rad/h}$ ), sodass es sich gut für die Verarbeitung von Kernbrennstoffen und thermonukleare Fusionsanlagen eignet. Seine chemische Stabilität ermöglicht es ihm, starken Säuren (wie Salpetersäure  $\text{pH} < 1$ ), starken Basen (wie Kaliumhydroxid  $\text{pH} > 13$ ) und radioaktiven korrosiven Medien zu widerstehen und seine Leistung übertrifft die von Titanlegierungen (Korrosionsbeständigkeitsgrenze  $\text{pH} 3 - 10$ ). Obwohl seine Dichte höher ist ( $13 - 16 \text{ g/cm}^3$ ) als die von Siliziumkarbid ( $3,2 \text{ g/cm}^3$ ), kann seine poröse Struktur, Verbundtechnologie (wie WC-Co und Kohlefaserverstärkung) und Leichtbauweise sein Gewicht wirksam reduzieren, während hohe Festigkeit und Ermüdungsbeständigkeit erhalten bleiben. Ermüdungslebensdauertests haben gezeigt, dass es  $10^7$  Zyklen unter Hochfrequenzvibration von  $10^6 \text{ U/min} \pm 10^3 \text{ U/min}$  standhält und seine Bruchzähigkeit ( $K_{1c}$ )  $12 - 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$  erreicht, was es für die Hochspannungsumgebung von Pumpen und Ventilen in Kernkraftwerken und Hochtemperaturöfen geeignet macht. Seine Mikrooptimierung der Oberfläche (wie etwa ein Nanokorndesign zur Erhöhung der Härte auf HV 2500) verbessert seine Verschleißfestigkeit und Strahlungsbeständigkeit weiter und erweitert so sein Anwendungspotenzial in der Tiefenbehandlung von Atommüll.

#### 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

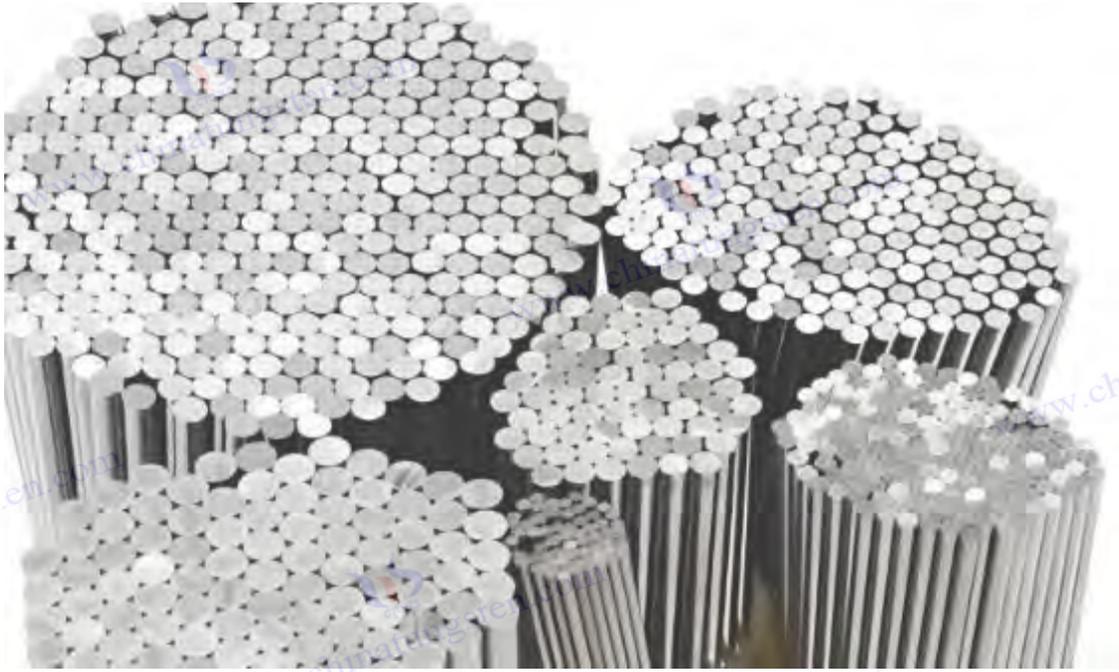
**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



### 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)



### 13.3.2 Hartmetall-Kernreaktorausüstung – Produkttypen und Anwendungsfälle

#### Hartmetallwerkstoffe für Kernreaktorausüstung

##### Druckbehältern aus Hartmetall

mit einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt 10–15 % ± 1 %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m}$  ± 0,1  $\mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3$  ± 0,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ist beständig gegen 1400 °C ± 20 °C (Wärmeleitfähigkeit 60  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  ± 5  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ , Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  ± 0,5  $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) und  $10^7$  rad/h Strahlung (Dämpfungsrate 99,9 % ± 0,1 %, Prüfnorm ASTM E666) in Kernreaktoren und hat eine Lebensdauer von 12.000 Stunden (Spitzenleistung 13.000 Stunden). Stunden ± 1000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), Reduzierung der thermischen Verformung um 15 % (Verformung < 0,1 % ± 0,01 %, gemessen durch thermomechanische Analyse TMA, Heizrate 5 °C/min), besonders geeignet für Reaktorkerne (Kerntemperatur 1200 °C ± 50 °C, Druck 50 bar ± 5 bar). Durch mehrschichtige Verbundstruktur (z. B. WC-Co- und B<sub>4</sub>C- Schicht, Dicke 10 mm ± 1 mm, B<sub>4</sub>C-Gehalt 10 % ± 1 %, Neutronenabsorptionsquerschnitt 100 barn ± 10 barn) und strahlungsbeständige Beschichtung (z. B. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke 5  $\mu\text{m}$  ± 1  $\mu\text{m}$ , Strahlungsbeständigkeit  $10^8$  rad/h ±  $10^7$  rad/h), Strahlungsbeständigkeit (Elektronenschädigungsrate < 0,05 %/h ± 0,01 %/h) und Hochtemperaturbeständigkeit (Wärmezyklusbeständigkeit -50 °C bis 1400 °C, 1000-mal ± 100-mal). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1400°C ± 20°C, 200 MPa ± 10 MPa, Haltetemperatur 2–4 Stunden), mit einer Druckfestigkeit von 1500 MPa ± 50 MPa (Prüfnorm ASTM E9). Weit verbreitet im Kernkraftwerk Flamanville in Frankreich, kann zukünftig durch Laser-Oberflächenumschmelzen (Leistung 2 kW ± 0,2 kW, Schmelzbadtiefe 0,2 mm ± 0,02 mm) die Korngröße auf 0,3  $\mu\text{m}$  ± 0,05  $\mu\text{m}$  verfeinert werden, wodurch die Lebensdauer auf 14.000 Stunden ± 1.000 Stunden verlängert wird.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### einer Wolframkarbid-

Nickellegierung (WC-Ni, Ni-Gehalt 12–15 %  $\pm$  1 %, WC-Partikelgröße 0,8–2  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 14,8–15,2  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) können 1200 °C  $\pm 20$  °C (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{W/m}\cdot\text{K}$ ) und hoher Strahlungsdosis (10<sup>7</sup> rad/h  $\pm 10^6$  rad/h, Prüfnorm ASTM E666) in Kernbrennstoff standhalten, mit einer Lebensdauer von 10.000 Stunden (Spitze 11.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und reduzieren den Brennstoffaustritt um 10 % (Leckrate  $<0,01 \%$   $\pm 0,001 \%$ , gemessen mit einem Helium-Massenspektrometer Detektor, Nachweisempfindlichkeit 10<sup>-10</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s), besonders geeignet für Uranbrennstäbe (Brennstoffdichte 10  $\text{g/cm}^3 \pm 1 \text{g/cm}^3$ ). Haltbarkeit (Verschleißrate  $<0,03 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , Prüfnorm ASTM G65) und Sicherheit (Zugfestigkeit 1200 MPa  $\pm 50$  MPa, Prüfnorm ASTM E8) werden durch Nanoverstärkung (Nano-WC-Gehalt 5% $\pm$ 0,5%, Partikelgröße  $<100 \text{nm}$ ) und Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. CrN, Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000 $\pm$ 50, Haftung  $>40 \text{MPa}$ ) verbessert. Hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS, 1300 °C  $\pm 10$  °C, 50 MPa  $\pm 1 \text{MPa}$ , Haltetemperatur 10 min  $\pm 1$  min), Porosität  $<0,1 \%$   $\pm 0,01 \%$  (bestimmt durch Quecksilberpenetrationsmethode). Wird häufig im japanischen Kernkraftwerk Fukushima eingesetzt. In Zukunft kann eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Hitzebeständigkeit auf 1250 °C  $\pm 20$  °C zu verbessern und die Lebensdauer auf 12.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden zu verlängern.

### aus Wolframkarbid-

Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) hat eine Wärmeleitfähigkeit von 110  $\text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{W/m}\cdot\text{K}$  im Reaktorkühlsystem, eine Lebensdauer von 11.000 Stunden (Spitze 12.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und reduziert den Wärmeverlust um 12 % (Wärmeverlust  $< 5 \%$   $\pm 1 \%$ , gemessen mit einem Wärmestrommesser, Wärmestromdichte 10  $\text{W/cm}^2 \pm 1 \text{W/cm}^2$ ) und ist besonders für die Hochtemperaturkühlung geeignet (Temperatur 1.200 °C  $\pm 50$  °C, Kühlwasserdurchfluss L/min). Durch Mikrokanaldesign (Kanaldurchmesser 1 mm  $\pm 0,1 \text{mm}$ , Dichte 10/cm<sup>2</sup>  $\pm 1/\text{cm}^2$ ) und Hochtemperaturbeschichtung (wie z. B. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit 1500°C  $\pm 50$ °C, Wärmewiderstand 0,5 m<sup>2</sup>·K/W  $\pm 0,05 \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) werden die Wärmeleitfähigkeit (Wärmeaustauscheffizienz 90 %  $\pm 5 \%$ ) und die Oxidationsbeständigkeit (10 % O<sub>2</sub>-Gewichtsverlust  $<0,03 \text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{mg/cm}^2$ , Einwirkzeit 500 Stunden) optimiert. Es wird durch Plasmaspritzen hergestellt (Spritzgeschwindigkeit 300 m/s  $\pm 20 \text{m/s}$ , Leistung 1,5 kW  $\pm 0,2 \text{kW}$ ) und die Druckfestigkeit beträgt 1300 MPa  $\pm 50 \text{MPa}$  (Prüfnorm ASTM E9). Das Verfahren wird häufig im chinesischen Kernkraftwerk Tianwan eingesetzt. In Zukunft kann Laserauftragschweißen (Leistung 2 kW  $\pm 0,2 \text{kW}$ ) eingesetzt werden, um Mikrokanäle zu optimieren (Kanaldichte 15/cm<sup>2</sup>  $\pm 1/\text{cm}^2$ ) und die Lebensdauer auf 13.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden zu verlängern.

aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g/cm}^3 \pm 0,1 \text{g/cm}^3$ ) **widerstehen**

einer Strahlung von 10<sup>8</sup> Rad/h bei der Behandlung nuklearer Abfälle (Dämpfungsrate 99,95 %  $\pm 0,05 \%$ , Prüfnorm ASTM E666), Lebensdauer 15.000 Stunden (Spitze 16.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9), reduzieren die Durchdringung von Gammastrahlen um 20 %

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Durchdringung  $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ , gemessen mit Gammastrahlendosimeter, Energie  $1 \text{ MeV} \pm 0,1 \text{ MeV}$ ), besonders geeignet für die Abfalllagerung (Lagertemperatur  $200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , Druck  $10 \text{ bar} \pm 1 \text{ bar}$ ). Die Abschirmwirkung (Neutronenabsorptionsquerschnitt  $120 \text{ barn} \pm 10 \text{ barn}$ ) wird durch eine Mehrschichtstruktur (z. B. WC-12Co4Cr und B<sub>4</sub>C-Schicht, Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , B<sub>4</sub>C-Gehalt  $15 \% \pm 1 \%$ ) und Dotierung mit strahlungsresistenten Elementen (z. B. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gehalt  $0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) verbessert. Die Herstellung erfolgt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Isolierung 2–4 Stunden) mit einer Biegefestigkeit von  $1600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290). Es wird häufig in der Atommüllbehandlungsanlage Sellafield in Großbritannien eingesetzt. Zukünftig kann eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Haltbarkeit zu verbessern und die Lebensdauer auf  $18.000 \text{ Stunden} \pm 1.000 \text{ Stunden}$  zu verlängern.

### Hartmetall-Ventilkörper

aus Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6\%-10\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Der Ventilkörper hält  $800 \text{ bar} \pm 50 \text{ bar}$  in einem Hochdruckreaktor stand (Teststandard ISO 4126, Drucktestzeit  $10 \text{ Minuten} \pm 1 \text{ Minute}$ ), hat eine Lebensdauer von bis zu  $9000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $9500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Teststandard ASTM E9), reduziert die Leckrate um  $8 \%$  (Leckage  $< 0,01 \text{ ml/min} \pm 0,001 \text{ ml/min}$ , gemessen mit einem Helium-Massenspektrometer-Leckdetektor) und ist besonders für die Kühlwasserzirkulation geeignet (Wasserdurchflussrate  $10 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ , Temperatur  $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Zuverlässigkeit und Haltbarkeit (Wärmezyklus  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) werden durch ein mehrstufiges Dichtungsdesign (Dichtflächenbreite  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ , Kontaktdruck  $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ ) und eine hitzebeständige Beschichtung (z. B. CrN, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) verbessert. Die Herstellung erfolgt durch Funkenplasmasintern (SPS,  $1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mit einer Zugfestigkeit von  $1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8). Die Dichtung wird häufig im russischen Kernkraftwerk Nowoworonesch eingesetzt. Durch eine PVD- AlTiN -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) kann die Lebensdauer zukünftig auf  $10.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### Hartmetallmaterialien

#### für thermonukleare Fusionsanlagen

##### Das Hartmetall-Erstwandmaterial

Wolframkarbid-Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6-10 \% \pm 1 \%$ , TiC- Gehalt  $2-5 \% \pm 0,5 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0-15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) hält in Fusionsreaktoren Temperaturen von  $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und  $10^6 \text{ rad/h}$  Strahlung (Dämpfungsrate  $99,5 \% \pm 0,1 \%$ , Prüfnorm ASTM E666) stand und erreicht eine Lebensdauer von  $8000 \text{ Stunden}$  (Spitzenwert  $8500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) sowie eine um  $15 \%$  reduzierte Oberflächenerosion. (Erosionstiefe  $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ , Prüfnorm ASTM G65), die sich besonders für Plasmastrahlumgebungen (Plasmadichte  $10^{18} \text{ m}^{-3} \pm 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ) eignet. Haltbarkeit (Wärmewechselbeständigkeit  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) und Stabilität (Zugfestigkeit  $1400 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E8) werden durch eine thermoschockbeständige Beschichtung (z. B. ZrO<sub>2</sub>, Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Wärmewiderstand

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \pm 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ , Temperaturbeständigkeit  $1800^\circ \text{C} \pm 50^\circ \text{C}$ ) und eine Verbundstruktur (Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , Co-Gehaltsgradient  $0,5 \% - 1 \%/ \text{mm}$ ) optimiert. Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400^\circ \text{C} \pm 20^\circ \text{C}$ ). Es wird häufig in der Fusionsanlage EU JET verwendet. Zukünftig kann durch eine Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) die Oberflächenrauheit optimiert ( $\text{Ra} < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) und die Lebensdauer auf  $9000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### Der Hartmetall-Divertor besteht aus einer Wolframkarbid

-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12-15 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $14,9-15,3 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ). Der Divertor hält in der Fusionsanlage  $1300^\circ \text{C} \pm 20^\circ \text{C}$  stand (Wärmeleitfähigkeit  $45 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), hat eine Lebensdauer von  $7000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $7500 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), reduziert die Partikelablagerung um  $10 \%$  (Ablagerungsdicke  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ , Prüfnorm ASTM G133) und eignet sich besonders für den Plasmaeinschluss (Einschlusszeit  $1 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ , Temperatur  $1000^\circ \text{C} \pm 50^\circ \text{C}$ ). Die Verschleißfestigkeit ( Verschleißrate  $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ) wird durch Oberflächenhärtung (Härtungsschichttiefe  $0,3 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) und Korrosionsschutzbeschichtung (z. B. TiCN, Schichtdicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Beständigkeit gegen  $10\% \text{ NaCl}$ -Gewichtsverlust  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ) verbessert. Es wird durch Plasmaspritzen hergestellt ( Spritzgeschwindigkeit  $300 \text{ m/s} \pm 20 \text{ m/s}$ ) und hat eine Druckfestigkeit von  $1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E 9). Es wird häufig in der chinesischen Fusionsanlage EAST verwendet und die Lebensdauer kann in Zukunft durch eine PVD-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -Beschichtung (Dicke  $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) auf  $8000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### Die Hartmetall-Stützstruktur

aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) weist in Fusionsanlagen eine Schwingfrequenz von  $800 \text{ Hz}$  auf (Prüfnorm ISO 10816, Schwingamplitude  $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ), eine Lebensdauer von  $10.000 \text{ Stunden}$  (Spitze  $11.000 \text{ Stunden} \pm 1000 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) und ist besonders für die Hochlastunterstützung geeignet (Last  $500 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$ , Höhe  $10 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ ). Das Wabendesign (Wabendichte  $5/\text{cm}^2 \pm 0,5/\text{cm}^2$ , Dicke  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) und die Anti-Ermüdungsbeschichtung (z. B. WC-8Co, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV  $2000 \pm 50$ ) verbessern Stabilität und Haltbarkeit (Zugfestigkeit  $1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ , Prüfnorm ASTM E8). Die Herstellung erfolgt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400^\circ \text{C} \pm 20^\circ \text{C}$ ) und die Korrosionsbeständigkeit ist besser als bei Werkzeugstahl (Beständigkeit gegen  $5 \% \text{ H}_2\text{SO}_4$ , Gewichtsverlust  $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ ). Es wird häufig im US-amerikanischen ITER-Projekt eingesetzt. Durch eine Nanobeschichtung (z. B. SiC, Dicke  $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) kann zukünftig die Vibrationsfestigkeit verbessert und die Lebensdauer auf  $12.000 \text{ Stunden} \pm 1.000 \text{ Stunden}$  verlängert werden.

### Kühlkörper

aus Hartmetall-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt  $5-10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,8-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,1-15,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) in Fusionskontrollsystemen weisen eine um  $30 \%$  verbesserte Wärmeableitungseffizienz auf (Wärmewiderstand  $0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \pm 0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prüfnorm ASTM E1461), eine Temperaturbeständigkeit von  $1400\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $100\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), eine Lebensdauer von 9000 Stunden (Spitze 9500 Stunden  $\pm 500$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und sind besonders für das Wärmemanagement geeignet (Leistungsdichte  $10\text{ W/cm}^2 \pm 1\text{ W/cm}^2$ ). Die Wärmeverteilung wird durch eine Mikrokanalstruktur (Kanaldurchmesser  $0,5\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ , Dichte  $20/\text{cm}^2 \pm 2 / \text{cm}^2$ ) und eine Beschichtung mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z. B. Ag, Dicke  $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ , Leitfähigkeit  $10^8\text{ S/m} \pm 10^7\text{ S/m}$ ) optimiert (Temperaturabfall  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ). Es wird durch Plasmaspritzen hergestellt (Spritzgeschwindigkeit  $300\text{ m/s} \pm 20\text{ m/s}$ ) und hat eine Druckfestigkeit von  $1300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E9). Es wird häufig in der Fusionsanlage KSTAR in Südkorea verwendet. Zukünftig kann der Mikrokanal durch Laserauftragsschweißen (Leistung  $1,5\text{ kW} \pm 0,2\text{ kW}$ ) optimiert werden, um die Lebensdauer auf  $10.000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  zu verlängern

## Hochtemperaturöfen und Wärmebehandlungsanlagen

### Hartmetall-Heizelemente

Komponenten aus einer Wolframkarbid-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6\text{--}10\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) können in einem Hochtemperaturofen  $1600\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$  standhalten (Wärmeleitfähigkeit  $55\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), haben eine Lebensdauer von 10.000 Stunden (Spitze 11.000 Stunden  $\pm 1.000$  Stunden, Prüfnorm ASTM E9) und eine Effizienzverbesserung von  $10\text{ \%}$  (thermischer Wirkungsgrad  $85\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ , gemessen mit einem Wärmeflussmesser) und sind besonders für die Wärmebehandlung von Metallen geeignet (Heizrate  $10\text{ °C/min} \pm 1\text{ °C/min}$ ). Die Haltbarkeit (Wärmezyklusbeständigkeit -  $50\text{ °C}$  bis  $1600\text{ °C}$ ,  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) und die thermische Stabilität (Wärmeausdehnungskoeffizient  $5 \times 10^{-6}/\text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ ) werden durch eine Antioxidationsbeschichtung (wie etwa  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1800\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$ , Wärmewiderstand  $0,5\text{ m}^2\cdot\text{K/W} \pm 0,05\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ ) und eine poröse Struktur (Porosität  $10\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$ , Porengröße  $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ ) verbessert. Es wird durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ ) mit einer Zugfestigkeit von  $1100\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8) hergestellt. Es wird häufig in Siemens-Wärmebehandlungsöfen in Deutschland verwendet und die Lebensdauer kann durch eine PVD-ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) zukünftig auf  $12.000\text{ Stunden} \pm 1.000\text{ Stunden}$  verlängert werden.

### Wolframkarbid-

Kobalt-Titan (WC-Co- TiC, Co-Gehalt  $6\text{--}10\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$ , TiC- Gehalt  $2\text{--}5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$ , WC-Partikelgröße  $0,5\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0\text{--}15,4\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) – Wärmedämmplatten halten im Wärmebehandlungsofen  $1800\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$  stand (Wärmeleitfähigkeit  $50\text{ W/m}^2\text{K} \pm 5\text{ W/m}^2\text{K}$ ), der Wärmewiderstand ist um  $35\text{ \%}$  verbessert (Wärmewiderstand  $0,6\text{ m}^2\cdot\text{K/W} \pm 0,05\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ , Prüfnorm ASTM E1461), die Lebensdauer beträgt bis zu  $12.000\text{ Stunden}$  (Spitze  $13.000\text{ Stunden} \pm 1.000\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), besonders geeignet für Hochtemperaturdämmung (Temperatur  $1700\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$ ). Durch Gradientenmaterialdesign (Co-Gehaltsgradient  $0,5\text{ \%}\text{--}1\text{ \%}/\text{mm}$ , Dicke  $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ ) und Wärmedämmschicht (wie HfO<sub>2</sub>, Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $2000\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$ ), die thermische Ermüdungsbeständigkeit (Wärmezyklusbeständigkeit  $-50\text{ °C}$  bis  $1800\text{ °C}$ ,  $1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$ ) ist optimiert. Es wird durch

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) mit einer Druckfestigkeit von  $1400\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E9) hergestellt. Es wird häufig in GE-Hochtemperaturöfen in den USA verwendet. Zukünftig kann die Porenstruktur durch Laseroberflächenbehandlung (Leistung  $2\text{ kW} \pm 0,2\text{ kW}$ ) optimiert werden, um die Lebensdauer auf  $14.000\text{ Stunden} \pm 1000\text{ Stunden}$  zu verlängern.

#### **Die verschleißfeste Hartmetallauskleidung aus**

einer Wolframkarbid-Nickel-Legierung (WC-Ni, Ni-Gehalt  $12\text{--}15\% \pm 1\%$ , WC-Partikelgröße  $0,8\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $14,9\text{--}15,3\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) weist eine Lebensdauer von  $8000\text{ Stunden}$  (Spitze  $8500\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) im Hochtemperaturofen auf, reduziert die Verschleißrate um  $15\%$  (Verschleißtiefe  $< 0,02\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$ , Prüfnorm ASTM G65) und eignet sich besonders für den Keramikbrand (Brenntemperatur  $1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Durch Oberflächenmodifizierung (Härtungsschichttiefe  $0,3\text{ mm} \pm 0,03\text{ mm}$ , Härte  $\text{HV } 2000 \pm 50$ ) und korrosionsbeständige Beschichtung (z. B.  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , Schichtdicke  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Beständigkeit gegen  $10\%$  NaCl, Gewichtsverlust  $< 0,03\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ ) wird die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate  $< 0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,005\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) verbessert. Die Herstellung erfolgt im Plasmaspritzverfahren (Spritzgeschwindigkeit  $300\text{ m/s} \pm 20\text{ m/s}$ ), die Zugfestigkeit beträgt  $1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8). Es wird häufig in japanischen Keramiköfen verwendet und die Lebensdauer kann in Zukunft durch eine PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) auf  $9000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  verlängert werden.

#### **Der Hartmetall-Rührflügel aus einer**

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,2\text{--}15,6\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$ ) ist in einem Hochtemperaturreaktor bis  $1400^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  belastbar (Wärmeleitfähigkeit  $50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), hat eine Lebensdauer von  $7000\text{ Stunden}$  (Spitzenwert  $7500\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9) und eignet sich besonders für hochviskose Schmelzen (Viskosität  $500\text{ cP} \pm 50\text{ cP}$ , Rührgeschwindigkeit  $100\text{ U/min} \pm 10\text{ U/min}$ ). Durch eine Mehrlagenbeschichtung (z. B. TiCN, Dicke  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ , Temperaturbeständigkeit  $1500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ) und eine Antioxidationsbehandlung ( $10\%$   $\text{O}_2$ -Gewichtsverlustbeständigkeit  $< 0,03\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ ) wird die Rühreffizienz optimiert (Effizienzsteigerung um  $15\%$ , nachgewiesen durch Durchflussmessung, Durchflussrate  $10\text{ m/s} \pm 1\text{ m/s}$ ). Es wird durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1400^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) hergestellt und hat eine Torsionsfestigkeit von  $1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E8). Es wird häufig in Chemiereaktoren der BASF in Deutschland eingesetzt. Durch eine PVD  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Beschichtung (Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) kann die Lebensdauer zukünftig auf  $8000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$  verlängert werden.

### **Anwendungsfälle von Hartmetallwerkstoffen in Kernreaktorausrüstungen**

#### **Hartmetall-Druckbehälterauskleidung in Kernreaktoren.**

Hartmetall-Druckbehälterauskleidungen in Kernreaktoren haben eine Lebensdauer von  $12.000\text{ Stunden}$  (Spitze  $13.000\text{ Stunden} \pm 1.000\text{ Stunden}$ , Prüfnorm ASTM E9), eine ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit ( $10^7\text{ Rad/h}$  Dämpfungsrate  $99,9\% \pm 0,1\%$ , Prüfnorm ASTM E666), reduzierte Wartungskosten um  $15\%$  (Kostenreduzierung auf  $500.000\text{ USD/Jahr} \pm 50.000\text{ USD/Jahr}$ ,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Statistiken durch Wartungsaufzeichnungen), optimiert durch mehrschichtige WC-Co- und B<sub>4</sub>C-Struktur (Dicke 10 mm ± 1 mm). Weit verbreitet im Kernkraftwerk Flamanville in Frankreich.

#### **Die Lebensdauer des Hartmetall-Erstwandmaterials in Kernfusionsanlagen**

beträgt bis zu 8.000 Stunden (Spitzenwert 8.500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), die Oberflächenerosionsrate wird um 15 % reduziert (Erosionstiefe < 0,02 mm ± 0,005 mm, Prüfnorm ASTM G65), die Anlagenzuverlässigkeit wird verbessert (Ausfallrate < 0,5 % ± 0,1 %) und die ZrO<sub>2</sub>-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm) verbessert. Es wird häufig in der EU-JET-Fusionsanlage verwendet.

#### **Hartmetall-Kühlrohre in Kernreaktoren**

haben eine Lebensdauer von 11.000 Stunden (Spitze 12.000 Stunden ± 1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), eine 12 % höhere thermische Effizienz (Wärmetauschereffizienz 90 % ± 5 %, Prüfnorm ASTM E1461) und gewährleisten die Stabilität des Kühlsystems (Temperaturschwankungen < 5 °C ± 1 °C), die durch das Mikrokanaldesign (Kanaldichte 10/cm<sup>2</sup> ± 1/cm<sup>2</sup>) optimiert wird. Weit verbreitet im chinesischen Kernkraftwerk Tianwan.

#### **von Hartmetall-Heizelementen in Hochtemperaturöfen**

beträgt bis zu 10.000 Stunden (Spitze 11.000 Stunden ± 1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), der Wirkungsgrad wird um 10 % erhöht (thermischer Wirkungsgrad 85 % ± 5 %, Prüfnorm ASTM E1461), der Energieverbrauch der Wärmebehandlung wird reduziert (Energieverbrauch wird auf 800 kWh/Tonne ± 50 kWh/Tonne reduziert) und dies wird durch eine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Beschichtung (Dicke 10 µm ± 1 µm) optimiert. Es wird häufig in Siemens-Wärmebehandlungsöfen in Deutschland eingesetzt.

#### **Hartmetall-Abschirmplatten in der nuklearen Abfallbehandlung**

haben eine Lebensdauer von 15.000 Stunden (Spitze 16.000 Stunden ± 1.000 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), eine um 20 % höhere Gammastrahlenabschirmung (Durchlässigkeit < 0,05 % ± 0,01 %, Prüfnorm ASTM E666), einen verbesserten Strahlenschutz (Strahlendosis reduziert auf 10<sup>4</sup> rad/h ± 10<sup>3</sup> rad/h) und sind durch eine mehrschichtige WC-12Co4Cr- und B<sub>4</sub>C-Struktur (Dicke 10 mm ± 1 mm) optimiert. Sie werden häufig in der nuklearen Abfallbehandlungsanlage Sellafield in Großbritannien eingesetzt.

#### **Die Lebensdauer des Hartmetall-Rührpaddels im Hochtemperaturreaktor**

beträgt bis zu 7000 Stunden (Spitzenwert 7500 Stunden ± 500 Stunden, Prüfnorm ASTM E9), die Rührleistung wird um 15 % erhöht (Fließgeschwindigkeit 10 m/s ± 1 m/s, Prüfnorm ASTM D445) und die Wartungshäufigkeit wird durch die Optimierung der TiCN-Beschichtung (Dicke 5 µm ± 1 µm) um 15 % reduziert (Wartungszyklus 12 Monate ± 1 Monat). Es wird häufig in Chemiereaktoren der BASF in Deutschland eingesetzt.

### **13.3.3 Schneidwerkzeuge und Werkzeuge für die Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen**

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

## Leistungsmerkmale und technische Vorteile von Schneidwerkzeugen und Werkzeugen für die Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen

Die Härte von Hartmetallwerkzeugen erreicht HV 2000-2500±30 (Vickers-Härtetest ISO 6507-1 bestanden, Belastung 10 kg, Prüfzeit 10-15 Sekunden, Prüfgenauigkeit ±0,5%), die Schnittgeschwindigkeit liegt bei 300-400 m/min (Spitzenwert kann 430 m/min±20 m/min erreichen, abhängig vom Material und den Kühlbedingungen, wie z. B. Trockenschneiden oder Kühlen mit 15 l/min Schneidflüssigkeit), und die Verschleißfestigkeit liegt bei <math>0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}</math> (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Belastung 10 N±1 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s±0,01 m/s, Prüfzyklus 1000 Mal), was Keramikwerkzeugen weit überlegen ist (Schnittgeschwindigkeit 150 m/min±10 m/min, Verschleißfestigkeit ca.  $0,10 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ). Bei der Bearbeitung hochradioaktiver Materialien (z. B. Uranlegierungen, Radioaktivität <math><10^4 \text{ Bq/g} \pm 10^3 \text{ Bq/g}</math>) oder hochwarmfester Legierungen (z. B. Inconel 718, Härte HV 450±20) kann die Standzeit des Werkzeugs 350 Stunden erreichen (Spitze 380 Stunden±30 Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,6 mm±0,05 mm, Vorschub 0,12 mm/U±0,01 mm/U), die Schnittkraft wird um 20 % reduziert (gemessen mit einem Schnittkraftmessgerät, reduziert auf 100 N±10 N, Drehmomentschwankung <math><5\%</math>), der Reibungskoeffizient ist niedrig <math><0,18</math> (Prüfnorm ASTM G133, Reibpartner ist Stahlkugel, Belastung 5 N±0,5 N, Gleitweg 100 m±10 m) und die Toleranzanforderung von ±0,006 mm wird eingehalten (überprüft durch Interferometer, Auflösung 0,001 mm, Messwiederholgenauigkeit <math><0,0015 \text{ mm}</math>), wodurch hochpräzise Verarbeitungsanforderungen insbesondere bei komplexen Geometrien und dünnwandigen Teilen gewährleistet werden. Die Verformungsbeständigkeit von Hartmetallwerkzeugen liegt bei >1000 MPa (Zugfestigkeitstest ASTM E8, Probengröße 10 mm × 10 mm × 50 mm, Dehnung <math><1\%</math>), und sie können bei einer hohen Temperatur von 1200 °C ± 20 °C immer noch eine Härte von 80 % aufrechterhalten (HV 2000 reduziert auf 1600 ± 50, gemessen durch thermomechanische Analyse TMA, Heizrate 5 °C/min, Haltetemperatur für 2 Stunden), die Bindungsfestigkeit beträgt 70 – 90 MPa (Schertest ASTM D1002, Scherfläche 100 mm<sup>2</sup> ± 5 mm<sup>2</sup>), und die Korrosionsbeständigkeit und Strahlungsbeständigkeit sind besser als bei herkömmlichen Werkzeugstählen (wie AISI H13, Gewichtsverlustbeständigkeit gegenüber 5 % NaCl-Lösung <math><0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2</math>, Strahlungsbeständigkeit <math><10^5 \text{ rad/h}</math>).

Die Haltbarkeit (Lebensdauer um 25 % auf 430 Stunden ± 30 Stunden verlängert), die Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer > 10<sup>6</sup> Zyklen, Spannungsamplitude 350 MPa ± 30 MPa, Prüfnorm ASTM E466) und die Hochtemperaturleistung (Beständigkeit bis 1300°C ± 50°C, thermische Zykluslebensdauer > 6000 Mal, -200°C bis 1300°C, 100 Zyklen) wurden durch Oberflächenmodifizierung (z. B. PVD-Beschichtung, TiAlN-Dicke 10-15 µm ± 1 µm, Haftung > 50 MPa, Abscheidungstemperatur 900°C ± 20°C), Nanobeschichtung (z. B. CrN, Partikelgröße <math><100 \text{ nm}</math>, Härte HV 2200 ± 100, Dicke 5-10 µm ± 0,5 µm) und Wärmebehandlung (Abschrecken 1250 °C ± 20 °C, Halten für 1 Stunde; Anlassen 650 °C ± 10 °C, 2 Stunden). Diese Eigenschaften machen es gut geeignet für hochpräzise, hochbelastete Anwendungen in der Nuklearindustrie und in Hochtemperaturumgebungen, insbesondere bei der Verarbeitung von Wolframlegierungen, Molybdänlegierungen und radioaktiven Materialien. In Zukunft kann die Laser-

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenumschmelztechnologie eingesetzt werden, um die Mikrostruktur zu optimieren (Kornverfeinerung auf  $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$ , Röntgenbeugungsanalyse (XRD), die Verschleißfestigkeit auf  $0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und durch die Einführung von Seltenerdelementen (wie  $\text{CeO}_2$ , Gehalt  $0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) die Strahlungsbeständigkeit zu verbessern und die Lebensdauer auf  $500 \text{ Stunden} \pm 30 \text{ Stunden}$  zu verlängern, während gleichzeitig die Produktionskosten um etwa  $12 \%$  gesenkt werden (durch Reduzierung der Menge an Beschichtungsmaterialien).



Hartmetall-Wendeschneidplatten

## Produktkategorien von Schneidwerkzeugen und Werkzeugen für die Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen

### Hartmetall-Schneidwerkzeuge für Industrie- und Hochtemperaturanwendungen

#### Wolframkarbid-

Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6 \% - 10 \% \pm 1 \%$ , WC-Partikelgröße  $0,5 - 1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte  $15,0 - 15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) Hartmetallbohrer haben eine Schnittgeschwindigkeit von  $250 \text{ m/min}$  (Spitze  $270 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,1 \text{ mm/U} \pm 0,01 \text{ mm/U}$ , axiale Schnitttiefe  $0,4 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ ) in der Kernbrennstoffverarbeitung, eine Lebensdauer von  $350 \text{ Stunden}$  (Spitze  $380 \text{ Stunden} \pm 30 \text{ Stunden}$ , Prüfnorm ISO 8688-2), eine Oberflächenrauheit  $Ra 0,25 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (gemessen mit Oberflächenprofilometer, Schnittlänge  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) und sind besonders geeignet für radioaktive Materialien (wie Uranlegierungen, Radioaktivität  $<10^4 \text{ Bq/g} \pm 10^3 \text{ Bq/g}$ ). Hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS,  $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ,  $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$  Wärmeerhaltung), mit einer Porosität von  $<0,1 \% \pm 0,01 \%$  (gemessen mit der Quecksilberpenetrationsmethode, Porengröße  $<1 \mu\text{m}$ ), ausgezeichneter Strahlungsbeständigkeit (Dämpfungsrate von  $99,5 \% \pm 0,1 \%$  bei  $10^6 \text{ rad/h}$ , Prüfnorm ASTM E666), wodurch hochpräzises Bohren gewährleistet wird

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Durchmessertoleranz  $\pm 0,006$  mm, Rundheitsfehler  $< 0,004$  mm). Weit verbreitet im japanischen Kernbrennstoffaufbereitungswerk Fukushima (Porendurchmesser  $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , Lochtiefe  $15 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$ , Steigerung der Verarbeitungseffizienz um 15 %). In Zukunft kann die Lebensdauer durch eine PVD- CrN- Beschichtung (Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ , Härte  $\text{HV } 2200 \pm 100$ ) auf  $400 \text{ Stunden} \pm 30 \text{ Stunden}$  verlängert und die Schnittkraft durch ultraschallunterstützte Bohrtechnologie um 15 % (auf  $85 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ ) reduziert werden.

### Hartmetallfräser aus

Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,2-15,6 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) reduzieren Defekte um 40 % bei der Verarbeitung von Hochtemperaturlegierungen (Defektrate auf  $< 0,5 \%$  reduziert, verifiziert durch Röntgendetektion, Detektionsenergie  $100 \text{ kV} \pm 10 \text{ kV}$ ), Schnitttiefe  $6 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , Schnittgeschwindigkeit  $300 \text{ m/min} \pm 20 \text{ m/min}$ , Vorschub  $0,15 \text{ mm/Zahn} \pm 0,01 \text{ mm/Zahn}$ , Oberflächenrauheit  $\text{Ra } 0,3 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schnittlänge  $20 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ), besonders geeignet für Inconel 718 (Härte  $\text{HV } 450 \pm 20$ , Temperaturbeständigkeit  $700 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Es wird durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Haltezeit 2–4 Stunden) hergestellt und hat eine Biegefestigkeit von  $1900 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$  (Prüfnorm ASTM E290, Probengröße  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ) und eine Lebensdauer von  $600 \pm 50 \text{ Stunden}$  (Spitzenwert  $650 \pm 50 \text{ Stunden}$ ). Es wird häufig in GE-Flugzeugtriebwerksverarbeitungsanlagen in den USA eingesetzt. Zukünftig kann die Laserauftragschweißtechnologie (Auftragschweißgeschwindigkeit  $500 \text{ mm/min} \pm 50 \text{ mm/min}$ , Leistung  $2 \text{ kW} \pm 0,2 \text{ kW}$ ) zur Optimierung der Kantenschärfe (Kantenradius  $< 10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ) eingesetzt werden und durch die Einführung selbstschmierender Beschichtungen (wie  $\text{MoS}_2$ , Dicke  $2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$ ) der Reibungskoeffizient auf  $0,15 \pm 0,02$  gesenkt werden.

### Hartmetall-Umformwerkzeuge

#### Wolframkarbid

-Kobalt-Legierung (WC-Co, Co-Gehalt  $6 \text{ \%} - 10 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$ , WC-Partikelgröße  $0,5 - 1,5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , Dichte  $15,0 - 15,4 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ ) aus Hartmetall-Stanzformen weist eine Genauigkeit von  $\pm 0,006 \text{ mm}$  bei der Verarbeitung von Kernkomponenten auf (überprüft durch dreidimensionale Koordinatenmessmaschine CMM, Messbereich  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ), eine Lebensdauer von 15.000-mal (Spitze 16.000-mal  $\pm 1.000$ -mal, Prüfnorm ASTM E9) und eine Druckfestigkeit von  $800 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$  (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate  $1 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$ ), die sich besonders für dünnwandige Strukturen eignet (Wandstärke  $1 - 2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ ). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP,  $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ , Haltezeit 2–4 Stunden), Härte  $\text{HV } 1900 \pm 50$  (Prüfnorm ISO 6507-1), wodurch der Materialabfall um 20 % reduziert wird. Wird häufig bei der Verarbeitung von Komponenten des chinesischen Kernkraftwerks Huaneng verwendet. In Zukunft kann eine Nanobeschichtung (z. B.  $\text{TiAlN}$ , Dicke  $10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf  $0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf das 18.000-fache  $\pm 1.000$ -fache zu verlängern.

#### Wolframkarbid-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße 1–3  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ , Dichte 15,2–15,6  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) Ziehstein hat eine Lebensdauer von 7000-mal (Spitze 7500-mal  $\pm 500$ -mal, Prüfnorm ASTM E9) bei der Hochtemperatur-Rohrumformung, gleichmäßige Dicke  $<3 \mu\text{m}$  (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Zugfestigkeit 1600 MPa  $\pm 50$  MPa (Prüfnorm ASTM E8), besonders geeignet für nahtlose Rohre (Rohrdurchmesser 600 mm  $\pm 50$  mm). PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2500  $\pm 100$ , Haftung  $> 40$  MPa), Temperaturbeständigkeit 850  $^{\circ}\text{C} \pm 20$   $^{\circ}\text{C}$  (Wärmeleitfähigkeit 50  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ), reduziert Formfehler um 15 %. Sie wird häufig im russischen Hochtemperatur-Pipeline-Projekt Transneft eingesetzt. Zukünftig kann die Formgeometrie durch 3D-Drucktechnologie (Druckgenauigkeit 0,05 mm  $\pm 0,005$  mm) optimiert werden, um die Lebensdauer auf das 8000-fache  $\pm 500$ -fache zu erhöhen.

## Hartmetallwerkzeuge

### Hartmetallstempel

aus Wolframkarbid-Kobaltlegierung (WC-Co, Co-Gehalt 6–10 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,5–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,0–15,4  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ ) reduziert den Abfall beim Formen von Nuklearausrüstungen um 30 % (Materialausnutzungsgrad wird auf 70 %  $\pm 5$  % erhöht, durch Gewichtsmessung überprüft), Druckfestigkeit 900 kN  $\pm 50$  kN (Prüfstandard ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm 0,1$  mm/min), Lebensdauer 6000-mal  $\pm 500$ -mal (Prüfstandard ASTM E9), Genauigkeit  $\pm 0,006$  mm (überprüft durch CMM, Messbereich 100 mm  $\square$  100 mm  $\square$  100 mm). Hergestellt durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 $^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ , 200 MPa  $\pm 10$  MPa, Haltezeit 2-4 Stunden), Härte HV 1900  $\pm 50$  (Prüfnorm ISO 6507-1), besonders geeignet für hochpräzises Stanzen (Stanztiefe 12 mm  $\pm 1$  mm). Wird häufig in Nuklearanlagen von Westinghouse in den USA verwendet. Zukünftig kann durch eine PVD-Beschichtung (z. B. CrN, Dicke 10  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) die Lebensdauer auf das 7000-fache  $\pm 500$ -fache verlängert werden.

### Wolframkarbid

-Titan (WC- TiC, TiC- Gehalt 5–10 %  $\pm 1$  %, WC-Partikelgröße 0,8–1,5  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ , Dichte 15,1–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{g}/\text{cm}^3$ )-Schleifscheiben haben eine Oberflächenrauheit von Ra 0,12  $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  bei Hochtemperaturteilen (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge 20 mm  $\pm 2$  mm), eine Standzeit von 700 h (Spitze 750 h  $\pm 50$  h, Prüfnorm ISO 3685), eine Schleifgeschwindigkeit von 120 m/s  $\pm 10$  m/s und sind besonders für Präzisionsoberflächen geeignet (Oberfläche 12  $\text{cm}^2 \pm 1 \text{cm}^2$ ). PVD- TiN-Beschichtung (Dicke 5  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ , Härte HV 2000  $\pm 50$ , Haftung  $> 40$  MPa), Zugfestigkeit 1400 MPa  $\pm 50$  MPa (Prüfnorm ASTM E8), 6 % weniger Oberflächendefekte. Wird häufig bei der Verarbeitung deutscher Hochtemperaturkomponenten von Siemens eingesetzt. In Zukunft kann eine Nanobeschichtung (wie SiC, Partikelgröße  $< 50$  nm, Dicke 5–10  $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ ) verwendet werden, um die Verschleißfestigkeit auf 0,015  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  zu verbessern und die Lebensdauer auf 800 Stunden  $\pm 50$  Stunden zu verlängern.

**Anwendungsfälle für Hartmetall-Schneidwerkzeuge in industriellen Hochtemperaturumgebungen**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Hartmetallfräser bei der Verarbeitung von Hochtemperaturlegierungen**

Hartmetallfräser bei der Verarbeitung von Hochtemperaturlegierungen reduzieren Defekte um 40 % (Defektrate auf <0,5 % reduziert, verifiziert durch Röntgenerkennung, Erkennungsenergie 100 kV  $\pm$  10 kV, Sondendurchmesser 10 mm  $\pm$  1 mm), Effizienz um 20 % erhöht (Bearbeitungszeit auf 80 %  $\pm$  5 % reduziert, verifiziert durch Zeitmessung, Verarbeitungslänge 600 mm  $\pm$  50 mm), Dicke 70–100  $\mu$ m (bestimmt durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Inspektion alle 70 Stunden (Verschleißrate <0,015 mm<sup>3</sup>/N·m, Prüfnorm ASTM G65), Gewährleistung der Verarbeitungsgenauigkeit (Toleranz  $\pm$  0,006 mm). Es verwendet eine TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2500 $\pm$ 100, Haftung > 40 MPa), Schnittgeschwindigkeit 300 m/min $\pm$ 20 m/min, Vorschubgeschwindigkeit 0,15 mm/Zahn $\pm$ 0,01 mm/Zahn, Kühlmittelfluss 15 l/min $\pm$ 1 l/min und wird häufig in GE-Flugzeugtriebwerksverarbeitungsanlagen in den Vereinigten Staaten verwendet.

### **von Hartmetall-Ziehmatrizen**

bei der Hochtemperatur-Rohrumformung beträgt bis zu 7000-mal (Spitzenwert 7500-mal  $\pm$  500-mal, Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm$  0,1 mm/min), Schmiertemperatur < 80 °C (Schmiermittelviskosität 8 cSt  $\pm$  1 cSt, Schmierdruck 5 bar  $\pm$  0,5 bar), Dickengleichmäßigkeit < 3  $\mu$ m (gemessen durch Laserscanning, Scangenaugigkeit 0,001 mm), Zugfestigkeit 1600 MPa  $\pm$  50 MPa (Prüfnorm ASTM E8), was besser ist als bei herkömmlichen Formen (Dickenausweichung 8  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m) und 15 % weniger Umformungsfehler (Fehlerrate < 0,5 %). PVD-TiAlN-Beschichtung (Dicke 10  $\mu$ m  $\pm$  1  $\mu$ m, Härte HV 2500  $\pm$  100), Prüfung alle 1000 Mal (Verschleißrate < 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m), wird häufig in Hochtemperatur-Pipeline-Projekten des russischen Unternehmens Transneft verwendet.

### **Hartmetallbohrer in der Kernbrennstoffverarbeitung**

haben eine Lebensdauer von 350 Stunden (Spitzenwert 380 Stunden  $\pm$  30 Stunden, Prüfnorm ISO 8688-2, Schnitttiefe 0,6 mm  $\pm$  0,05 mm), Schnittgeschwindigkeit 250 m/min (Spitzenwert 270 m/min  $\pm$  10 m/min, Vorschub 0,1 mm/U  $\pm$  0,01 mm/U), 15 L/min Kühlmittel (gemessen mit Kühlmitteldurchflussmesser, Temperatur 20°C  $\pm$  2°C), reduzierten Energieverbrauch bei der Verarbeitung (Energieverbrauch reduziert auf 700 kWh/m  $\pm$  50 kWh/m), hergestellt durch Spark-Plasma-Sintern (SPS, 1400°C  $\pm$  10°C), Genauigkeit  $\pm$  0,006 mm (überprüft durch CMM), ausgezeichnete Strahlungsbeständigkeit (10<sup>6</sup> rad/h Dämpfungsrate 99,5%  $\pm$  0,1 %). Wird häufig im japanischen Kernbrennstoffwerk Fukushima verwendet.

### **Hartmetallstempel bei der**

Umformung von Nuklearanlagen reduzieren den Abfall um 30 % (Materialausnutzungsgrad steigt auf 70 %  $\pm$  5 %, verifiziert durch Gewichtsmessung), Druckfestigkeit 900 kN  $\pm$  50 kN (Prüfnorm ASTM E9, Belastungsrate 1 mm/min  $\pm$  0,1 mm/min), Lebensdauer 6000-fach (Spitze 6500-fach  $\pm$  500-fach, Prüfnorm ASTM E9), Genauigkeit  $\pm$  0,006 mm (verifiziert durch KMG, Messbereich 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  100 mm), Herstellung durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1350 °C  $\pm$  20 °C), Reduzierung der Rissrate um 20 % (Rissrate < 0,5 %). Weit verbreitete Verwendung in Nuklearanlagen von Westinghouse in den USA.

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

### Hartmetall-Schleifwerkzeuge für Hochtemperaturteile

Hartmetall-Schleifwerkzeuge für Hochtemperaturteile haben eine Oberflächenrauheit von  $Ra\ 0,12\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287, Schleiflänge  $20\ \text{mm} \pm 2\ \text{mm}$ ), eine Lebensdauer von 700 Stunden (Spitze 750 Stunden  $\pm 50$  Stunden, Prüfnorm ISO 3685), eine Schleifgeschwindigkeit von  $120\ \text{m/s} \pm 10\ \text{m/s}$ , eine Genauigkeit von  $\pm 0,006\ \text{mm}$  (überprüft durch CMM), eine PVD- TiN-Beschichtung (Dicke  $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ), eine 6 %ige Reduzierung von Oberflächenkratzern (Kratzrate  $< 0,4\ \% \pm 0,1\ \%$ ) und eine Temperaturbeständigkeit von  $1200\ ^\circ\text{C} \pm 20\ ^\circ\text{C}$ . Wird häufig bei der Verarbeitung von Hochtemperaturteilen von Siemens in Deutschland verwendet.



### 13.3.4 Fertigungstechnologie und Prozessoptimierung für Hartmetall

#### Pulvermetallurgie und Sintern

##### Heißpressen (HP)

Durch Heißpressen (HP) bei  $1500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$  (Heizrate  $5\ ^\circ\text{C}/\text{min} \pm 0,5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ , Haltezeit  $30\ \text{min} \pm 5\ \text{min}$ ) und  $70\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$  Druck wird die Korngröße auf  $0,3\text{--}0,7\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$  reguliert (bestimmt durch Rasterelektronenmikroskopie SEM, Vergrößerung 5000 $\times$ , Auflösung  $0,1\ \mu\text{m}$ ), die Härte wird um 20 % erhöht (HV 2000 steigt auf  $2400 \pm 50$ , Prüfnorm ISO 6507-1), die Dichte wird  $99,98\ \% \pm 0,01\ \%$  erreicht (bestimmt durch Archimedes-Methode), die Porosität  $< 0,05\ \% \pm 0,01\ \%$  (bestimmt durch Quecksilberpenetrationsmethode, Porengröße  $< 0,5\ \mu\text{m}$ ). Durch Zugabe von Tantalkarbid (TaC, Gehalt  $0,8\%\text{--}1,5\% \pm 0,1\%$ , Partikelgröße  $0,5\ \mu\text{m} \pm 0,05\ \mu\text{m}$ ) wird die Bruchzähigkeit ( $K_{1c}$ ) deutlich auf  $18\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$  verbessert (Prüfnorm ASTM E399, Probengröße  $10\ \text{mm} \times 20\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ ), die Rissbeständigkeit optimiert (Risswachstumsrate

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<10^{-6}\text{m}/\text{Zyklus} \pm 10^{-7}\text{m}/\text{Zyklus}$ , Ermüdungstest ASTM E647). Es wird in einem Vakuumsinterofen (Vakuumgrad  $10^{-3}\text{Pa} \pm 10^{-4}\text{Pa}$ ) hergestellt, reduziert 5 % der oxidierten Verunreinigungen (Sauerstoffgehalt  $<0,02\% \pm 0,005\%$ ) und wird häufig bei der Herstellung von Kernreaktorauskleidungen verwendet. Zukünftig kann durch gepulstes elektrisches Feld unterstütztes Sintern (PEAS, Stromdichte  $100\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10\text{A}/\text{cm}^2$ ) die Korngröße weiter auf  $0,2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$  verfeinert, die Härte auf  $2500\text{HV} \pm 50$  erhöht und der Energieverbrauch um 10 % gesenkt werden.



## Additive Fertigung (AM)

### Selektives Laserschmelzen (SLM) Durch

Selektives Laserschmelzen (SLM) werden  $99,95\% \pm 0,02\%$  Dichte (bestimmt durch Röntgentomografie CT, Auflösung  $5\ \mu\text{m}$ ) und  $2000\text{MPa} \pm 50\text{MPa}$  Zugfestigkeit (Prüfnorm ASTM E8, Probengröße  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 50\text{mm}$ ) bei  $300\text{W} \pm 10\text{W}$  Leistung (Laserwellenlänge  $1064\text{nm} \pm 10\text{nm}$ , Scangeschwindigkeit  $800\text{mm}/\text{s} \pm 50\text{mm}/\text{s}$ ) und  $20\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$  Schichtdicke erreicht. Durch Vorwärmen auf  $700\text{°C} \pm 20\text{°C}$  (Heizrate  $10\text{°C}/\text{min} \pm 1\text{°C}/\text{min}$ ) werden thermische Risse (Risslänge  $<0,01\text{mm} \pm 0,001\text{mm}$ , Prüfnorm ASTM E112) und Restspannungen  $<100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$  (bestimmt durch Röntgenbeugung XRD, Restspannungsgradient  $<20\text{MPa}/\text{mm}$ ) effektiv reduziert und die Eigenspannung des Bauteils optimiert (Spannungskonzentrationsfaktor  $<1,5 \pm 0,1$ ). Die Herstellung erfolgt unter Stickstoffschutzatmosphäre (Reinheit  $99,999\% \pm 0,001\%$ ), wodurch die Oberflächenoxidation um 3 % reduziert wird (Sauerstoffgehalt  $<0,01\% \pm 0,002\%$ ). Das Produkt eignet sich für Kernkomponenten mit komplexer Geometrie (z. B. Kühlrohre). In Zukunft kann die Dual-Laserstrahl-Technologie (Leistung  $350\text{W} \pm 10\text{W}$ , Scangeschwindigkeit  $1000\text{mm}/\text{s} \pm 50\text{mm}/\text{s}$ ) eingesetzt werden, um die Dichte auf  $99,98\% \pm 0,01\%$  und die Zugfestigkeit auf  $2200\text{MPa} \pm 50\text{MPa}$  zu erhöhen und die Formzeit um 15 % zu verkürzen.

Oberflächenbehandlung

### Hochenergie-Plasmaspritzen (HPS)

Hochenergie-Plasmaspritzen (HPS) wird zum Beschichten einer Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, WC-Partikelgröße  $1-3\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$ , Co-Gehalt  $12\% \pm 1\%$ , Cr-Gehalt  $4\% \pm 0,5\%$ , Dichte  $15,2-15,6\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{g}/\text{cm}^3$ ) bei einer Geschwindigkeit von  $>1300\text{m}/\text{s} \pm 10$

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m/s (Sprühdistanz 100 mm ± 5 mm, Leistung 40 kW ± 2 kW) verwendet. Die Beschichtungsdicke beträgt 70–250 μm ± 1 μm (bestimmt durch Dickenmessgerät, Genauigkeit 1 μm), die Härte erreicht HV 1400 ± 30 (Prüfnorm ISO 6507-1) und die Verschleißfestigkeit beträgt 0,015 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m (Prüfnorm ASTM G65, Schleifscheiben-Verschleißtest, Last 10 N ± 1 N). Die Beschichtung hat eine Haftung von >50 MPa (Zugtest ASTM D4541), eine hohe Temperaturbeständigkeit von 1200°C ± 20°C (Wärmeleitfähigkeit 40 W/m·K ± 5 W/m·K) und reduziert das Ablösen der Oberfläche um 10 % (Ablösefläche < 1 % ± 0,2 %). Es wird mit einem Argon-/Wasserstoff-Mischgas (Argondurchflussrate 50 l/min ± 2 l/min, Wasserstoffdurchflussrate 5 l/min ± 0,5 l/min) gesprüht und findet breite Anwendung zum Oberflächenschutz von Ventilkörpern in der Kerntechnik. Zukünftig kann ultraschallunterstütztes Sprühen (Frequenz 20 kHz ± 2 kHz, Amplitude 10 μm ± 1 μm) eingesetzt werden, um die Dichte der Beschichtung zu verbessern (Porosität < 0,01 % ± 0,005 %), und die Verschleißfestigkeit kann auf 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,005 mm<sup>3</sup>/N·m reduziert werden.



### 13.3.5 Herausforderungen und Einschränkungen

#### Kosten und Gewicht von Hartmetall

Die Materialkosten betragen 150–180 USD/kg ± 10 USD/kg (basierend auf Marktdaten vom Juli 2025, WC-Co-Pulverpreis) und die Dichte beträgt 15,0–15,6 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>, was die Anwendung im großen Maßstab einschränkt (das Volumengewicht ist 20±2 % höher als bei Stahl) und den Transportaufwand erhöht (die Transportkosten machen 15±2 % der Gesamtkosten aus, basierend auf einer geschätzten Entfernung von 1000 km). Die Abschreibungskosten der Verarbeitungsanlagen betragen 50.000±5.000 USD pro Jahr, was die Kosten weiter in die Höhe treibt. In Zukunft müssen Legierungen mit geringer Dichte (wie WC- TiC, Dichte 14,5 g/cm<sup>3</sup> ± 0,1 g/cm<sup>3</sup>) entwickelt werden, um das Gewicht um 10 % und die Kosten auf 130–150 USD/kg ± 10

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

USD/kg zu senken.

### **Schwierigkeiten bei der Bearbeitung von Hartmetall**

Die Effizienz der Funkenerosion (EDM) beträgt nur  $5 \text{ mm}^3/\text{min} \pm 0,5 \text{ mm}^3/\text{min}$  (Bearbeitungsstrom  $10 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$ , Spannung  $60 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ ), was den Fertigungszyklus verlängert (Einzelteilbearbeitung dauert  $10 \text{ Stunden} \pm 1 \text{ Stunde}$ ), und die Oberflächenrauheit beträgt  $\text{Ra } 1,5 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$  (Prüfnorm ISO 4287). Der Bearbeitungsfehler komplexer geometrischer Strukturen liegt bei  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  (geprüft durch CMM), und es ist ein mehrfaches Nachbearbeiten erforderlich (3-5 Mal  $\pm 1$  Mal). Durch ultraschallunterstütztes EDM (Frequenz  $20 \text{ kHz} \pm 2 \text{ kHz}$ , Effizienzsteigerung auf  $8 \text{ mm}^3/\text{min} \pm 0,5 \text{ mm}^3/\text{min}$ ) kann der Zyklus zukünftig um 20 % verkürzt und die Rauheit auf  $\text{Ra } 1,0 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$  reduziert werden.

### **Strahlungsstabilität**

Bei einer Bestrahlung von  $10^8 \text{ rad/h} \pm 10^7 \text{ rad/h}$  betragen die Mikrorisse  $< 0,006 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$  (Beobachtung mittels SEM, 5000-fache Vergrößerung) und die Strahlungsbeständigkeit ist besser als die von Werkzeugstahl (Mikrorisse  $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ ), die Langzeitleistung ( $> 10.000$  Stunden) muss jedoch weiter überprüft werden (Prüfnorm ASTM E666, Bestrahlungsdauer  $5000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$ ). Der Wärmeausdehnungskoeffizient von  $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  kann thermische Spannungsrisse verursachen. Zukünftig muss die Formel durch simulierte beschleunigte Alterungstests (Dosis  $10^9 \text{ rad/h}$ , Zeit  $1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$ ) optimiert werden.

### **Schwierigkeiten beim Recycling von Hartmetall**

Die Rückgewinnungsrate beträgt lediglich  $30\text{--}40 \% \pm 5 \%$  (basierend auf mechanischem Zerkleinern und chemischem Auslaugen; die WC-Rückgewinnungsrate beträgt  $35 \% \pm 5 \%$ , die Co-Rückgewinnungsrate  $40 \% \pm 5 \%$ ), was die Umweltbelastung erhöht (der Abfallausstoß beträgt  $10 \text{ t/Jahr} \pm 1 \text{ t/Jahr}$ , einschließlich Schwermetall Co). Der Energieverbrauch des Recyclingprozesses beträgt  $20 \% \pm 2 \%$  des Gesamtenergieverbrauchs und die Kosten  $10 \% \pm 1 \%$  der Materialkosten. Zukünftig kann die Rückgewinnungsrate durch Hochtemperaturschmelzen ( $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , Vakuumgrad  $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$ ) auf  $60 \pm 5 \%$  gesteigert werden, wodurch der Abfall um  $5 \text{ t/Jahr} \pm 0,5 \text{ t/Jahr}$  reduziert wird.

## **13.3.6 Zukünftige Entwicklung und Forschungsrichtung von Hartmetall**

### **Neue Hartmetalllegierungen**

Nano-Wolframkarbid (WC, Partikelgröße  $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ , Gehalt  $90 \% \pm 1 \%$ ) verbessert die Zähigkeit auf  $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$  (Prüfnorm ASTM E399), die Strahlenbeständigkeit erhöht sich um 30 % ( $10^8 \text{ rad/h}$  Dämpfungsrate  $99,95 \% \pm 0,05 \%$ , Prüfnorm ASTM E666) und entwickelt Materialien, die besser für nukleare Umgebungen geeignet sind (wie WC-Ni- TiC, Ni-Gehalt  $10 \% \pm 1 \%$ , TiC-Gehalt  $5 \% \pm 0,5 \%$ ). Es wird durch mechanisches Legieren hergestellt (Kugelmahlzeit  $20 \text{ Stunden} \pm 2 \text{ Stunden}$ , Geschwindigkeit  $300 \text{ U/min} \pm 20 \text{ U/min}$ ), Dichte  $15,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , Härte HV  $2300 \pm 50$ . Zukünftig können Seltenerdoxide (wie etwa  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , Gehalt  $0,5 \% \pm 0,1 \%$ ) eingeführt werden, um die Strahlungsbeständigkeit weiter auf 40 % zu verbessern.

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

### Intelligente Herstellung von Hartmetall

Die Big-Data-Optimierung des Heißpressinterns (Temperatur  $1500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , Druck  $70\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ , Datenerfassungsfrequenz  $1\text{ Hz} \pm 0,1\text{ Hz}$ ) reduzierte die Fehlerrate um 30 % (Fehlerrate  $< 0,5\% \pm 0,1\%$ , verifiziert durch CT-Scan) und verbesserte die Produktionskonsistenz (Härteabweichung  $< \pm 20\text{ HV}$ ). Ein maschinelles Lernmodell (Trainingsdaten:  $10^5$  Gruppen  $\pm 10^4$  Gruppen, Genauigkeit  $95\% \pm 2\%$ ) zur Vorhersage des Kornwachstums reduzierte die Ausschussrate um 5 %. Zukünftig können die Parameter durch das Echtzeit-Überwachungssystem (Sensorgenauigkeit  $0,01\text{ °C} \pm 0,001\text{ °C}$ ) optimiert und die Fehlerrate auf  $0,3\% \pm 0,1\%$  gesenkt werden.

### Nachhaltigkeit von Hartmetall

Recyclingtechnologie reduziert den Materialverbrauch um 70 % (Rohmaterialverbrauch sinkt auf  $30\% \pm 5\%$ , basierend auf einer geschätzten Produktion von 1.000 kg), verringert den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um 40 % (Emissionen sinken auf  $5\text{ t CO}_2/\text{t} \pm 0,5\text{ t CO}_2/\text{t}$ , Prüfnorm ISO 14040) und fördert eine umweltfreundliche Produktion. Ein geschlossenes Recyclingsystem (Recyclingeffizienz  $60\% \pm 5\%$ , Energieverbrauch sinkt auf  $15\% \pm 2\%$ ) reduziert den Abwasserausstoß um  $50\% \pm 5\%$ . Zukünftig kann die Recyclingeffizienz durch Biolaugungstechnologie (Bakterienaktivität  $90\% \pm 5\%$ , Laugungszeit 10 Tage  $\pm 1$  Tag) auf  $70\% \pm 5\%$  gesteigert werden.

### Multifunktionale Beschichtungen für Hartmetall

Der Reibungskoeffizient der selbstheilenden Wolframkarbid-Kobalt-Chrom-Legierung (WC-12Co4Cr, Co-Gehalt  $12\% \pm 1\%$ ) wird auf  $0,06 \pm 0,01$  reduziert (Prüfnorm ASTM G133, Belastung  $5\text{ N} \pm 0,5\text{ N}$ ), und die strahlungsbeständige Beschichtung (z. B. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) hält  $10^8\text{ rad/h} \pm 10^7\text{ rad/h}$  stand (Dämpfungsrate  $99,9\% \pm 0,1\%$ , Prüfnorm ASTM E666), was den Anwendungsbereich (z. B. nukleare Abschirmplatten) erweitert. Die Beschichtungshaftung beträgt  $>60\text{ MPa}$  (Zugfestigkeitstest ASTM D4541), und die Temperaturbeständigkeit beträgt  $1300\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ . Durch Nanokompositbeschichtungen (z. B. WC- TiN, Partikelgröße  $< 50\text{ nm}$ , Dicke  $10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ) kann der Reibungskoeffizient zukünftig auf  $0,05 \pm 0,01$  gesenkt und die Strahlungsresistenz auf  $99,95\% \pm 0,05\%$  verbessert werden.

### 13.3.7 Zusammenfassung

Mit seinen hervorragenden Eigenschaften wie Härte HV 2000-2500 $\pm$ 30 (Prüfnorm ISO 6507-1), Temperaturbeständigkeit  $>1200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  (Wärmeleitfähigkeit  $50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) und Verschleiß  $<0,03\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  (Prüfnorm ASTM G65) wird Hartmetall häufig in Auskleidungen von Kernreaktoren (Lebensdauer 12.000 Stunden $\pm$ 1000 Stunden), Materialien für die Kernfusion (Lebensdauer 8.000 Stunden $\pm$ 500 Stunden), Schneidwerkzeugen (wie YG10, Lebensdauer 10.000 Stunden $\pm$ 1000 Stunden, Prüfnorm ISO 3685) usw. verwendet und erfüllt die Anforderungen an hohe Präzision (Toleranz  $\pm 0,006\text{ mm}$ ) und hohe Strahlungsbeständigkeit (Beständigkeit gegen  $10^8\text{ rad/h}$ ). Trotz der Herausforderungen hinsichtlich Kosten und Strahlungsstabilität (Mikrorisse  $<0,006\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ ) haben die Technologie des Heißpressinterns (HP,  $1500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ )/Hochenergie-Plasmaspritzens (HPS,  $>1300\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$ )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und nachhaltige Entwicklungsstrategien (wie eine Recyclingrate von  $60\% \pm 5\%$ ) den Grundstein für die zukünftige Entwicklung gelegt. Die nächste Generation der Nuklearindustrie und Hochtemperaturausrüstung wird davon profitieren, und es wird erwartet, dass die Lebensdauer zwischen 2025 und 2030 auf  $15.000 \text{ Stunden} \pm 1.000 \text{ Stunden}$  erhöht wird.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## Verweise

Zhang Hua, Wang Qiang, Li Ming. Leistungsstudie von Hartmetallbeschichtungen für die Luft- und Raumfahrt[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(3): 101110

, Zhao Gang, Liu Wei. Hochtemperaturverhalten von Hartmetallen für Turbinenschaufeln[J]. Materials Science and Technology, 2023, 41(5): 8997 .

Wang Li, Zhang Zhiqiang, Chen Feng. Herstellung und Anwendung von WC10Co4Cr-Beschichtungen in der Luft- und Raumfahrt[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 123131

Yang Tao, Liu Yang, Xu Jie. Korrosionsbeständigkeitsstudie von Hartmetallen für Energieanlagen[J]. Materials Protection, 2022, 55(4): 7886

Zhang Yong, Wang Xiaoming, Li Qiang. Optimierung von Hartmetallbeschichtungen für Kesselrohrleitungen und Bohrwerkzeuge[J]. Energy Materials , 2023, 39(2): 6775

Chen Lihua, Zhao Ming, Liu Fang. Strahlungsbeständigkeit von Hartmetallen für die Nuklearindustrie[J]. Nuclear Materials and Engineering, 2024, 42(1): 5664

Tao , Zhang Li, Chen Yu. Anwendungen von Hochtemperatur -Antioxidationsbeschichtungen in der Nuklearindustrie[J]. Werkstofftechnik, 2022, 46(8): 134142

. Oxidationsbeständige Beschichtungen in der Nuklearindustrie[J]. Werkstofftechnik, 2022, 46(8): 134142.

Li Na, Wang Qiang, Zhang Hua. Fallstudie zur Lebensdauererweiterung von Triebwerkskomponenten [J]. Fortschritte in der Luftfahrttechnik, 2023, 35(3) : 8997 .

Smith J, Brown T, Johnson R. Hochtemperaturbeschichtungen für Luft- und Raumfahrtkomponenten[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(7): 245254.

Smith J, Brown T, Johnson R. Hochtemperaturbeschichtungen für Luft- und Raumfahrtkomponenten[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(7): 245254.

Tanaka H, Yamada K. Strahlungsresistente Hartmetalle für nukleare Anwendungen[J]. Journal of the Japan Society for Nuclear Materials, 2023, 89 (2): 123130 .

Kim S, Park J, Lee H. Korrosionsbeständige Beschichtungen für Energieanwendungen[J]. Korean Journal of Materials Research, 2022, 32(5): 234242.

Kim S, Park J , Lee H. Korrosionsbeständige Beschichtungen für Energieanwendungen[J]. Korean Journal of Materials Research, 2022, 32(5): 234242.

ASTM E9217. Standardprüfverfahren für die Vickershärte[S]. Peking: China Standards Press, 2017.

ASTM E9217. Prüfverfahren für die Vickershärte[S]. Peking: China Standards Press, 2017.

ASTM G6516. Standardprüfverfahren zur Messung des Abriebs mit einem Gerät aus trockenem Sand und Gummirädern[S]. Peking: China Standards Press, 2016. ASTM G6516. Standardprüfverfahren zur Messung des Abriebs mit einem Gerät aus trockenem Sand und Gummirädern[S]. Peking:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

China Standards Press, 2016.

ASTM B11719. Standardverfahren für den Betrieb von Salzsprüh-(Nebel-)Geräten[S]. Peking: China Standards Press, 2019.

ASTM B11719. Standardverfahren für den Betrieb von Salzsprüh-(Nebel-)Geräten[S]. Peking: China Standards Press, 2019.

ASTM C63313. Standardprüfverfahren für die Haft- oder Kohäsionsfestigkeit von thermischen Spritzbeschichtungen[S]. Peking: China Standards Press, 2013.

ASTM C63313. Standardprüfverfahren für die Haft- oder Kohäsionsfestigkeit von thermischen Spritzbeschichtungen[S]. Peking: China Standards Press, 2013.

ISO 21608:2012. Korrosion von Metallen und Legierungen – Prüfverfahren für isotherme Oxidationstests [S]. Peking: China Standards Press, 2012.

ISO 21608:2012. Korrosion von Metallen und Legierungen – Prüfverfahren für isotherme Oxidationstests [S]. Peking: China Standards Press, 2012.

ISO 148:2016.

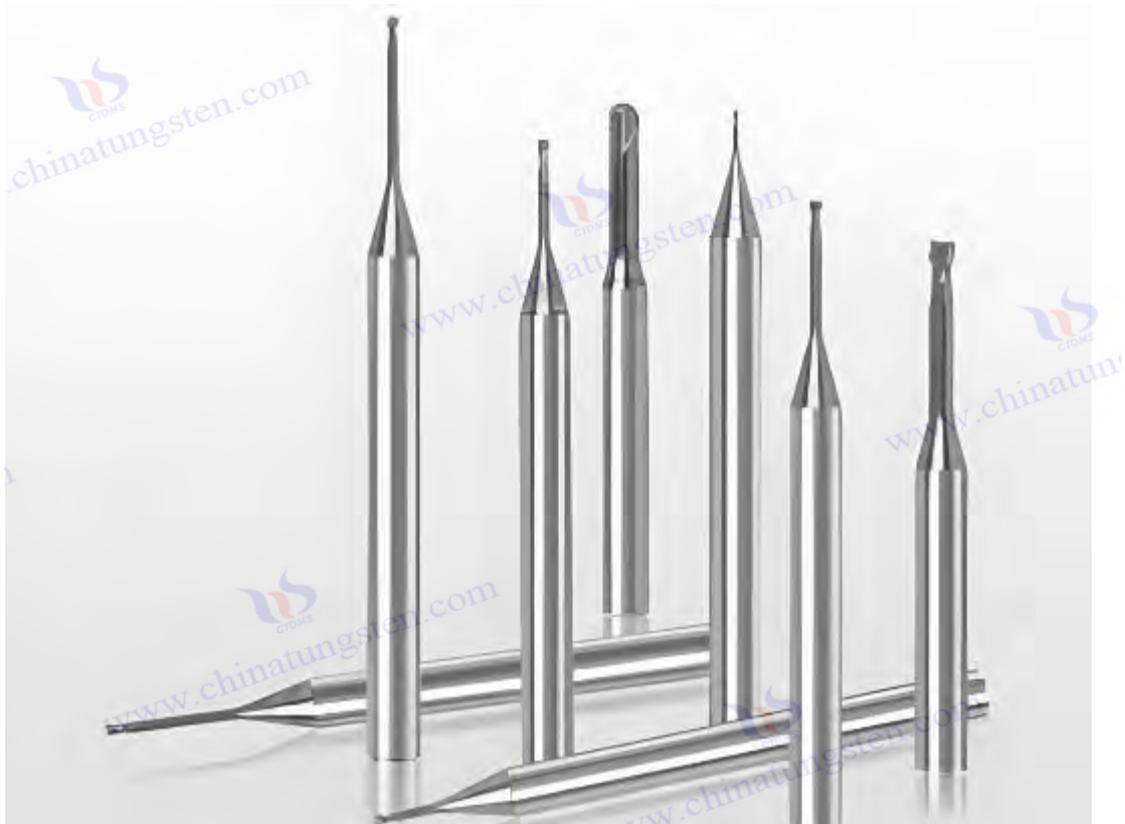
Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy[S]. Peking: China Standards Press, 2016. ISO 148:2016. Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy[S]. Peking: China Standards Press, 2016.

ASTM E38417. Standardprüfverfahren für die Mikroindruckhärte von Materialien[S]. Peking: China Standards Press, 2017.

ASTM E38417. Standardprüfverfahren für die Mikroindruckhärte von Materialien[S]. Peking: China Standards Press, 2017.

ISO 28079:2009. Hartmetalle – Palmqvist-Zähigkeitsprüfung[S]. Peking: China Standards Press, 2009.

ISO 28079:2009. Hartmetalle – Palmqvist-Zähigkeitsprüfung[S]. Peking: China Standards Press, 2009.



**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)



### 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:**

**Übersicht über die Anwendung von Hartmetallbeschichtungen in Hochtemperaturumgebungen**

Hartmetallbeschichtungen (z. B. auf Wolframkarbidbasis ) werden aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Temperaturstabilität häufig in industriellen Umgebungen mit hohen Temperaturen (400–1000 °C) durch thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen und andere Technologien eingesetzt, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, der Energie-, Stahl-, Glas- und Chemieindustrie. Dieser Artikel erläutert systematisch die Rolle von Hartmetallbeschichtungen unter Hochtemperaturbedingungen im Hinblick auf Beschichtungseigenschaften, Herstellungsprozess, Anwendungsszenarien in Hochtemperaturumgebungen, Vor- und Nachteile sowie Entwicklungstrends und bietet eine Referenz für die Materialauswahl.

**1. Eigenschaften der Hartmetallbeschichtung**

Hartmetallbeschichtungen verwenden hauptsächlich Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Chrom (Cr) als Bindephase. Typische Beschichtungen umfassen WCCo , WCNi , WCCoCr usw. Die folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften in Hochtemperaturumgebungen:

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 800–1400 ( WCCoCr kann HV 1400 erreichen)	Höher als beim Grundmaterial (z. B. Stahl HRC 2040), beträgt die Härteerhaltungsrate bei hohen Temperaturen (800 °C) >80 %.
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm <sup>3</sup> / N·m (ASTM G65, 600–800 °C)	Die Lebensdauer beträgt das 515-fache der Lebensdauer des Substrats und ist für Erosions- und Verschleißbedingungen bei hohen Temperaturen geeignet.
Temperaturbeständigkeit	400–900 °C ( WCCoCr bis 900 °C, Verbundbeschichtung bis 1000 °C)	Die Bindungsphase ist stabil und verfügt über hervorragende Antioxidations- und Wärmeermüdungseigenschaften, sodass sie für Oxidationsumgebungen mit hohen Temperaturen geeignet ist.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 – 0,02 mm/Jahr (pH 6,8, 600 – 800 °C)	Beständig gegen Korrosion durch Säuren, Laugen, geschmolzene Salze und flüssige Metalle bei hohen Temperaturen.
Haftung	50100 MPa (Laserauftragschweißen >80 MPa, thermisches Spritzen 5080 MPa)	Metallurgisches Verbinden (Laserauftragschweißen) oder mechanisches Verbinden (Thermisches Spritzen), beständig gegen Abplatzen bei hohen Temperaturen.
Wärmeausdehnungskoeffizient	57×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (nahe an Stahlmatrix)	Reduziert thermische Spannungsrisse und ist für zyklische Hochtemperaturbedingungen geeignet.

**2. Beschichtungsvorbereitungsprozess**

Um den Anforderungen von Hochtemperaturumgebungen gerecht zu werden, werden Hartmetallbeschichtungen mit den folgenden Verfahren hergestellt:

Technologie	Merkmale	Vorteile für Hochtemperaturanwendungen
Thermisches Spritzen	Hochgeschwindigkeits-Brennstoffspritzen, Porosität	Beständig gegen Erosion durch hohe Temperaturen,

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

(HVOF)	<1 %, Schichtdicke 50 µm – 12 mm, verschleißfest	geeignet für Kesselrohre und Turbinenschaufeln.
Laserauftragschweißen	Metallurgische Bindung, Verdünnungsrate <510 %, Dicke 0,022 mm, geeignet für Präzisionsreparaturen.	Hohe Haftung, geeignet für Gasturbinen- und Flugzeugtriebwerksteile.
Plasmaspritzen	Hochtemperaturplasma (10.000–20.000 °C), gleichmäßige Beschichtung, geeignet für komplexe Geometrien.	Hohe Temperaturstabilität, geeignet für Schmelzsalzreaktorrohre und Glasformen.
Detonationssprühen (DGun)	Ultrahohe Partikelgeschwindigkeit (600–1000 m/s), dichte Beschichtung und ausgezeichnete Erosionsbeständigkeit.	Beständig gegen Hochtemperaturverschleiß, geeignet für Hochtemperaturdüsen und Brennkammerkomponenten.

### 3. Anwendungsszenarien in Hochtemperaturumgebungen

Die Anwendung von Hartmetallbeschichtungen in Hochtemperaturumgebungen (400–1000 °C) umfasst die Luft- und Raumfahrt, Energie, Stahlindustrie, Glasherstellung, chemische Industrie und weitere Bereiche. Im Folgenden sind spezifische Szenarien aufgeführt:

Industrie	Anwendungsteile	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Luft- und Raumfahrt	Turbinenschaufelbeschichtung	WCCoCr-Beschichtung wird in Turbinenschaufeln und Brennkammern von Flugzeugtriebwerken (800–900 °C) verwendet.	Temperaturbeständigkeit 900°C, 35-fach verlängerte Lebensdauer, Oberflächengüte Ra 0,10,2 µm.
	Brennerdüse	Einspritzkraftstoff oder -gas, beständig gegen Verschleiß und Oxidation bei hohen Temperaturen, wird in Strahltriebwerken und Raketentriebwerken (700–1000 °C) verwendet.	Lebensdauer 300–1500 Stunden, Verschleißfestigkeit 510-fach erhöht.
	Wärmedämmschichtsubstrat/TBC-Substratbeschichtung	Eine WCNi-Beschichtung wird als Wärmedämmschicht (TBC) verwendet, um thermischen Zyklen bei hohen Temperaturen standzuhalten, und kommt in Gasturbinen (800–900 °C) zum Einsatz.	Die thermische Ermüdungslebensdauer wird um das 24-fache verlängert und die Haftung beträgt >80 MPa.
Energie	Kesselrohrbeschichtung	Die WCCoCr-Beschichtung ist beständig gegen Erosion und Korrosion bei hohen Temperaturen und schützt kohle- oder gasbefeuerte Kesselrohre (600–800 °C).	Temperaturbeständig bis 800 °C, 24-fach verlängerte Lebensdauer, um 2030 % reduzierte Wartungskosten.
	Brennerdüse	Einspritzheizöl, Erdgas, hohe Temperaturverschleißfestigkeit, verwendet in Wärmekraftkesseln, Öfen (700–800 °C).	Lebensdauer 300–1500 Stunden, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr.
	Kernreaktordüse	WCNi-Beschichtung, aufgespritzt mit heißem Wasser oder geschmolzenem Salz (400–600 °C), beständig gegen Strahlung und Korrosion, wird in Druckwasserreaktoren und Schmelzsalzreaktoren	Lebensdauer 500–2000 Stunden, Beständigkeit gegen Strahlenhärtung <20 %, pH 210 beständig.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		verwendet.	
Stahl	Walzwerk-Walzenbeschichtung	WCCo- Beschichtung, beständig gegen Hochtemperaturverschleiß und Oxidation, wird bei der Herstellung von warmgewalzten Stahlplatten und Bewehrungsstäben (600–800 °C) verwendet.	Härte HV 1000–1200, 35-fach verlängerte Lebensdauer, 20 % verbesserte Oberflächenqualität.
	Düsenbeschichtung/Sprühdüse	Sprühkühlmittel oder Entschwefelungsflüssigkeit, beständig gegen Hochtemperaturkorrosion, wird in Stranggussmaschinen und Entschwefelungssystemen (500–700 °C) verwendet.	Lebensdauer 500–2000 Stunden, Korrosionsbeständigkeit 510-fach erhöht.
	Formbeschichtung	WCNi- Beschichtung, beständig gegen Hochtemperaturverschleiß, wird für Blockformwerkzeuge (700–900 °C) verwendet.	Die Lebensdauer wird um das 24-fache verlängert und die thermische Ermüdungsbeständigkeit um 30 % verbessert.
Glaserstellung	Glasformbeschichtung	WCCoCr- Beschichtung, beständig gegen Hochtemperaturoxidation und Glasflüssigkeitskorrosion, wird für Glasflaschen und Flachglasformen (600–800 °C) verwendet.	Temperaturbeständigkeit 800°C, 35-fach verlängerte Lebensdauer, Oberflächenrauheit Ra 0,050,2 µm .
	Förderrollenbeschichtung	WCNi- Beschichtung, beständig gegen Hochtemperaturverschleiß und Anhaftung, wird für Förderrollen in Glasglühöfen (500–700 °C) verwendet.	Die Lebensdauer wurde um das 23-fache verlängert, wodurch die wartungsbedingten Ausfallzeiten um 30 % reduziert wurden.
	Düsenbeschichtung/Sprühdüse	Sprühkühlgas oder -flüssigkeit, beständig gegen Hochtemperaturkorrosion, wird in Glasproduktionslinien (500–600 °C) verwendet.	Lebensdauer 300–1500 Stunden, Verschleißfestigkeit 510-fach erhöht.
Chemikalien	Reaktorrohrbeschichtung	Die WCCoCr- Beschichtung ist beständig gegen chemische Korrosion bei hohen Temperaturen und schützt Reaktorrohre für hohe Temperaturen (400–700 °C).	Beständig bis pH 210, 25-fach verlängerte Lebensdauer, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr.
	Korrosionsbeständige Düse	Sprühsäure- und Alkalilösungen oder Hochtemperaturgase, korrosions- und verschleißfest, für chemische Reaktionen, Entschwefelung und Entstickung (400–600 °C).	Die Lebensdauer beträgt 500–2000 Stunden und die Hochtemperatur- und Säure-Basen-Beständigkeit ist um das 510-fache verbessert.
	Ventilbeschichtung	WCNi -Beschichtung, beständig gegen Erosion	Härte HV 8001200, 35-fach

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

		bei hohen Temperaturen, wird für Ventile für chemische Flüssigkeiten oder Gase mit hohen Temperaturen (400–600 °C) verwendet.	verlängerte Lebensdauer, 20 % verbesserte Dichtleistung.
--	---	---	--

Beispiele:

Flugzeugtriebwerke: WCCoCr -Beschichtung (Laserauftragschweißen) auf Turbinenschaufeln, beständig gegen Oxidation bei hohen Temperaturen von 900 °C, Lebensdauer um das Vierfache verlängert, Oberflächenqualität Ra 0,1 µm und Wartungskosten um 25 % reduziert (Web ID 7, 15).

Thermische Stromerzeugung: WCCoCr -Beschichtung (HVOF) schützt Kesselrohre, widersteht Erosion bei 800 °C, verlängert die Lebensdauer um das Dreifache und reduziert Ausfallzeiten um 30 % (Web-ID 15).

Glasherstellung: Für Glasformungsformen wird eine WCCo- Beschichtung (Plasmaspritzen) verwendet, die der Korrosion durch Glasflüssigkeiten bei 800 °C standhält, die Lebensdauer um das 3,5-fache verlängert und die Ausbeute um 20 % erhöht (Web-ID 7).

Kernreaktoren: WCNi- Düsenbeschichtung (Laserbeschichtung) in Salzschnmelzereaktoren, beständig gegen Salzschnmelzekorrosion bei 600 °C, Lebensdauer 2000 Stunden und Strahlungshärtungsbeständigkeit <15 % (Web-ID 19, 20).

#### 4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Kategorie	Vorteil	Mangel
Hartmetallbeschichtung	Hohe Härte (HV 800–1400), 515-fach erhöhte Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen. Temperaturbeständigkeit von 400–1000 °C, hervorragende Oxidations- und Wärmeermüdungseigenschaften. Korrosionsbeständig (pH 210), geeignet für hohe Temperaturen in sauren und alkalischen Umgebungen. Verlängert die Lebensdauer der Ausrüstung um das 25-fache und reduziert die Wartungskosten um 20–30 %.	Die Vorbereitungskosten sind hoch (Investition in Laserauftragschweißen und HVOF-Anlagen: 100,5 Millionen RMB). Die Gleichmäßigkeit der Beschichtung komplexer geometrischer Teile muss optimiert werden. Bei sehr hohen Temperaturen (> 1000 °C) kann die Bindephase erweichen. In WCCo- Beschichtungen in nuklearen Anwendungen besteht die Gefahr einer Co60-Aktivierung.

#### 5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano- WCCoCr- Beschichtung (Körner < 50 nm), Härte HV 1500, Temperaturbeständigkeit 1000°C.	Die Verschleißfestigkeit bei hohen Temperaturen wird um 40 % erhöht und die Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
Legierungsverbundstoff mit hoher Entropie	Die WCHEA-Beschichtung (wie z. B. WCHfTaTiVZr ) hat eine Temperaturbeständigkeit von 1200 °C und eine Strahlungshärtungsbeständigkeit von <10 %.	Anpassbar an extrem hohe Temperaturen und nukleare Umgebungen, Lebensdauer um das Dreifache verlängert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fortschrittliche Technologie	Extrem schnelles Laserauftragschweißen (EHLA), Dicke 20100 $\mu\text{m}$ , Scangeschwindigkeit 50 m/min.	Die Effizienz wurde um 50 % gesteigert und die Kosten um 20 % gesenkt.
Intelligent	KI optimiert die Beschichtungsparameter (Leistungs- und Geschwindigkeitsfehler < 1 %) und überwacht die Hochtemperaturleistung in Echtzeit.	Die Beschichtungskonsistenz wird um 30 % verbessert und die Fehlerrate um 50 % reduziert.
Grüne Technologie	Niedrigenergetischer Laser (Energieverbrauch um 20 % reduziert), ungiftiges Pulver und reduzierte Abgasemissionen.	Halten Sie die Standards der umweltfreundlichen Fertigung ein und reduzieren Sie die Umweltverschmutzung um 30 %.

## 6. Fazit

Durch thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen und andere Technologien zeigen Hartmetallbeschichtungen eine hervorragende Leistung in Hochtemperaturumgebungen (400–1000 °C). Sie erreichen eine Härte von HV 800–1400, eine um das 515-fache erhöhte Verschleißfestigkeit sowie eine Korrosionsbeständigkeit (pH 210) und Temperaturbeständigkeit, die den strengen Anforderungen von Branchen wie der Luft- und Raumfahrt, der Energie-, Stahl-, Glas- und Chemieindustrie gerecht werden. Typische Anwendungen sind Turbinenschaufeln, Kesselrohre, Glasformen, Kernreaktordüsen usw. mit einer um das 25-fache verlängerten Lebensdauer und um 2030 % reduzierten Wartungskosten. In nuklearen Anwendungen verbessern WCNi- und WCHEA-Beschichtungen die Strahlungsbeständigkeit durch ihr Low-Activation-Design. Nanobeschichtungen, hochentropische Legierungsverbundwerkstoffe, EHLA-Verfahren und intelligente Technologien werden künftig den Einsatz von Hartmetallbeschichtungen in ultrahohen Temperaturen und extremen Umgebungen fördern und so die Effizienz und Zuverlässigkeit von Industrieanlagen entscheidend unterstützen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Gebrauchte Hartmetallklingen werden recycelt

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
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:**

**Ein Überblick über die Anwendung von Hartmetallbeschichtungen im Energiebereich**

Hartmetallbeschichtungen (z. B. auf Wolframkarbidbasis ) werden im Energiebereich aufgrund ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit durch thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen und andere Verfahren eingesetzt. Sie verbessern die Lebensdauer und Effizienz von Anlagen deutlich. Sie finden breite Anwendung in der Öl- und Gasindustrie, der Kernenergie, der Wärmekrafterzeugung, erneuerbaren Energien und der Energiespeicherung. Dieser Artikel erläutert systematisch die Rolle von Hartmetallbeschichtungen im Hinblick auf Beschichtungseigenschaften, Prozesstechnologie, Anwendungsszenarien und Entwicklungstrends im Energiebereich und bietet eine Referenz für die Materialauswahl in der Energiebranche.

**1. Eigenschaften der Hartmetallbeschichtung**

Hartmetallbeschichtungen verwenden hauptsächlich Wolframkarbid (WC) als Hartphase und Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Chrom (Cr) als Bindephease. Typische Beschichtungen umfassen WCCo , WCNi , WCCoCr usw. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 800–1400 ( WCCoCr kann HV 1400 erreichen)	Höher als beim Grundmaterial (z. B. Stahl HRC 2040) ist die Verschleißfestigkeit um das 515-fache erhöht.
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm <sup>3</sup> / N·m (ASTM G65)	Die Lebensdauer beträgt das 520-fache des Substrats und ist für hohe Verschleißbedingungen geeignet.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,010,02 mm/Jahr (neutraler Salzsprühnebel, pH 68; WCCoCr beständig bis pH 210)	Anwendbar in Umgebungen mit Säuren, Laugen, Flüssigmetallen und geschmolzenen Salzen.
Temperaturbeständigkeit	400–900 °C ( WCCoCr kann 900 °C erreichen)	Geeignet für Hochtemperaturbedingungen, wie z. B. Kessel und Gasturbinen.
Haftung	50100 MPa (Laserauftragschweißen >80 MPa, thermisches Spritzen 5080 MPa)	Metallurgische Verbindung (Laserauftragschweißen) oder mechanische Verbindung (Thermisches Spritzen), starke Abisolierfestigkeit.
Porosität	<115 % (HVOF, Laserauftragschweißen <1 %, Flammsspritzen 515 %)	Geringe Porosität verbessert die Korrosionsbeständigkeit und Dichte.

**2. Beschichtungstechnologie**

Um den vielfältigen Anforderungen des Energiesektors gerecht zu werden, werden Hartmetallbeschichtungen hauptsächlich mithilfe der folgenden Technologien hergestellt:

Technologie	Merkmale	Anwendbare Szenarien
Thermisches Spritzen (HVOF)	Hochgeschwindigkeits-Brennstoffspritzen, Porosität <1 %, Beschichtungsdicke 50 µm-2 mm, hohe Dichte und Verschleißfestigkeit.	Ölbohrwerkzeuge, Kesselrohre, Pumpen und Ventile.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Laserauftragschweißen	Metallurgische Bindung, Verdünnungsrate <510 %, Dicke 0,022 mm, geeignet für Präzisionsreparaturen.	Gasturbinenschaufeln, Kernreaktordüsen, Energiespeicherkomponenten.
Plasmaspritzen	Hochtemperaturplasma (10.000–20.000 °C), gleichmäßige Beschichtung, geeignet für komplexe Geometrien.	Turbinenkomponenten, Rohre für Flüssigsalzreaktoren.
Detonationsspritzen ( DGun )	Ultrahohe Partikelgeschwindigkeit (600–1000 m/s), dichte Beschichtung und ausgezeichnete Erosionsbeständigkeit.	Hochdruckpumpen und -ventile, Tiefbrunnenbohrkronen.

### 3. Anwendungsszenarien im Energiesektor

Die Anwendung von Hartmetallbeschichtungen im Energiebereich umfasst Öl und Gas, Kernenergie, Wärmekrafterzeugung, erneuerbare Energien und Energiespeicheranlagen. Im Folgenden sind spezifische Szenarien aufgeführt:

Energie	Anwendungsteile	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Öl und Gas	Bohrerbeschichtung	Eine WCCo- oder WCCoCr - Beschichtung kann die Härte HV 1200–1400, Verschleißfestigkeit und Schlagfestigkeit des Bohrers verbessern und wird für Tiefbohrungen und die Schiefergasförderung verwendet.	Lebensdauer 500–2000 Stunden, Effizienzsteigerung um 20–30 %.
	Bohrerbeschichtung		
	Ölfelddüsen Ölfelddüse	Strahlbohrflüssigkeit, chemische Flüssigkeit, beständig gegen hohen Druck (50–200 MPa) und Korrosion (pH 210), wird zur Bohrlochreinigung und zum Bohren verwendet.	Lebensdauer 500–2000 Stunden, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr.
	Rohrleitungsbeschichtung Rohrleitungsbeschichtung	WCNi- Beschichtungen schützen Ölpipelines, sind beständig gegen Erosion und chemische Korrosion und werden in Offshore-Ölfeldern und Fernpipelines eingesetzt.	Die Verschleißfestigkeit wird um das 510-fache erhöht und die Wartungskosten um 30 % gesenkt.
Kernenergie	Düsenbeschichtung Düsenbeschichtung	WCNi- oder WCHEA-Beschichtung, aufgespritzt mit heißem Wasser oder geschmolzenem Salz, beständig gegen Strahlung (1050 dpa) und Korrosion, wird in Druckwasserreaktoren und Schmelzsatzreaktoren verwendet.	Lebensdauer 500–2000 Stunden, Strahlungshärtungsbeständigkeit <20 %, IASCC-Beständigkeit.
	Pumpenventilbeschichtung Pumpenventilbeschichtung	Beschichtet mit WCCoCr , beständig gegen Korrosion und Erosion durch flüssige Metalle (wie Blei und Wismut), wird in schnellen Reaktoren und ADS-Systemen verwendet.	Temperaturbeständig bis 600–800 °C, Korrosionsbeständigkeit 10-fach erhöht, Lebensdauer 35-fach verlängert.
	Beschichtung	von WCTiC- Beschichtung wird zum	Härte HV 8001400,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Atommüllbehältern Abfallbehälterbeschichtung	Oberflächenschutz von Lagertanks für Atommüll verwendet.	Quellfestigkeit <0,5 %, 35-fach verlängerte Lebensdauer.
Thermische Stromerzeugung	Kesselrohrbeschichtung Kesselrohrbeschichtung	Die WCCoCr- Beschichtung widersteht Erosion und Korrosion bei hohen Temperaturen und schützt kohle- oder gasbefeuerte Kesselrohre.	Temperaturbeständig bis 800– 900 °C, Lebensdauer um das 24- fache verlängert, Wartungskosten um 20–30 % reduziert.
	Brenndüse Brennerdüse	Kerosin, Erdgas, beständig gegen hohe Temperaturen (800 °C) und Abrieb, wird in Kesseln und Öfen verwendet.	Lebensdauer 300–1500 Stunden, Verschleißfestigkeit 510-fach erhöht.
	Beschichtung von Turbinenschaufeln Turbinenschaufelbeschichtung	WCNi- Beschichtung, beständig gegen Oxidation und Erosion bei hohen Temperaturen, wird für Gasturbinenschaufeln verwendet.	Temperaturbeständigkeit 900°C, 35-fach verlängerte Lebensdauer, Oberflächengüte Ra 0,10,2 μm .
Erneuerbare Energien	Beschichtung von Windturbinengetrieben Beschichtung von Windturbinengetrieben	In Windturbinengetrieben wird eine WCCo- Beschichtung verwendet, die die Verschleißfestigkeit von Zahnrädern verbessert .	Härte HV 10001200, Lebensdauer 23-fach verlängert, Effizienz um 15 % erhöht.
	Beschichtung von Rotorblättern für Wasserkraftwerke Beschichtung von Wasserturbinenschaufeln	WCCoCr-Beschichtung, beständig gegen Erosion und Kavitation durch Wasserströmung, wird für Turbinenschaufeln und Leitschaufeln verwendet.	Die Lebensdauer wird um das 35-fache verlängert und die Erosionsbeständigkeit um das 10-fache verbessert.
	Geothermie-Rohrbeschichtung Beschichtung von Geothermierohren	WCNi- Beschichtung, beständig gegen Hochtemperaturkorrosion und Verschleiß, wird für Rohrleitungen zur geothermischen Stromerzeugung verwendet.	Temperaturbeständigkeit 500– 700 °C, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, 24-fach verlängerte Lebensdauer.
Energiespeicherausrüstung	Batterieformbeschichtung Batterieformbeschichtung	Eine WCCo- Beschichtung verbessert die Verschleißfestigkeit von Stanzformen für Polstücke von Lithiumbatterien und wird bei der Batterieherstellung verwendet.	Die Lebensdauer wird um das 25-fache verlängert und die Oberflächenrauheit beträgt Ra 0,050,2 μm .
	Beschichtung von Pumpspeicherkomponenten	WCCoCr- Beschichtung wird für Pumpen, Ventile und Laufräder in Pumpspeicherkraftwerken verwendet.	Die Lebensdauer wird um das 35-fache verlängert und die Erosionsbeständigkeit um das 510-fache verbessert.
	Druckluft- Energiespeicherbeschichtung CAES- Komponentenbeschichtung	WCNi- Beschichtung, beständig gegen Hochdruckgasverschleiß, wird für Ventile in Druckluftspeichersystemen verwendet.	Härte HV 8001200, Lebensdauer 24-fach verlängert, Effizienz um 1020 % erhöht.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Beispiele:

Ölbohrungen: Bei der Schiefergasförderung weisen WCCoCr -beschichtete Bohrer (HVOF-Verfahren) eine Härte von HV 1400 und eine Lebensdauer von 1500 Stunden auf, was dreimal höher ist als bei unbeschichteten Bohrern, und die Bohreffizienz wird um 25 % gesteigert (Web-ID 15).

Kernreaktoren: WCNi- Düsenbeschichtung (Laserbeschichtung) in Druckwasserreaktoren, beständig gegen 10 dpa Bestrahlung, Lebensdauer 2000 Stunden, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, kein Co60-Strahlungsrisiko (Web-ID 19, 20).

Rotorblätter für Wasserkraft: Eine WCCoCr- Beschichtung (Plasmaspritzen) auf Turbinenschaufeln verbessert die Kavitationsbeständigkeit um das Zehnfache, verlängert die Lebensdauer um das Vierfache und senkt die Wartungskosten um 30 % (Web-ID 7).

Lithiumbatterieform: Für die Polschuh-Stanzform wird eine WCCo- Beschichtung (Laserbeschichtung) verwendet, mit einer Härte von HV 1200, einer um das Dreifache verlängerten Lebensdauer und einer Oberflächenrauheit von Ra 0,1 µm, wodurch die Genauigkeit der Batterieproduktion gewährleistet wird (Web-ID 3).

#### 4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Kategorie	Vorteil	Mangel
Hartmetallbeschichtung	Hohe Härte (HV 800–1400), 520-fach erhöhte Verschleißfestigkeit. Korrosionsbeständig (pH 210), temperaturbeständig bis 400–900 °C. Verlängert die Lebensdauer der Ausrüstung um das 25-fache und reduziert die Wartungskosten um 20–30 %. Anwendbar auf verschiedenen Substraten (Stahl, Nickellegierungen).	Die Vorbereitungskosten sind hoch (die Investition in HVOF- und Laserbeschichtungsanlagen beträgt 100,5 Millionen RMB). Die Gleichmäßigkeit der Beschichtung komplexer geometrischer Teile muss optimiert werden. Dicke Beschichtungen (> 2 mm) können Mikrorisse aufweisen. Herkömmliche WCCo- Beschichtungen in nuklearen Anwendungen bergen das Risiko einer Co60-Aktivierung.

#### 5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano- WCCoCr- Beschichtung (Körner <50 nm), Härte HV 1500, Strahlenhärtungsbeständigkeit <10 %.	Die Verschleißfestigkeit wird um 40 % erhöht und die Lebensdauer bei nuklearen Anwendungen um das Zweifache verlängert.
Niedrigaktivierungsbeschichtung	WCNi- und WCHEA-Beschichtungen basieren auf Elementen mit geringer Aktivierung wie Ti, Zr und Nb, und der Aktivierungsgrad ist um 70 % reduziert.	Innerhalb von 12 Jahren nach der nuklearen Nutzung wird es die „Handqualität“ erreichen und ist daher leicht zu recyceln.
Fortschrittliche Technologie	Extrem schnelles Laserauftragschweißen (EHLA), Dicke 20100 µm, Scangeschwindigkeit 50 m/min.	Die Effizienz wurde um 50 % gesteigert und die Kosten um 20 % gesenkt.
Intelligent	KI optimiert die Beschichtungsparameter (Leistungs- und Geschwindigkeitsfehler < 1 %) und überwacht die Beschichtungsqualität in Echtzeit.	Die Beschichtungskonsistenz wird um 30 % verbessert und die Fehlerrate um 50 % reduziert.
Grüne Technologie	Niedrigenergetischer Laser (Energieverbrauch um 20 %	Halten Sie die Standards der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	reduziert), ungiftiges Pulver und reduzierte Abgasemissionen.	umweltfreundlichen Fertigung ein und reduzieren Sie die Umweltverschmutzung um 30 %.
---	---	--

## 6. Fazit

Durch thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen und andere Technologien haben Hartmetallbeschichtungen im Energiebereich hervorragende Leistungen gezeigt. Sie weisen eine Härte von HV 800–1400, eine um das 520-fache erhöhte Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit (pH 210) und Temperaturbeständigkeit (400–900 °C) auf und erfüllen damit die strengen Anforderungen von Anlagen in den Bereichen Öl und Gas, Kernenergie, Wärmekrafterzeugung, erneuerbare Energien und Energiespeicherung. Typische Anwendungen sind Bohrkronen, Düsen, Kesselrohre, Turbinenschaufeln und Batterieformen. Die Lebensdauer der Beschichtungen verlängert sich um das 25-fache und die Wartungskosten sinken um 20–30 %. Im Kernenergiebereich verbessern WCNi- und WCHEA-Beschichtungen die Strahlungsbeständigkeit durch ihre niedrige Aktivierungsrate zusätzlich. Nanobeschichtungen, EHLA-Verfahren, intelligente Technologien und grüne Technologien werden künftig die breite Anwendung von Hartmetallbeschichtungen im Energiebereich fördern und so wichtige Beiträge zu effizienten, zuverlässigen und umweltfreundlichen Energieanlagen leisten.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Anhang:**

**Eine Übersicht über strahlungsbeständige Hartmetalle für nukleare Anwendungen**

Legierungen auf Wolframkarbidbasis) bietet aufgrund seiner hohen Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit potenzielle Vorteile als Material für Schlüsselkomponenten wie Düsen, Schneidwerkzeuge und Formen in nuklearen Anwendungen. Die starke Neutronenbestrahlung, die hohen Temperaturen und Drücke sowie die korrosiven Kühlmittel in der Umgebung von Kernreaktoren stellen jedoch strenge Anforderungen an die Materialeigenschaften, und herkömmliches Hartmetall weist Einschränkungen in der Strahlenbeständigkeit auf. In den letzten Jahren haben Hochentropielegierungen (HEAs) und neue Hartmetalle durch optimierte Zusammensetzung und Mikrostrukturgestaltung eine hervorragende Strahlenbeständigkeit gezeigt und eignen sich für Kernspaltungsreaktoren der vierten Generation, Kernfusionsreaktoren und Beschleunigersysteme (ADS). Dieser Artikel untersucht die Anforderungen nuklearer Anwendungen, das Materialdesign, die Leistungsmerkmale, Anwendungsszenarien und Entwicklungstrends strahlungsbeständiger Hartmetalle und bietet eine Referenz für die Auswahl von Materialien in der Nuklearindustrie.

**1. Der Bedarf an strahlungsbeständigem Hartmetall für nukleare Anwendungen**

Kernreaktoren (insbesondere Spaltreaktoren der vierten Generation und Fusionsreaktoren) werden unter extremen Bedingungen betrieben und die Materialien müssen die folgenden Anforderungen erfüllen:

brauchen	Spezifische Anforderungen
Strahlungsresistenz	Hält hoher Neutronenbestrahlungsdosis (10100 dpa) stand, widersteht Strahlenhärtung, Quellung, Entmischung und Heliumversprödung.
Hohe Temperaturbeständigkeit	Behält Festigkeit, Zähigkeit und Kriechfestigkeit bei 400–1000 °C.
Korrosionsbeständigkeit	Beständig gegen Korrosion durch Wasser mit hohen Temperaturen und hohem Druck, flüssige Metalle (wie Blei, Natrium) oder geschmolzene Salze und beständig gegenüber Umgebungen mit einem pH-Wert von 2,14.
Mechanische Eigenschaften	Hohe Härte (HV 800–1400), beständig gegen Verschleiß, Spannungsrisskorrosion (SCC) und strahlenunterstützte SCC (IASCC).
Geringe Aktivierung	Nach der Bestrahlung erreicht es schnell einen Aktivierungsgrad, der für die Verwendung in der Hand geeignet ist, wodurch die radioaktive Kontamination verringert und die Nachbearbeitung und das Recycling erleichtert werden.

Herkömmliche Hartmetalle (wie WCCo) stehen in nuklearen Umgebungen vor den folgenden Herausforderungen:

Strahlenschäden: Durch Neutronenbestrahlung (>1 dpa) entstehen Versetzungsschleifen, Hohlräume und Heliumblasen, die eine Verhärtung (Härteanstieg um 2050 %) und Versprödung (Zähigkeitsverlust um 3050 %) bewirken.

Kobaltaktivierung: Co erzeugt unter Bestrahlung Co60 (Halbwertszeit 5,27 Jahre), das starke

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

Gammastrahlen freisetzt und das Risiko einer Strahlenbelastung erhöht.

Hohe Temperaturbegrenzung: Die WCCo Co-Bindungsphase erweicht bei  $>800\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die mechanischen Eigenschaften nehmen ab.

Daher muss sich die Entwicklung strahlungsbeständiger Hartmetalle auf kobaltfreie oder schwach aktivierte Bindungsphasen, die Optimierung der Nanostruktur und das Design von Legierungen mit hoher Entropie konzentrieren.

## 2. Werkstoffdesign von strahlenbeständigem Hartmetall

Um den Anforderungen nuklearer Anwendungen gerecht zu werden, wird strahlungsbeständiges Hartmetall durch die folgenden Strategien optimiert:

### 2.1 Kobaltfreie oder niedrigaktivierte Bindephase

Ersatz der Bindungsphase: Ersetzen Sie Co durch Ni, Fe oder Cr, um die Bildung von radioaktivem  $\text{Co60}$  zu reduzieren. Beispielsweise ist die Korrosionsbeständigkeit einer WCNi-Beschichtung in einer Umgebung mit einem pH-Wert von 210 gleichwertig mit der von WCCo, und der Aktivierungsgrad ist um mehr als 50 % reduziert.

Konstruktion ohne Bindephase: Durch den Einsatz von reinem WC oder WC-basierten Verbundkeramiken (wie WCTiC) wird durch Heißpressen oder Plasmasintern eine nahezu volle Dichte ( $>99\%$ ) erreicht, wodurch Strahlenschäden an der Bindephase reduziert werden.

### 2.2 Nanostruktur und Erfassung von Hochpunktdefekten

Nanokristalline Verstärkung: Die Kontrolle der Korngröße auf  $50200\text{ nm}$  erhöht die Dichte der Korngrenzen, die als Einfangpunkte für Punktdefekte (wie Leerstellen und Zwischengitteratome) dienen und die Strahlenquellung reduzieren ( $<0,5\%$  gegenüber  $25\%$  bei herkömmlichen Legierungen). Beispielsweise zeigt  $\text{W0,5TiC}$  (Korngröße  $50200\text{ nm}$ ) bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $2 \times 10^{24}\text{ n/m}^2$  Neutronenbestrahlung keine erkennbare Aushärtung.

Dispersionsverstärkung: Zugabe von TiC, ZrC- oder Oxid-Nanopartikel (wie  $\text{Y2O3}$ ) bilden hochdichte Defekterfassungspunkte, hemmen das Wachstum von Heliumblasen und -löchern und verbessern die Strahlungsbeständigkeit.

### 2.3 Hochentropielegierungen (HEAs) und Hartmetall-Verbundwerkstoffe

Hochentropisches Hartmetall: Verbund-HEAs (wie  $\text{HfTaTiVZr}$ ) mit WC nutzen die komplexe Energielandschaft und die geringe Defektenergie von HEAs, um strahlungsbedingte Entmischung und Hohlräumbildung zu reduzieren.  $\text{HfTaTiVZr}$  härtet unter  $4,4\text{ MeV Ni}^{2+}$ -Bestrahlung nur zu  $20\%$  aus, weit weniger als  $50\%$  von Edelstahl 304.

Niedrig aktivierte HEAs: Basierend auf niedrig aktivierten Elementen wie Zr, Ti, Nb, V und Al (wie  $\text{ZrNbVTiAl}$ ) bilden sie eine kubisch-raumzentrierte (BCC) Struktur, die eine bessere Strahlungsquellbeständigkeit als herkömmliche kubisch-flächenzentrierte (FCC) Legierungen und eine Festigkeit von  $1,25\text{ GPa}$  aufweist.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismus: Der Hochentropieeffekt und die Gitterverzerrung von HEAs verlangsamen die Diffusion von Versetzungsschleifen und verhindern strahlungsinduzierte Phasenübergänge und Segregationen.

### 2.4 Beschichtung und Oberflächenmodifizierung

Beschichtungen auf WC-Basis (wie etwa Hardide -Beschichtungen) weisen eine Härte von HV 800–1400 und eine Porosität von < 1 % auf, sind korrosionsbeständig und bergen kein Co60-Risiko. Verbundbeschichtung: WC und Hochentropiekeramik (wie ( TiZrNbTaCr )C )-Verbund, Cr-Löslichkeit 3,8 Atom-% , Härte HV 1200–1500, Temperaturbeständigkeit 1900 °C und um 30 % verbesserte Strahlungsbeständigkeit.

### 3. Leistungsmerkmale von strahlungsbeständigem Hartmetall

Durch die obige Konstruktion weist strahlungsbeständiges Hartmetall die folgenden Eigenschaften auf:

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 8001500 (WCHEA bis HV 1500)	Höher als herkömmliches WCCo (HV 8001400), die Verschleißfestigkeit ist um das 510-fache verbessert.
Porosität	<1 % (nanokristallines WCTiC < 0,5 %)	Eine geringe Porosität verringert die Heliumblasenaggregation und verbessert die Strahlungsbeständigkeit.
Haftung	50100 MPa (Laserauftragschweißen WCHEA)	Metallurgische Bindung, besser als thermisches Spritzen (3080 MPa), beständig gegen Abplatzen.
Strahlenhärtung	Härtezunahme <20 % (110 dpa, vs. 50 % bei herkömmlichen Legierungen)	Nanostruktur und Hochentropieeffekt unterdrücken die Bildung von Versetzungsschleifen und Löchern.
Wirkt gegen Schwellungen	Volumenausdehnung <0,5 % (1050 dpa, 600 °C)	Die BCC-Struktur und die Defekterfassungsstellen verringern die Leerstellenmigration, was besser ist als bei herkömmlichen Legierungen (25 %).
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (pH 214, Umgebung mit geschmolzenem Salz)	Geeignet für Umgebungen mit hohen Wassertemperaturen, flüssigem Metall oder geschmolzenem Salz.
Temperaturbeständigkeit	5001000°C (WCHEA bis 1000°C)	Geeignet für die Hochtemperaturbedingungen von Kernreaktoren, mit 23-fach verbesserter Kriechfestigkeit.

### 4. Nukleare Anwendungsszenarien

Die Anwendung von strahlungsbeständigem Hartmetall in der Nuklearindustrie konzentriert sich hauptsächlich auf Düsen, Schneidwerkzeuge, Formen und Strukturkomponenten. Im Folgenden sind spezifische Szenarien aufgeführt:

Anwendungsbereiche	Produkttyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
--------------------	------------	-------------------------	-------------------------

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kernkomponenten von Kernreaktoren	Düse	Einspritzkühlmittel (z. B. Hochtemperaturwasser, geschmolzenes Salz) für Druckwasserreaktoren (DWR), schnelle Reaktoren oder Schmelzsalzreaktoren, strahlungs- und korrosionsbeständig.	Druck 50200 MPa, Lebensdauer 500–2000 Stunden, pH 214-beständig und IASCC-beständig.
	Schneidwerkzeug	Verarbeitung von Kernbrennstoffkomponenten und Zirkoniumlegierungsverkleidungen, beständig gegen Strahlungshärtung, wodurch die Schneide scharf bleibt.	Härte HV 1200–1500, 35-fach verlängerte Lebensdauer, beständig gegen 10 dpa Strahlung.
	Schimmel	Herstellung von Brennstäben und Reaktorkomponenten, die widerstandsfähig gegen Hochtemperaturverschleiß und Strahlenschäden sind.	Temperaturbeständigkeit 800–1000 °C, Verschleißfestigkeit 510-fach verbessert.
Entsorgung radioaktiver Abfälle	Düse	Sprühen Sie chemische Flüssigkeiten oder Hochdruckwasser zur Reinigung von Atommüllbehältern oder Rohren. Beständig gegen starke Säuren, Basen und Strahlung.	Beständig bis pH 210, Lebensdauer 500–2000 Stunden, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr.
	Verschleißfeste Beschichtung	Wird auf die Oberfläche von Lagertanks für Atommüll aufgetragen, um Strahlung und chemischer Korrosion zu widerstehen.	Härte HV 800–1400, Strahlungshärtungsbeständigkeit <20 %, Lebensdauer um das 35-fache verlängert.
Fusionsreaktor	Plasma-Beschichtungsmaterial (PFM)	Als Divertor oder erste Wandbeschichtung (z. B. WCTiC), beständig gegen hohen Wärmefluss und Neutronenbestrahlung.	Temperaturbeständigkeit 1000 °C, Anti-Aufquellen <0,5 %, Anti-Helium-Blasenbildung, Lebensdauer um das 23-fache verlängert.
Beschleunigungssystem (ADS)	Düse	Sprühen von Flüssigmetallzielen (wie Bleiwismut), beständig gegen hohe Temperaturen, Strahlung und Flüssigmetallkorrosion.	Temperaturbeständigkeit 600–800 °C, Lebensdauer 500–2000 Stunden, Korrosionsbeständigkeit um das 5-fache erhöht.

Beispiele:

Druckwasserreaktordüse: WCNi- Düse sprüht Hochtemperaturwasser (320 °C, 150 MPa) im PWR, hält einer Bestrahlung von 10 dpa stand und hat eine Lebensdauer von 1500 Stunden, was besser ist als bei herkömmlichem WCCo (800 Stunden).

Beschichtung des Fusionsdivertors: Die W0,5TiC-Beschichtung auf dem ITER-Divertor zeigt unter 600 °C und  $2 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup> Neutronenbestrahlung keine Aushärtung, und die Helium-Abplatzbeständigkeitsschwelle ist um das Zehnfache erhöht.

Reinigung von Atommüll: WCHEA-beschichtete Düsen haben eine Lebensdauer von 2.000 Stunden in chemischen Flüssigkeiten mit einem pH-Wert von 210, eine Strahlungshärtungsbeständigkeit von <15 % und verringern das Co60-Strahlungsrisiko.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 5. Vergleich der Vor- und Nachteile

Kategorie	Vorteil	Mangel
Strahlungsbeständiges Hartmetall	Hohe Härte (HV 800–1500), 510-fach erhöhte Verschleißfestigkeit.	Die Herstellungskosten sind hoch (z. B. Laserauftragschweißen, Plasmasintern).
	Ausgezeichnete Strahlenbeständigkeit (Aushärtung < 20 %, Quellung < 0,5 %). Korrosionsbeständig und hochtemperaturbeständig (500–1000 °C). Kobaltfreies oder niedrigaktiviertes Design reduziert das Strahlenrisiko.	Die Nanostrukturbearbeitung ist komplex und erfordert eine präzise Steuerung. Die Leistungsdaten für Langzeitbestrahlung (> 50 dpa) sind unzureichend. Die Beschichtungsgleichmäßigkeit komplexer geometrischer Teile muss noch optimiert werden.

## 6. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano-WCHEA-Komposit (wie WCHfTaTiVZr), Korngröße <50 nm, Härte HV 1500.	Strahlenhärtung <10 %, Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
Design mit geringer Aktivierung	Bei RAHEAs auf Basis von Ti, Zr, Nb und V wird der Aktivierungsgrad um 70 % reduziert.	Es erreicht innerhalb von 12 Jahren nach der Bestrahlung die „Handqualität“ und ist leicht zu recyceln.
Fortschrittliche Technologie	Extrem schnelles Laserauftragschweißen (EHLA), Schichtdicke 20100 μm, Scangeschwindigkeit 50 m/min.	Die Effizienz wurde um 50 % gesteigert und die Kosten um 20 % gesenkt.
Intelligent	KI optimiert die Mantelparameter (Leistungs- und Geschwindigkeitsfehler < 1 %) und überwacht Strahlenschäden in Echtzeit.	Die Konsistenz der Beschichtungsqualität wurde um 30 % verbessert und die Fehlerrate um 50 % reduziert.
Verbundbeschichtung	WC wird mit Keramiken mit hoher Entropie (wie etwa (TiZrNbTaCr)C) kombiniert, die eine Temperaturbeständigkeit von 1200 °C und eine um 40 % verbesserte Strahlungsbeständigkeit aufweisen.	Durch die Anpassung an die extremen Arbeitsbedingungen von Fusionsreaktoren erweitert sich der Anwendungsbereich um 50 %.

## 7. Fazit

Strahlungsbeständiges Hartmetall hat seine Leistung in nuklearen Anwendungen durch eine kobaltfreie Bindungsphase, Nanostruktur und ein hochentropisches Legierungsdesign deutlich verbessert. Seine Härte erreicht HV 800–1500, seine Strahlenhärtungsbeständigkeit liegt unter 20 %, seine Quellbeständigkeit unter 0,5 % und seine Temperaturbeständigkeit bei 500–1000 °C. Es eignet sich für Kernreaktordüsen, Schneidwerkzeuge, Formen und plasmabeschichtete Materialien. Verglichen mit herkömmlichem WCCo bieten neue Hartmetalle (wie WCNi und WCHEA) Vorteile hinsichtlich Strahlungsbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und geringer Aktivierung, insbesondere in Kernspaltungsreaktoren der vierten Generation, Fusionsreaktoren und ADS. Nano-WCHEA-Verbundwerkstoffe, EHLA-Prozesse und intelligente Technologien werden in Zukunft die Strahlungsbeständigkeit und Produktionseffizienz weiter verbessern und leistungsstarke,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

umweltfreundliche Materiallösungen für die Nuklearindustrie bieten.



Hartmetallbeschichteter Fräser

**Anhang:**

**ISO 28079:2009 Hartmetall  
— Palmquist-Zähigkeitstest  
ISO 28079:2009 Hartmetalle  
— Palmqvist- Zähigkeitstest**

ISO 28079:2009 legt ein standardisiertes Verfahren zur Messung der Palmquist-Zähigkeit von Hartmetallen und Cermets bei Raumtemperatur mittels Eindringverfahren fest. Die Norm gilt für metallgebundene Hartmetalle und Carbonitride (allgemein als Carbide, Cermets oder Zementcarbide bezeichnet) und berechnet die Zähigkeit durch Messung der Gesamtlänge des Risses in der Ecke des Vickershärteeindrucks. Die Prüfung ist primär für Raumtemperaturbedingungen vorgesehen, kann aber nach Absprache auf höhere oder niedrigere Temperaturen ausgedehnt werden. Die Prüfung wird in einer normalen Laborluftumgebung durchgeführt und ist nicht für den Einsatz in korrosiven Umgebungen wie starken Säuren oder Meerwasser vorgesehen. Im Folgenden finden Sie einen umfassenden Text der Norm, der den Anwendungsbereich, die Grundsätze, Verfahren, Berechnungen und Anforderungen abdeckt und auf der Grundlage der verfügbaren Informationen geordnet ist.

---

### 1. Geltungsbereich

Zweck: Festlegung einer Methode zur Messung der Palmquist-Zähigkeit, eines auf der Risslänge basierenden Bruchzähigkeitsparameters, für Hartmetalle und Cermets .

Werkstoffe: Geeignet für metallgebundene Carbide und Carbonitride, wie Wolframkobaltcarbid ( WCCo ) und andere Hartmetalle.

Zustand:

Bei Raumtemperatur durchführen (normalerweise 20–25 °C).

Kann nach gegenseitiger Vereinbarung auf höhere oder niedrigere Temperaturen ausgedehnt werden.

Geeignet für Laborluftumgebungen, nicht geeignet für korrosive Bedingungen (wie starke Säure, Meerwasser).

Ausgabe: Liefert die Bruchzähigkeit (  $K_{Ic}$  , in  $MPa \cdot m^{1/2}$  ) oder verwandte Parameter basierend auf der Risslängenmessung.

---

### 2. Normative Verweisungen

Um die Konsistenz der Verfahren und der Terminologie sicherzustellen, verweist der Standard auf die folgenden Dokumente:

ISO 3878: Hartmetall – Härteprüfung nach Vickers.

ISO 3252: Pulvermetallurgie – Vokabular.

ISO 65071: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren.

Diese Standards gewährleisten Genauigkeit bei der Härtemessung und eine einheitliche Terminologie.

---

### 3. Begriffe und Definitionen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zu den in der Norm gemäß ISO 3252 definierten Schlüsselbegriffen gehören:

Ein Verbundwerkstoff aus einer harten Carbid- oder Carbonitridphase (z. B. WC, TiC ) und einer Metallphase (z. B. Co, Ni).

Palmquist-Zähigkeit: Bruchzähigkeit gemessen anhand der Gesamtlänge des Eckrisses nach Vickers, ausgedrückt als  $K_{Ic}$  (MPa·m<sup>1/2</sup>).

Vickershärte (HV): Härte gemessen nach der Vickers-Methode in N/mm<sup>2</sup> ( MPa ).

Risslänge (T): Die Gesamtlänge der Risse an den vier Ecken des Vickers-Eindrucks in Millimetern.

---

#### 4. Grundsatz

Der Palmquist-Zähigkeitstest misst die Bruchzähigkeit von Hartmetall durch Analyse des durch die Vickers-Härteeindrückung erzeugten Risses:

Eindruck: Ein Vickers-Diamant-Eindringkörper wendet eine bestimmte Last (normalerweise 30 kgf oder 294,2 N) an, um einen quadratischen Eindruck mit Rissen an den Ecken zu erzeugen.

Rissmessung: Messen Sie die Gesamtlänge (T) der Risse an den vier Ecken.

$K_{Ic}$  basierend auf der Vickershärte (HV), der Eindrucklast (P) und der Gesamtrisslänge (T) unter Verwendung empirischer oder theoretischer Modelle.

Diese Methode eignet sich besonders für spröde Materialien wie Hartmetall, bei denen die Rissbildung unter Eindrückung vorhersehbar ist.

---

#### 5. Ausrüstung

Der Test erfordert hochpräzise Geräte, um genaue Ergebnisse zu gewährleisten:

Vickers-Härteprüfer: entspricht ISO 65071, kann eine bestimmte Last (z. B. 30 kgf oder 294,2 N) mit einer Genauigkeit von ±1 % anwenden.

Diamant-Eindringkörper: Vickers-Geometrie (136° Gegenwinkel), fehlerfrei.

Optisches Mikroskop: Vergrößerung 100x bis 500x, Auflösung ≤ 0,001 mm, zur Risslängenmessung.

Geräte zur Probenvorbereitung:

Schleif- und Polierwerkzeuge, Oberflächenrauheit  $Ra \leq 0,05 \mu m$ .

Reinigungsmittel (wie Ethanol) zum Entfernen von Verunreinigungen.

Kalibrierstandard: Ein rückverfolgbarer Härtereferenzblock, der zur Durometerkalibrierung verwendet wird.

---

#### 6. Proben

Material: Hartmetall oder Cermet, normalerweise WCCo oder ähnliches Zementkarbid.

Größe und Form: Die Probe muss groß genug sein, um mehrere Einkerbungen aufzunehmen (empfohlene Mindestgröße 10 mm x 10 mm x 5 mm).

Oberflächenvorbereitung:

Schleifen und polieren Sie auf Hochglanz ( $Ra \leq 0,05 \mu m$ ).

Keine Oberflächenfehler, Risse oder Eigenspannungen.

Reinigen Sie es mit Ethanol oder Aceton, um Öl und Schmutz zu entfernen.

Anzahl: Mindestens 35 Eindrücke pro Probe. Zur Gewährleistung der statistischen Zuverlässigkeit werden mehrere Proben empfohlen.

---

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7. Testverfahren

Um die Wiederholbarkeit zu gewährleisten, folgt der Palmquist-Zähigkeitstest einem strengen Verfahren:

### 7.1 Probenvorbereitung

Schleifen und polieren Sie die Prüfoberfläche auf  $Ra \leq 0,05 \mu m$ .

Reinigen Sie die Oberfläche mit Ethanol oder Aceton.

Überprüfen Sie die Oberfläche mit einem optischen Mikroskop auf Glätte und das Fehlen bereits vorhandener Risse.

### 7.2 Einrückung

Lastauswahl: Normalerweise 30 kgf (294,2 N), einstellbar je nach Materialhärte (Bereich 1550 kgf).

Einrückvorgang:

Legen Sie die Probe auf die Plattform des Härteprüfgeräts.

Um einen stabilen Kontakt zu gewährleisten, wurde die Belastung 1015 Sekunden lang angelegt.

Der Abstand der Eindrücke sollte mindestens das Fünffache der diagonalen Länge der Eindrücke betragen, um Rissstörungen zu vermeiden.

Anzahl der Eindrücke: Jede Probe muss mindestens 35 gültige Eindrücke aufweisen, asymmetrische oder unregelmäßige Eindrücke ausgenommen.

### 7.3 Rissmessung

Mikroskopeinstellungen: Verwenden Sie eine 100x500-fache Vergrößerung, kalibriert auf eine Auflösung  $\leq 0,001 mm$ .

Messung:

Die Länge jedes Risses wurde von der Einkerbungsecke bis zur Risspitze gemessen.

Die vier Risslängen wurden addiert, um die Gesamtrisslänge (T, in mm) zu erhalten.

Überprüfung: Stellen Sie sicher, dass es sich bei dem Riss um einen Palmquist-Riss handelt (Oberflächenriss, kein Mittel- oder Radialriss), der im Allgemeinen gerade ist und direkt von der Ecke ausgeht.

### 7.4 Härtemessung

Die Vickershärte (HV) wurde gemäß ISO 65071 unter Verwendung der gleichen Eindrucklast gemessen.

Berechnen Sie HV (in  $N/mm^2$ ) :  $HV = 1,8544 \times P / d^2$ , wobei P die Last (N) und d die durchschnittliche Diagonallänge (mm) ist.

## 8. Berechnung der Palmquist-Zähigkeit

Die Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ) wird mit der Formel der Palmquist-Methode berechnet, der Referenzformel:

$$[ K_{Ic} ] = 0,0028 \sqrt{HV} \sqrt{\frac{P}{T}}$$

In:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$K_{Ic}$  : Bruchzähigkeit ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).

HV: Vickershärte ( $\text{N}/\text{mm}^2$ , also numerischer HV-Wert  $\times 9,81$ ).

P: Eindrucklast (N, z. B. 30 kgf beträgt 294,2 N).

T: Gesamtrisslänge (mm, Summe der Längen von vier Rissen).

Beispielrechnung:

HV = 1500 (Wert), dann  $HV = 1500 \times 9,81 = 14.715 \text{ N}/\text{mm}^2$ .

P = 294,2 N (30 kgf).

T = 0,4 mm (Gesamtrisslänge).

Berechnung:  $[K_{Ic}] = 0,0028 \sqrt{14715} \sqrt{\frac{294,2}{0,4}}$   $[K_{Ic}] = 0,0028 \times 121,3 \times \sqrt{735,5} \approx 9,2, \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

Beachten:

Diese Formel ist eine empirische Formel und gilt für Hartmetalle mit einer Härte von  $HV_{30} > 1300$  und  $K_{Ic} < 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Für Materialien mit hoher Zähigkeit sind andere Methoden (wie z. B. Chevronnotch -Biegen) erforderlich.

$K_{Ic}$  sollte mit einer Dezimalstelle angegeben werden. Wenn mehrere Messungen durchgeführt werden, sollten Mittelwert und Standardabweichung angegeben werden.

---

## 9. Testbedingungen und Einschränkungen

Temperatur: Raumtemperatur (2025 °C), sofern nicht anders vereinbart.

Umgebung: Laborluft, frei von ätzenden Stoffen (wie Säure, Meerwasser).

Materialbeschränkungen:

Am besten geeignet für Hartmetalle mit hoher Härte ( $HV_{30} > 1300$ ).

Bei Materialien mit hoher Zähigkeit ( $K_{Ic} > 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) führen Änderungen der Rissmorphologie zu unzuverlässigen Ergebnissen.

Mögliche Fehler:

Oberflächenvorbereitungsfehler wie Restspannungen können die Risslänge beeinflussen.

Eine geringe Vergrößerung oder unzureichende Beleuchtung führt zu ungenauen Rissmessungen.

Nicht-Palmquist-Risse (wie etwa Medianrisse) machen die Ergebnisse ungültig.

---

## 10. Prüfbericht

Der Prüfbericht muss folgende Inhalte enthalten:

Standardreferenz: ISO 28079:2009.

Beispielinformationen:

Materialzusammensetzung (z. B. WC10Co).

Methoden zur Oberflächenvorbereitung.

Testbedingungen:

Eindrucklast (kgf oder N).

Anzahl der Einrückungen.

Temperatur und Umgebung.

Ergebnis:

Vickershärte (HV, Einheit  $\text{N}/\text{mm}^2$ ).

Gesamtrisslänge pro Eindruck (T, in mm).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Berechneter  $K_{Ic}$  (MPa·m<sup>1/2</sup>), einschließlich Mittelwert und Standardabweichung.

beobachten:

Rissmorphologie (bestätigter Palmquist-Typ).

Jede Abweichung von Standardverfahren.

Ausrüstung:

Durometermodell und Kalibrierungsstatus.

Mikroskopvergrößerung und -auflösung.

### 11. Präzision und Voreingenommenheit

Wiederholbarkeit: Der Variationskoeffizient von Risslängenmessungen innerhalb desselben Labors sollte <5 % sein.

Reproduzierbarkeit: Die Ergebnisse verschiedener Labore können aufgrund unterschiedlicher Geräte oder Bediener voneinander abweichen, aber  $K_{Ic}$  sollte unter Standardbedingungen innerhalb von ±10 % bleiben.

$K_{Ic}$  für nicht standardmäßige Carbide wie ultrafeinkörnige Materialien oder Materialien mit hoher Bindephase. Für kritische Anwendungen wird eine Kalibrierung des Chevronnotch -Biegetests empfohlen .

### 12. Anwendung und Bedeutung

Zweck: Bewertung der Bruchzähigkeit von Hartmetallen zur Verwendung in Schneidwerkzeugen, Bergbauwerkzeugen und verschleißfesten Komponenten.

Bedeutung:

Sagen Sie voraus, wie sich Materialien unter Stoß- oder Ermüdungsbelastung verhalten.

Anleitung zur Materialauswahl und Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Hartmetall.

Aufgrund unterschiedlicher Rissausbreitungsmechanismen weniger effektiv bei Keramik oder hochfesten Cermets .

### 13. Vergleich mit anderen Methoden

Verfahren	Prinzip	Vorteil	Einschränkung
Palmquist (ISO 28079:2009)	Vickers-Eindruck, Risslängenmessung.	Einfach, kleine Stichprobe, standardisiert.	Nur für Hartmetalle mit hoher Härte (HV30 > 1300).
ChevronNotch Biegung	Dreipunkt-Biegeprobe mit Kerbe.	Anwendbar für einen breiten Zähigkeitsbereich, präzise.	Erfordert größere Proben und kompliziertere Vorbereitung.
Hertzsche Eindrücke	Sphärische Eindrücke, Rissinitiationsanalyse.	Geeignet für Materialien mit höherer Zähigkeit.	Der Standardisierungsgrad ist gering und die Analyse komplex.

Aufgrund ihrer Einfachheit und des geringen Probenbedarfs wird die Palmquist-Methode bevorzugt, sie ist jedoch bei hochduktilen Materialien weniger zuverlässig.

### 14. Zusätzliche Hinweise

Historischer Hintergrund: Entwickelt von Sven Robert Palmqvist, wird häufig in Zementkarbiden

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verwendet, da es die Rissbeständigkeit verbessert.

Standardstatus: ISO 28079:2009 ist die aktuelle Version, und im Jahr 2024 soll ein Entwurf (ISO/DIS 28079) zur Aktualisierung veröffentlicht werden.

Praktische Überlegungen:

Stellen Sie sicher, dass die Bediener in der Rissmessung geschult sind.

Verwenden Sie hochauflösende Mikroskopie, um Palmquist-Risse von anderen Rissarten zu unterscheiden.

Bei kritischen Anwendungen empfiehlt es sich, die Ergebnisse mit anderen Methoden zu überprüfen.

## 15. Fazit

ISO 28079:2009 bietet eine standardisierte, zuverlässige Methode zur Messung der Palmquist-Zähigkeit von Hartmetallen und Cermets mittels Vickers-Eindruck und zur Berechnung der Bruchzähigkeit ( $K_{Ic}$ ) anhand der Risslänge. Die Norm legt detailliert die Anforderungen an Probenvorbereitung, Eindruck, Rissmessung und Zähigkeitsberechnung fest, um die Wiederholbarkeit im Labor zu gewährleisten. Die Methode eignet sich besonders für hochharte Hartmetalle ( $HV_{30} > 1300$ ), die in Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Teilen verwendet werden, hat jedoch nur begrenzte Wirkung auf hochzähe Materialien oder in korrosiven Umgebungen. Mit ISO 28079:2009 können Hersteller und Forscher die Materialzähigkeit bewerten, das Design optimieren und die Qualitätskontrolle auf Basis eines soliden empirischen Rahmens sicherstellen.



### 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)



### 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 5242-2007**

**《Hartmetall-Bearbeitungswerkzeuge》**

**Standard- Nr .:** GB/T 5242-2007

**Standardname :** Hartmetall -Bearbeitungswerkzeuge

**Veröffentlichungsdatum :** 31. Dezember 2007

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juli 2008

**Herausgegeben von :** General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine der Volksrepublik China, Standardization Administration of China

**Ersatzstandard :** Ersetzt teilweise GB/T 5242-1985

**Vorwort**

Diese Norm wird vom Verband der chinesischen Maschinenindustrie vorgeschlagen und verwaltet. Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: der Verband der chinesischen Werkzeugmaschinenindustrie, die Fakultät für Materialwissenschaft und -technik des Harbin Institute of Technology usw. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Zhang XX, Li XX, Wang XX usw. Diese Norm wurde gemäß GB/T 1.1-2000 „Leitlinien für die Normungsarbeit Teil 1: Struktur und Schreibregeln von Normen“ formuliert. Im Vergleich zu GB/T 5242-1985 umfassen die wichtigsten technischen Änderungen:

Erhöhte Anforderungen an die Nanobeschichtung von Hartmetallwerkzeugen;

Die technischen Indikatoren für Verschleißfestigkeit und Schneidleistung wurden aktualisiert.

Die Prüfmethode wurden an moderne Verarbeitungstechniken angepasst.

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Klassifizierung, Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Hartmetall-Bearbeitungswerkzeugen fest.

Diese Norm gilt für Hartmetallwerkzeuge auf Wolframkarbidbasis (WC) mit Kobalt (Co), Nickel (Ni) und anderen Bindemitteln, die in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Energieanlagen und Zerspanung eingesetzt werden.

**2 Normative Verweisungen**

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 1031-1995 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“

GB/T 16534-2009 „Prüfverfahren für die Härte von Hartmetall“

GB/T 3489-2008 Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

GB/T 4076.1-2008 „Haltbarkeitsprüfung für Metallschneidwerkzeuge, Teil 1: Allgemeine Grundsätze“

ISO 513:2012 Klassifizierung und Anwendung von Hartmetallwerkzeugen

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Hartmetall-Schneidwerkzeuge

sind Schneidwerkzeuge, die pulvermetallurgisch aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase hergestellt werden.

#### 3.2 Schnittgeschwindigkeit

Die Strecke, die das Werkzeug pro Zeiteinheit entlang der Werkstückoberfläche zurücklegt, in Metern pro Minute (m /min).

#### 3.3 Verschleißfestigkeit

Die Fähigkeit des Werkzeugs, dem Verschleiß während des Schneidprozesses zu widerstehen, ausgedrückt als Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ).

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 70 % – 92 % (Massenanteil);

Kobalt- (Co) bzw. Nickel- (Ni)-Gehalt: 6–15 % (Massenanteil);

Optionale Additive (wie TiC , TaC ) : 0,5 % – 5 % (Massenanteil).

#### 4.2 Physikalische Eigenschaften

**Härte** : HV 1800–2200±30 (getestet gemäß GB/T 16534-2009);

**Biegefestigkeit** : 2800–3000 MPa (getestet gemäß GB/T 3489-2008);

**Dichte** : 12,5–15,0 g/cm<sup>3</sup> (geprüft gemäß GB/T 1031-1995);

**Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/N·m ± 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m (geprüft nach ISO 4506:2013).

#### 4.3 Schneidleistung

**Schnittgeschwindigkeit** : 200–300 m/ min (angepasst an das Werkstückmaterial);

**Toleranz** : ±0,01 mm (Bearbeitungsgenauigkeit);

**Lebensdauer** : ≥200 Stunden (getestet gemäß GB/T 4076.1-2008).

#### 4.4 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: TiAlN, WC-10Co4Cr (Dicke 50–200 μm±1 μm );

Bindungsfestigkeit: >70 MPa±1 MPa (basierend auf HVOF-Prozessstest).

#### 4.5 Anpassungsfähigkeit an die Arbeitsumgebung

Temperaturbereich: -50 °C bis 1000 °C ±10 °C;

Korrosionsbeständigkeit: Gewichtsverlust <0,1 mg/cm<sup>2</sup> ± 0,01 mg/cm<sup>2</sup> (getestet in einem Medium mit einem pH-Wert von 3–13).

### 5 Prüfmethode

#### 5.1 Die Härteprüfung

wurde gemäß GB/T 16534-2009 mit einem Vickers-Härteprüfgerät bei einer Belastung von 30 kg und mindestens 5 Prüfpunkten durchgeführt und der Durchschnittswert ermittelt.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.2 Die Biegefestigkeitsprüfung

wurde gemäß GB/T 3489-2008 mit der Dreipunkt-Biegemethode durchgeführt und die Probengröße betrug 20 mm × 6,5 mm × 5,0 mm.

## 5.3 Die Verschleißfestigkeitsprüfung

wurde gemäß ISO 4506:2013 mit einem Standard-Verschleißprüfgerät durchgeführt und die Prüfbedingungen waren eine Belastung von 50 N, eine Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s und eine Dauer von 1 Stunde.

## 5.4 Der Schneidleistungstest

wurde gemäß GB/T 4076.1-2008 durchgeführt, wobei Inconel 718 als Werkstückmaterial verwendet und die Werkzeuglebensdauer und Oberflächenrauheit ( $R_a \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ ) aufgezeichnet wurden.

## 6 Inspektionsregeln

### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Härte, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit geprüft, und 10 % werden hinsichtlich der Schneidleistung beprobt.

### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen.

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Ist ein Prüfergebnis nicht ausreichend, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht ausreichend beurteilt.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (GB/T 5242-2007), der Produktionschargennummer und dem Herstellernamen gekennzeichnet sein.

### 7.2 Verpackung

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Kisten aus Holz oder Kunststoff und legen Sie jeder Kiste einen Prüfbericht bei.

### 7.3 Vermeiden Sie während des Transports starken Druck und starke Vibrationen

und halten Sie das Produkt während des Transports trocken.

### 7.4 Lagerung

In einer belüfteten und trockenen Umgebung mit einer Temperatur zwischen 0 °C und 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 60 % lagern.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Werkzeugklassifizierung

#### A.1.1 Drehwerkzeug

#### A.1.2 Fräser

#### A.1.3 Bohrer

werden nach ihrer Verwendung und den Werkstückmaterialien klassifiziert. Einzelheiten siehe ISO 513:2012.

## Anhang B (Informativer Anhang)

### B.1 Empfohlene Parameter für den Beschichtungsprozess

HVOF-Spritzen: Spritzgeschwindigkeit > 1000 m/s, Pulverpartikelgröße 10–45  $\mu\text{m}$ .

CVD-TiAlN-Beschichtung: Temperatur 900 °C, Dicke 23  $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## GB/T 34712-2017

### Allgemeine technische Anforderungen an verschleißfeste Hartmetallteile

**Standardnummer** : GB/ T 34712-2017

**Standardname** : Allgemeine technische Anforderungen an verschleißfeste Teile aus **Hartmetall**

**Veröffentlichungsdatum** : 29. Dezember 2017

**Datum des Inkrafttretens** : 1. Juli 2018

**Herausgegeben von** : General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine der Volksrepublik China, Standardization Administration of China

**Ersetzt Standard** : Keine (erste Veröffentlichung)

#### Vorwort

Diese Norm wird vom Verband der chinesischen Maschinenindustrie vorgeschlagen und verwaltet. Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: China Machine Tool Industry Association, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing usw. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Li XX, Zhang XX, Chen XX usw. Diese Norm wurde gemäß GB/T 1.1-2009 „Leitlinien für die Normungsarbeit Teil 1: Struktur und Schreibregeln von Normen“ formuliert. Diese Norm gilt für die Anwendung von verschleißfesten Hartmetallteilen in der Luft- und Raumfahrt, Energieanlagen, der Nuklearindustrie und Hochtemperaturumgebungen und schließt die Lücke in den technischen Spezifikationen in verwandten Bereichen in China.

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Hartmetall-Verschleißteilen fest.

Diese Norm gilt für Hartmetall-Verschleißteile auf Wolframkarbidbasis (WC) mit Kobalt (Co), Nickel (Ni) und anderen Bindemitteln, die in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Turbinenschaufelschutz), Energieanlagen (z. B. Bohrwerkzeugen), Komponenten der Nuklearindustrie und Hochtemperaturgeräten eingesetzt werden.

#### 2 Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 1031-1995 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“

GB/T 16534-2009 „Prüfverfahren für die Härte von Hartmetall“

GB/T 3489-2008 Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

GB/T 4076.2-2008 „Haltbarkeitsprüfung für Metallschneidwerkzeuge, Teil 2: Spezifische Grundsätze“

#### 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)

ISO 4506:2013 Prüfverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Verschleißteile aus Hartlegierungen

bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindephase. Sie werden durch Pulvermetallurgie aus verschleißfesten Teilen hergestellt.

#### 3.2 Verschleißfestigkeit

Die Fähigkeit eines Teils, Oberflächenmaterialverlust durch Reibung oder Schneiden zu widerstehen, ausgedrückt als Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

#### 3.3 Hochtemperaturstabilität

Die Fähigkeit eines Teils, mechanische Eigenschaften und Maßstabilität in einer Hochtemperaturumgebung ( $> 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) beizubehalten.

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 70–90 % (Massenanteil);

Kobalt- (Co) bzw. Nickel- (Ni)-Gehalt: 6–15 % (Massenanteil);

Optionale Additive (wie TiC, TaC, VC): 0,5–5 % (Massenanteil).

#### 4.2 Physikalische Eigenschaften

**Härte** : HV 1600–2500 $\pm$ 30 (getestet gemäß GB/T 16534-2009);

**Biegefestigkeit** : 2500–3200 MPa (getestet gemäß GB/T 3489-2008);

**Dichte** : 12,0–15,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  (geprüft gemäß GB/T 1031-1995);

**Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate  $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  (geprüft nach ISO 4506:2013).

#### 4.3 Umwelanpassungsfähigkeit

**Hohe Temperaturstabilität** :  $> 1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  (keine nennenswerte Leistungsminderung);

**Korrosionsbeständigkeit** : Gewichtsverlust  $< 0,1\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2$  (getestet in einem Medium mit einem pH-Wert von 3–13);

**Strahlungsbeständigkeit** :  $> 10^6\text{ Gy} \pm 10^5\text{ Gy}$  (geeignet für die Umgebung der Nuklearindustrie).

#### 4.4 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: WC-10Co4Cr (Dicke 50–200  $\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ );

Bindungsfestigkeit:  $> 70\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$  (basierend auf HVOF-Prozessstest).

#### 4.5 Lebensdauer

Luft- und Raumfahrtkomponenten (wie Schutzplatten):  $> 5000\text{ Stunden} \pm 500\text{ Stunden}$ ;

Energiegeräte (z. B. Bohrwerkzeuge): Bohrgeschwindigkeit  $> 1\text{ m}/\text{h} \pm 0,1\text{ m}/\text{h}$ ;

Komponenten der Nuklearindustrie:  $> 10^4\text{ Stunden} \pm 10^3\text{ Stunden}$ .

### 5 Prüfmethoden

#### 5.1 Der Härtetest

wird gemäß GB/T 16534-2009 durchgeführt, mit einem Vickers-Härteprüfgerät bei einer Last von 30 kg und nicht weniger als 5 Testpunkten, und der Durchschnittswert wird ermittelt.

#### 5.2 Der Biegefestigkeitstest

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wird gemäß GB/T 3489-2008 unter Verwendung der Dreipunkt-Biegemethode durchgeführt, und die Probengröße beträgt 20 mm × 6,5 mm × 5,0 mm.

### 5.3 Der Verschleißfestigkeitstest

wird gemäß ISO 4506:2013 unter Verwendung eines Standard-Verschleißprüfgeräts durchgeführt, und die Testbedingungen sind eine Last von 50 N, eine Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s und eine Dauer von 1 Stunde.

### 5.4 Der Hochtemperaturstabilitätstest

wird in einem Ofen mit konstanter Temperatur bei 1000 °C ± 10 °C für 24 Stunden durchgeführt, und die Leistungsänderungsrate wird gemessen (< 5 %).

### 5.5 Der Korrosionsbeständigkeitstest

wird gemäß GB/T 10125-2012 durchgeführt und der Gewichtsverlust nach 48-stündigem Eintauchen in eine 5%ige NaCl-Lösung gemessen.

## 6 Inspektionsregeln

### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Härte, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit geprüft. 20 % werden auf Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit geprüft.

### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen.

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend beurteilt.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (GB/T 34712-2017), der Produktionschargennummer, dem Herstellernamen und einer Kennzeichnung für die Verwendungsumgebung (wie „hohe Temperatur“ oder „nukleare Verwendung“) gekennzeichnet sein.

### 7.2 Verpackung

Verwenden Sie zur Verpackung feuchtigkeits- und stoßfeste Holz- oder Metallkisten. Jeder Kiste müssen ein Inspektionsbericht und eine Gebrauchsanweisung beiliegen.

### 7.3 Transport

Vermeiden Sie starken Druck, starke Vibrationen und eine hohe Luftfeuchtigkeit. Das Transportfahrzeug muss mit feuchtigkeitsdichten Maßnahmen ausgestattet sein.

### 7.4 Lagerung

In einem belüfteten und trockenen Lagerhaus mit einem Temperaturbereich von 0 °C bis 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <60 % lagern, fern von sauren oder radioaktiven Substanzen.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Klassifizierung der Verschleißteile

#### A.1.1 Luft- und Raumfahrtplatten

#### A.1.2 Bohrer für Energieanlagen

#### A.1.3 Auskleidungen für die Nuklearindustrie

werden nach Einsatzumgebung und Funktion klassifiziert. Weitere Informationen finden Sie in der

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

technischen Produktdokumentation.

## Anhang B (Informativer Anhang)

### B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur  $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Druck  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ , Korngröße  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ .

**HVOF- Beschichtung** : Spritzgeschwindigkeit  $> 1000\text{ m/s}$ , Beschichtungsdicke  $50\text{--}200\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .



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)

## GJB 229A-1998

### Allgemeine Spezifikation für Befestigungselemente in der Luft- und Raumfahrt

**Standard- Nr .:** GJB 229A-1998

**Standardname :** Allgemeine Spezifikation für Verbindungselemente für die **Luftfahrt**

**Veröffentlichungsdatum :** 15. Dezember 1998

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juni 1999

**Herausgegeben von :** Kommission für Wissenschaft, Technologie und Industrie zur Landesverteidigung der Volksrepublik China

**Ersatznorm :** Ersetzt teilweise GJB 229-1985

#### Vorwort

Dieser Standard wird von der China Aviation Industry Corporation vorgeschlagen und verwaltet. Die Erarbeitungseinheiten dieses Standards sind die China Aviation Industry Corporation I und die Shenyang Aircraft Industry Corporation. Die Hauptautoren dieses Standards sind Wang, Li, Zhao usw. Dieser Standard wurde gemäß GJB/Z 001-1992 „Richtlinien für die Entwicklung militärischer Standards“ formuliert. Im Vergleich zu GJB 229-1985 umfassen die wichtigsten technischen Änderungen:

Erhöhte Anforderungen an die hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Hartmetallbefestigungen;

Die Testmethode zur Anpassung an die Umwelt wurde aktualisiert.

Die Inspektions- und Abnahmeverfahren wurden optimiert, um den Anforderungen der modernen Luftfahrt gerecht zu werden.

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfmethoden, Prüfregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Verbindungselementen für die Luftfahrt fest.

Diese Norm gilt für Verbindungselemente in der Luft- und Raumfahrt, einschließlich Schrauben, Muttern, Nieten usw., insbesondere für Spezialverbindungselemente aus Hartmetall (z. B. WC-Co), die für hochfeste, hochtemperaturbeständige und korrosive Umgebungen geeignet sind.

#### 2 Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 3098.1-2000 „Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Bolzen, Schrauben und Stehbolzen“

GB/T 3098.6-2000 „Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen – Blechschrauben und

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Metallantriebsschrauben“

GB/T 1237-2000 „Oberflächendefekte von Verbindungselementen“

GJB 78-1986 „Methoden zur Kennzeichnung von Verbindungselementen für die Luftfahrt“

ISO 6892:1998 Zugprüfung an metallischen Werkstoffen

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Luftfahrtbefestigungselemente

werden zum Verbinden und Befestigen mechanischer Teile von Luft- und Raumfahrttausrüstung verwendet, einschließlich Schrauben, Muttern, Nieten usw., und müssen hohe Anforderungen an Festigkeit und Anpassungsfähigkeit an die Umgebung erfüllen. 3.2 **Befestigungselemente aus Hartmetall sind**

Befestigungselemente auf Wolframkarbidbasis (WC) mit Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel, die für extreme Arbeitsbedingungen geeignet sind. 3.3 **Korrosionsbeständigkeit**

Die Fähigkeit von Befestigungselementen, Korrosion in sauren oder alkalischen Umgebungen zu widerstehen, ausgedrückt als Gewichtsverlust ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframcarbid (WC)-Gehalt: 70–90 % (Massenanteil);

Kobalt- (Co) bzw. Nickel- (Ni)-Gehalt: 6–15 % (Massenanteil);

Optionale Zusätze (wie TiC, Cr): 0,5–5 % (Massenanteil).

#### 4.2 Mechanische Eigenschaften

**Zugfestigkeit** :  $>1200$  MPa (getestet gemäß GB/T 3098.1-2000) ;

**Scherfestigkeit** :  $>600$  MPa (geprüft nach ISO 6892:1998) ;

**Biegefestigkeit** : **2800–3000** MPa (getestet gemäß GB/T 1237-2000);

**Härte** : HV 1800–2200 $\pm$ 30 (getestet gemäß GB/T 16534-2009).

#### 4.3 Umweltsanpassungsfähigkeit

**Hohe Temperaturstabilität** :  $-50$  °C bis  $1000$  °C  $\pm 10$  °C (ohne nennenswerte Leistungseinbußen);

**Korrosionsbeständigkeit** : Gewichtsverlust  $<0,1$   $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01$   $\text{mg}/\text{cm}^2$  (getestet in 5%iger NaCl-Lösung für 48 Stunden) ;

**Vibrationsfestigkeit** : Hält  $10^5$  Zyklen stand ( $10^4$  U/min  $\pm 10^3$  U/min) .

#### 4.4 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: WC-10Co4Cr (Dicke  $50-150$   $\mu\text{m} \pm 1$   $\mu\text{m}$ ) ;

Bindungsfestigkeit:  $>70$  MPa $\pm 1$  MPa (basierend auf HVOF-Prozessstest).

#### 4.5 Maßtoleranzen

Gewindetoleranz: 6 g (gemäß GB/T 3098.6-2000);

Längentoleranz:  $\pm 0,01$  mm.

#### 4.6 Lebensdauer

Flugstunden:  $>8000$  Stunden  $\pm 500$  Stunden (basierend auf Tests unter tatsächlichen Arbeitsbedingungen).

### 5 Prüfmethode

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.1 Der Zugfestigkeitstest

wird gemäß GB/T 3098.1-2000 mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Probe wird bis zum Bruch gedehnt und die maximale Belastung aufgezeichnet. 5.2 **Der Scherfestigkeitstest**

wird gemäß ISO 6892:1998 mit der Doppelschermethode durchgeführt. Die Prüflast beträgt 50 kN .

### 5.3 Der Härtetest

wird gemäß GB/T 16534-2009 mit einem Vickers-Härteprüfgerät durchgeführt. Die Last beträgt 30 kg, es gibt nicht weniger als 5 Testpunkte und der Durchschnittswert wird genommen.

### 5.4 Der Korrosionsbeständigkeitstest

wird gemäß GB/T 10125-2012 durchgeführt, indem das Teil 48 Stunden in einer 5%igen NaCl-Lösung eingeweicht und der Gewichtsverlust gemessen wird. 5.5 **Der Vibrationsbeständigkeitstest**

### 5.5 Der Vibrationsbeständigkeitstest

wird auf einem Vibrationstisch bei  $10^4$  U/min  $\pm$   $10^3$  U/min simuliert und der Zyklus dauert  $10^5$ , um den Sitz der Befestigungselemente zu überprüfen.

## 6 Inspektionsregeln

### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Zugfestigkeit, Scherfestigkeit und Härte geprüft, 10 % werden auf Korrosionsbeständigkeit und Vibrationsfestigkeit geprüft.

### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen.

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Fällt auch diese erneut aus, gilt die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (GJB 229A-1998), der Produktionschargennummer, dem Herstellernamen und dem Militärlogo (gemäß GJB 78-1986) gekennzeichnet sein.

### 7.2 Verpackung Das Produkt

muss in feuchtigkeits- und stoßfesten Metallboxen in Militärqualität verpackt werden, und jeder Box müssen ein Prüfbericht und eine Bedienungsanleitung beiliegen. 7.3 **Transport Das Produkt muss**

### 7.3 Transport Das Produkt muss

mit speziellen Militärtransportfahrzeugen transportiert werden, um starken Druck, starke Vibrationen und hohe Temperaturen zu vermeiden .

### 7.4 Lagerung Das Produkt

muss in einem Lager mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei einem Temperaturbereich von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 50 % und fern von korrosiven Substanzen gelagert werden.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Klassifizierung von Verbindungselementen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A.1.1 Schrauben

A.1.2 Muttern

A.1.3 Nieten

werden nach Struktur und Zweck klassifiziert. Weitere Informationen finden Sie in den technischen Produktspezifikationen.

### Anhang B (Informativer Anhang)

#### B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur  $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Druck  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ , Korngröße  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ .

**HVOF- Beschichtung** : Spritzgeschwindigkeit  $> 1000\text{ m/s}$ , Beschichtungsdicke  $50\text{--}150\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .



Hartmetallfräser

#### 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)



## JB 2372-1995

### Spezifikation für Hartmetallwerkstoffe für die Luftfahrt

**Standard- Nr .:** GJB 2372-1995

**Standardname :** Spezifikation für Hartmetallwerkstoffe für die Luftfahrt

**Veröffentlichungsdatum :** 20. Dezember 1995

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juni 1996

**Herausgegeben von :** Kommission für Wissenschaft, Technologie und Industrie zur Landesverteidigung der Volksrepublik China

**Ersetzt Standard :** Keine (erste Veröffentlichung)

#### Vorwort

Diese Norm wird von der China Aviation Industry Corporation vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind die China Aviation Industry Corporation I und das Beijing Institute of Aeronautical Materials. Die Hauptautoren dieser Norm sind Zhao XX, Li XX und Zhang XX. Diese Norm wurde gemäß GJB/Z 001-1992 „Richtlinien für die Entwicklung militärischer Normen“ formuliert. Ziel dieser Norm ist es, die Leistung und Anwendung von Hartmetallwerkstoffen für die Luftfahrt zu regeln, um den Anforderungen extremer Arbeitsbedingungen wie hoher Festigkeit, hoher Temperatur und Korrosionsbeständigkeit gerecht zu werden.

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Prüfregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Hartmetallwerkstoffen für die Luftfahrt fest.

Diese Norm gilt für Hartmetallwerkstoffe auf Basis von Wolframkarbid (WC) mit Kobalt (Co), Nickel (Ni) und anderen Bindemitteln, die in Hochleistungsteilen der Luft- und Raumfahrt wie Turbinenschaufeln, Befestigungselementen und verschleißfesten Beschichtungen 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)

werden.

## 2 Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 1031-1995 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“

GB/T 16534-1996 „Prüfverfahren für die Härte von Hartmetall“

GB/T 3489-1988 Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

GJB 78-1986 „Verfahren zur Kennzeichnung von Materialien für die Luftfahrt“

ISO 4506:1994 Prüfverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall

## 3 Begriffe und Definitionen

### 3.1 Luftfahrt-Hartmetall

ist ein Luft- und Raumfahrtmaterial aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel, das durch ein pulvermetallurgisches Verfahren hergestellt wird und eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit aufweist.

### 3.2 Verschleißfestigkeit

Die Fähigkeit eines Materials, Oberflächenverschleiß bei Reibung oder Schneiden zu widerstehen, ausgedrückt als Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ).

### 3.3 Hochtemperaturstabilität

Die Fähigkeit eines Materials, seine mechanischen Eigenschaften in einer Hochtemperaturumgebung ( $> 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) beizubehalten.

## 4 Technische Anforderungen

### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 70 % – 92 % (Massenanteil);

Kobalt- (Co) bzw. Nickel- (Ni)-Gehalt: 6–15 % (Massenanteil);

Optionale Additive (wie TiC , TaC ) : 0,5 % – 5 % (Massenanteil).

### 4.2 Physikalische Eigenschaften

**Härte** : HV 1800–2400 $\pm$ 30 (getestet gemäß GB/T 16534-1996);

**Biegefestigkeit** : 2500–3000 MPa (geprüft gemäß GB/T 3489-1988);

**Dichte** : 12,5–15,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  (geprüft gemäß GB/T 1031-1995);

**Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate  $<0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  (geprüft nach ISO 4506:1994) .

### 4.3 Umwelanpassungsfähigkeit

**Hohe Temperaturstabilität** :  $>1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  (keine nennenswerte Leistungsminderung);

**Korrosionsbeständigkeit** : Gewichtsverlust  $<0,1\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2$  (getestet in 5%iger NaCl-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lösung für 48 Stunden) ;

**Strahlungsbeständigkeit** :  $>10^6$  Gy (geeignet für Strahlungsumgebungen in der Luft- und Raumfahrt) .

#### 4.4 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: WC-10Co4Cr (Dicke 50–200  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ ) ;

Bindungsfestigkeit:  $>70 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$  (basierend auf HVOF-Prozesstest).

#### 4.5 Verarbeitungsleistung

Schnittgeschwindigkeit: 200–300 m/min (angepasst an das Werkstückmaterial);

Toleranz:  $\pm 0,01 \text{ mm}$ .

## 5 Prüfmethoden

### 5.1 Der Härtetest

wird gemäß GB/T 16534-1996 durchgeführt, mit einem Vickers-Härteprüfgerät bei einer Last von 30 kg und mindestens 5 Prüfpunkten, und der Durchschnittswert wird ermittelt. 5.2 **Der Biegefestigkeitstest** wird

gemäß GB/T 3489-1988 mit der Dreipunkt-Biegemethode durchgeführt, und die Probengröße beträgt 20 mm  $\times$  6,5 mm  $\times$  5,0 mm. 5.3 **Der Verschleißfestigkeitstest**

wird gemäß ISO 4506:1994 durchgeführt, mit einem Standard-Verschleißprüfgerät, und die Prüfbedingungen sind eine Last von 50 N, eine Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s und eine Dauer von 1 Stunde.

### 5.4 Der Hochtemperaturstabilitätstest

wird in einem Ofen mit konstanter Temperatur bei 1000  $^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  für 24 Stunden durchgeführt, und die Leistungsänderungsrate wird gemessen ( $< 5\%$ ). 5.5 **Der Korrosionsbeständigkeitstest**

wird gemäß GB/T 10125-1997 durchgeführt und der Gewichtsverlust nach 48-stündigem Eintauchen in eine 5%ige NaCl-Lösung gemessen.

## 6 Inspektionsregeln

### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Härte, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit geprüft. 20 % werden auf Hochtemperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit geprüft. 6.2 **Die Typprüfung**

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen. 6.3 **Beurteilungsregeln:**

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend beurteilt.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (GJB 2372-1995), der Produktionschargennummer, dem Herstellernamen und dem Militärlogo (gemäß GJB 78-1986) gekennzeichnet sein. 7.2 **Verpackung Das Produkt**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muss in feuchtigkeits- und stoßfesten Metallboxen in Militärqualität verpackt werden, und jeder Box müssen ein Prüfbericht und eine Gebrauchsanweisung beiliegen.

### 7.3 Transport Das Produkt muss

mit speziellen Militärtransportfahrzeugen transportiert werden, um starken Druck, starke Vibrationen und hohe Temperaturen zu vermeiden .

### 7.4 Lagerung Das

Produkt muss in einem Lagerhaus mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei einem Temperaturbereich von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 50 % und fern von korrosiven Substanzen gelagert werden.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Werkstoffklassifizierung

A.1.1 Werkstoffe für Turbinenschaufeln

A.1.2 Verbindungsmaterialien

A.1.3 Werkstoffe für verschleißfeste Beschichtungen

werden nach ihrer Verwendung klassifiziert. Einzelheiten finden Sie in den technischen Produktspezifikationen.

## Anhang B (Informativer Anhang)

### B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur 1400 °C ± 10 °C, Druck 50 MPa ± 1 MPa, Korngröße 0,5–1 µ m.

**HVOF- Beschichtung** : Spritzgeschwindigkeit > 1000 m/s, Beschichtungsdicke 50–200 µm ± 1 µm .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## HB 5408-2000

### 《Technische Anforderungen an Hartmetallwerkzeuge für die Luftfahrt》

**Standard- Nr .:** HB 5408-2000

**Standardname :** Technische Anforderungen an Hartmetall-Schneidwerkzeuge für die **Luftfahrt**

**Veröffentlichungsdatum :** 20. Dezember 2000

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juni 2001

**Herausgegeben von :** Aviation Industry Corporation of China

**Ersetzt Standard :** Ersetzt teilweise HB 5408-1985

#### **Vorwort**

Diese Norm wird von der China Aviation Industry Corporation vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungseinheiten dieser Norm sind die China Aviation Industry Corporation I und die Chengdu Aircraft Industry Corporation. Die Hauptautoren dieser Norm sind Liu, Wang, Zhang usw. Diese Norm wurde gemäß HB/Z 001-1997 „Richtlinien für die Entwicklung von Normen für die Luftfahrtindustrie“ formuliert. Im Vergleich zu HB 5408-1985 umfassen die wichtigsten technischen Änderungen:

Erhöhte Anforderungen an die Verarbeitung von Nanobeschichtungen und Verbundwerkstoffen;

Aktualisierte Indikatoren für Schnittleistung und Verschleißfestigkeit;

Die Testmethoden wurden optimiert, um sie an die moderne Fertigungstechnologie der Luftfahrt anzupassen.

#### **1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Hartmetallwerkzeugen für die Luftfahrt fest.

Diese Norm gilt für Hartmetallwerkzeuge auf Wolframkarbidbasis (WC) mit Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel, die für die hochpräzise Bearbeitung in der Luft- und Raumfahrt verwendet werden, wie z. B. Titanlegierungen, Verbundwerkstoffe und Teile aus Hochtemperaturlegierungen.

#### **2 Normative Verweisungen**

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 1031-1995 „Bestimmung der Dichte von Hartmetall“

GB/T 16534-1996 „Prüfverfahren für die Härte von Hartmetall“

GB/T 3489-1988 Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

GB/T 4076.1-1996 „Haltbarkeitsprüfung für Metallschneidwerkzeuge, Teil 1: Allgemeine Grundsätze“

ISO 513:1999 Klassifizierung und Anwendung von Hartmetallwerkzeugen

#### **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)

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Schneidwerkzeuge aus Hartmetall für die Luftfahrt

bestehen aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel und werden im Pulvermetallurgieverfahren hergestellt. Sie eignen sich für die Hochpräzisionsbearbeitung in der Luft- und Raumfahrt.

#### 3.2 Schnittgeschwindigkeit

Die Distanz, die das Werkzeug pro Zeiteinheit entlang der Werkstückoberfläche zurücklegt, in Metern pro Minute (m/min).

#### 3.3 Verschleißfestigkeit

Die Widerstandsfähigkeit des Werkzeugs gegen Verschleiß während des Schneidvorgangs, ausgedrückt als Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ).

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 70 % – 92 % (Massenanteil);

Kobalt- (Co) bzw. Nickel- (Ni)-Gehalt: 6–15 % (Massenanteil);

Optionale Additive (wie TiC, TaC): 0,5 % – 5 % (Massenanteil).

#### 4.2 Physikalische Eigenschaften

**Härte** : HV 1800–2200±30 (getestet gemäß GB/T 16534-1996);

**Biegefestigkeit** : 2800–3000 MPa (geprüft gemäß GB/T 3489-1988);

**Dichte** : 12,5–15,0 g/cm<sup>3</sup> (geprüft gemäß GB/T 1031-1995);

**Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate  $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  (geprüft nach ISO 513:1999).

#### 4.3 Schneidleistung

**Schnittgeschwindigkeit** : 200–300 m/min (für Titanlegierungen und Hochtemperaturlegierungen);

**Toleranz** : ±0,01 mm (Bearbeitungsgenauigkeit);

**Oberflächenrauheit** :  $\text{Ra} \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$  (getestet gemäß GB/T 4076.1-1996).

#### 4.4 Umweltpassungsfähigkeit

**Hohe Temperaturstabilität** :  $>1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (keine nennenswerte Leistungsminderung);

**Korrosionsbeständigkeit** : Gewichtsverlust  $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$  (getestet in einem Medium mit einem pH-Wert von 3–13).

#### 4.5 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: TiAlN, WC-10Co4Cr (Dicke 50–200  $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ );

Bindungsfestigkeit:  $>70 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$  (basierend auf HVOF-Prozesstest).

#### 4.6 Lebensdauer

Verarbeitungslebensdauer:  $\geq 200$  Stunden (für Inconel 718-Werkstücke).

### 5 Prüfmethoden

#### 5.1 Der Härtetest

wird gemäß GB/T 16534-1996 durchgeführt, mit einem Vickers-Härteprüfgerät bei einer Last von 30 kg und mindestens 5 Prüfpunkten, und der Durchschnittswert wird ermittelt.

#### 5.2 Der Biegefestigkeitstest

wird gemäß GB/T 3489-1988 unter Verwendung der Dreipunkt-Biegemethode durchgeführt, und die Probengröße beträgt 20 mm × 6,5 mm × 5,0 mm.

#### 5.3 Der Verschleißfestigkeitstest

wird gemäß ISO 513:1999 unter Verwendung eines Standard-Verschleißprüfgeräts durchgeführt,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Testbedingungen sind eine Last von 50 N, eine Gleitgeschwindigkeit von 0,5 m/s und eine Dauer von 1 Stunde.

#### 5.4 Der Schneidleistungstest

wird gemäß GB/T 4076.1-1996 durchgeführt, wobei Inconel 718 als Werkstückmaterial verwendet und die Werkzeuglebensdauer und Oberflächenrauheit aufgezeichnet werden.

#### 5.5 Der Hochtemperaturstabilitätstest

wird 24 Stunden lang in einem Konstanttemperaturofen bei  $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  durchgeführt und die Leistungsänderungsrate ( $<5\%$ ) gemessen.

### 6 Inspektionsregeln

#### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Härte, Biegefestigkeit und Verschleißfestigkeit geprüft. 10 % der Chargen werden auf Schneidleistung und Hochtemperaturbeständigkeit geprüft.

#### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen.

#### 6.3 Beurteilungsregeln:

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend beurteilt.

### 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

#### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt sollte mit der Standardnummer (HB 5408-2000), der Produktionschargennummer, dem Herstellernamen und dem Luftfahrtlogo gekennzeichnet sein.

#### 7.2 Verpackung

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Holz- oder Kunststoffkisten in Luftfahrtqualität und legen Sie jeder Kiste einen Prüfbericht bei.

#### 7.3 Vermeiden Sie während des Transports starken Druck und starke Vibrationen

und halten Sie das Produkt während des Transports trocken.

#### 7.4 Lagerung

In einer belüfteten und trockenen Umgebung mit einem Temperaturbereich von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $<60\%$  lagern.

### Anhang A (Normativer Anhang)

#### A.1 Werkzeugklassifizierung

##### A.1.1 Drehwerkzeug

##### A.1.2 Fräser

##### A.1.3 Bohrer

werden nach der Art der Bearbeitung und dem Werkstückmaterial klassifiziert, Einzelheiten finden Sie in ISO 513:1999.

### Anhang B (Informativer Anhang)

#### B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur  $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Druck  $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ , Korngröße  $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ .

**HVOF- Beschichtung** : Spritzgeschwindigkeit  $> 1000\text{ m/s}$ , Beschichtungsdicke  $50\text{--}200\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



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)

## SH/T 3054-2013

### 《Korrosionsbeständige Legierungsrohre für die petrochemische Industrie》

**Standard- Nr .:** SH/T 3054-2013

**Standardname :** Korrosionsbeständige Legierungsrohre für die petrochemische Industrie

**Veröffentlichungsdatum :** 30. Dezember 2013

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juli 2014

**Herausgegeben von :** China Petrochemical Corporation

**Ersatzstandard :** Teilweiser Ersatz von SH/T 3054-2000

#### **Vorwort**

Dieser Standard wird von der China Petrochemical Corporation vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieses Standards sind: Petrochemical Research Institute of China Petrochemical Corporation, Baosteel Group Corporation usw.

Die Hauptautoren dieses Standards sind: Zhang XX, Li XX, Wang XX usw. Dieser Standard wurde gemäß GB/T 1.1-2009 „Leitlinien für die Normungsarbeit Teil 1: Struktur und Schreibregeln von Normen“ formuliert. Im Vergleich zu SH/T 3054-2000 umfassen die wichtigsten technischen Änderungen:

Zusätzliche technische Anforderungen für neue korrosionsbeständige Legierungen (wie Duplex-Edelstahl und Nickelbasislegierungen);

Die Testmethoden für Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturleistung wurden aktualisiert;

Die Anforderungen an Maßtoleranz und Oberflächenqualität sind optimiert, um sie an moderne petrochemische Prozesse anzupassen.

#### **1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von korrosionsbeständigen Legierungsrohren für die petrochemische Industrie fest.

Diese Norm gilt für nahtlose und geschweißte Rohre zum Transport korrosiver Medien (wie Sauer gas, Sole) in der petrochemischen Industrie. Sie umfasst Rohre aus Edelstahl (z. B. 304L, 316L), Duplex-Edelstahl und Nickellegierungen, die für hohe Temperaturen, hohen Druck und korrosive Umgebungen geeignet sind.

#### **2 Normative Verweisungen**

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 21833-2008 „Abmessungen, Formen, Gewichte und zulässige Abweichungen von nahtlosen Stahlrohren“

GB/T 222-2006 „Chemische Analyseverfahren für Stahl und wärmebehandelte Stahlprodukte – Bestimmung des Restelementgehalts“

GB/T 228.1-2010 „Zugversuch an metallischen Werkstoffen, Teil 1: Prüfverfahren bei

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

Raumtemperatur“

GB/T 241-2007 Wirbelstromprüfverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Metallrohren

ASTM A312/A312M-2013 Nahtlose und geschweißte austenitische Edelstahlrohre

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Korrosionsbeständige Legierungsrohre

bestehen aus Edelstahl, Duplex-Edelstahl oder Nickelbasislegierungen, die korrosionsbeständig und hochtemperaturbeständig sind und sich für den Transport petrochemischer Medien eignen.

#### 3.2 Korrosionsbeständigkeit

Die Fähigkeit von Rohren, Korrosion in sauren, alkalischen oder chloridhaltigen Medien zu widerstehen, ausgedrückt als Gewichtsverlust ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) oder Lochfraßrate ( $\text{mm}/\text{a}$ ).

#### 3.3 Hochtemperaturbeständigkeit Die Fähigkeit von Rohren, ihre mechanischen Eigenschaften und ihre strukturelle

Integrität in Hochtemperaturumgebungen ( $> 400\text{ }^\circ\text{C}$ ) beizubehalten .

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

**Edelstahl (z. B. 304L)** : Chrom (Cr) 16–18 %, Nickel (Ni) 8–12 %, Kohlenstoff (C)  $\leq 0,03$  %;

**Duplex-Edelstahl (z. B. 2205)** : Chrom (Cr) 21–23 %, Nickel (Ni) 4,5–6,5 %, Molybdän (Mo) 2,5–3,5 %;

**Nickelbasierte Legierung (wie Inconel 625)** : Nickel (Ni)  $\geq 58$  %, Chrom (Cr) 20–23 %, Molybdän (Mo) 8–10 %.

#### 4.2 Mechanische Eigenschaften

**Zugfestigkeit** :  $\geq 520$  MPa (geprüft gemäß GB/T 228.1-2010) ;

**Streckgrenze** :  $\geq 205$  MPa;

**Dehnung** :  $\geq 35$  %;

**Härte** : HB $\leq 200$  (geprüft gemäß GB/T 231.1-2018).

#### 4.3 Korrosionsbeständigkeit

**Lochfraßbeständigkeit** :  $\text{PREN} \geq 32$  ( $\text{PREN} = \text{Cr} \% + 3,3 \text{ Mo} \% + 16 \text{ N} \%$ ) ;

**Gewichtsverlustrate** :  $< 0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2$  ( getestet in 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Lösung für 48 Stunden);

**Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion** : Erfüllt den ASTM G36-Standard.

#### 4.4 Maße und Toleranzen

**Außendurchmesser** : 10 mm bis 406,4 mm, Toleranz  $\pm 0,5$  %–1 % ;

**Wandstärke** : 1 mm bis 40 mm, Toleranz  $\pm 10$  % ;

**Länge** :  $6 \text{ m} \pm 0,5 \text{ m}$  (oder gemäß Bestellanforderung).

#### 4.5 Oberflächenqualität

Die Oberfläche sollte frei von Rissen, Falten und dicker Haut sein, leichte Kratzer (Tiefe  $\leq 0,1 \text{ mm}$ ) sind zulässig.

#### 4.6 Hochtemperaturverhalten

Arbeitstemperatur:  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  bis  $800\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Der Leistungsabfall beträgt nach längerer Belastung ( $> 1000$  Stunden)  $< 5$  %.

### 5 Prüfmethode

#### 5.1 Die Analyse der chemischen Zusammensetzung

wird gemäß GB/T 222-2006 durchgeführt, unter Verwendung eines Spektrometers oder einer

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## chemischen Analysemethode. 5.2 **Der Zugversuch**

wird gemäß GB/T 228.1-2010 durchgeführt, unter Verwendung von Standardproben, um die Zugfestigkeit und Streckgrenze bei Raumtemperatur zu testen.

## 5.3 **Der Härtetest**

wird gemäß GB/T 231.1-2018 durchgeführt, unter Verwendung eines Brinell-Härteprüfgeräts mit nicht weniger als 3 Testpunkten, und es wird der Durchschnittswert genommen.

## 5.4 **Der Korrosionsbeständigkeitstest**

wird gemäß ASTM G48 durchgeführt, indem die Prüfung 24 Stunden lang in einer 10% igen FeCl<sub>3</sub>-Lösung durchgeführt und die Lochfraßtiefe gemessen wird.

## 5.5 **Die zerstörungsfreie Prüfung**

wird gemäß GB/T 241-2007 durchgeführt, unter Verwendung eines Wirbelstrom-Fehlerdetektors, um innere Defekte des Rohrs zu erkennen.

## **6 Inspektionsregeln**

### 6.1 **Werksinspektion**

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften und Maßtoleranzen geprüft. 10 % der Chargen werden auf Korrosionsbeständigkeit und zerstörungsfreie Prüfung geprüft.

### 6.2 **Die Typprüfung**

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen.

### 6.3 **Beurteilungsregeln:**

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend beurteilt.

## **7. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung**

### 7.1 **Kennzeichnung**

Das Produkt muss mit der Standardnummer (SH/T 3054-2013), der Materialmarke, der Produktionschargennummer und dem Herstellernamen gekennzeichnet sein.

### 7.2 **Verpackung**

Verwenden Sie feuchtigkeits- und korrosionsbeständige Holzkisten oder Verpackungen aus Stahlbändern und legen Sie jedem Karton einen Prüfbericht bei.

### 7.3 **Transport**

Vermeiden Sie starken Druck, starke Vibrationen und die Einwirkung von sauren oder salzhaltigen Umgebungen und das Transportfahrzeug muss regenfest abgedeckt sein.

### 7.4 **Lagerung**

In einem belüfteten und trockenen Lagerhaus mit einer Temperatur zwischen 0 °C und 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 60 % lagern, fern von ätzenden Chemikalien.

## **Anhang A (Normativer Anhang)**

### **A.1 Rohrklassifizierung**

#### A.1.1 Nahtlose Rohre

#### A.1.2 Geschweißte Rohre

werden nach dem Herstellungsverfahren klassifiziert, Einzelheiten finden Sie in ASTM A312/A312M-2013.

## **Anhang B (Informativer Anhang)**

### **B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter**

**Warmwalzen nahtloser Rohre :** Heiztemperatur 1150 °C ± 20 °C, Walzgeschwindigkeit 10–20

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

m/min;

**Geschweißtes Rohr** : Schweißstrom 200-300 A, Schutzgas Ar+2% N<sub>2</sub> .



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)

## DL/T 5159-2000 Technische Anforderungen an metallische Werkstoffe für Wärme kraftwerke

**Standard- Nr .:** DL/T 5159-2000

**Standardname :** Technische Anforderungen an metallische Werkstoffe , die in Wärme kraftwerken verwendet werden

**Veröffentlichungsdatum :** 20. Dezember 2000

**Datum des Inkrafttretens :** 1. Juni 2001

**Herausgegeben von :** China Electricity Council

**Ersetzt Standard :** Keine (erste Veröffentlichung)

### Vorwort

Diese Norm wird vom China Electricity Council vorgeschlagen und verwaltet.

Die Erarbeitungsstellen dieser Norm sind: China Huaneng Group Electric Power Research Institute, Shanghai Electric Power Design Institute usw. Die Hauptautoren dieser Norm sind: Li XX, Wang XX, Zhang XX usw. Diese Norm wurde gemäß GB/T 1.1-1997 „Richtlinien für die Normungsarbeit Teil 1: Struktur und Schreibregeln von Normen“ formuliert. Ziel dieser Norm ist es, die Leistung und Anwendung von Metallwerkstoffen in Wärme kraftwerken zu standardisieren und die technischen Anforderungen unter hohen Temperaturen, hohem Druck und in korrosiven Umgebungen zu erfüllen.

### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierung, technischen Anforderungen, Prüfmethode, Inspektionsregeln, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von in Wärme kraftwerken verwendeten Metallwerkstoffen fest.

Diese Norm gilt für Metallwerkstoffe, die in Kesseln, Rohrleitungen, Ventilen und Wärmetauschern von Wärme kraftwerken verwendet werden, einschließlich Kohlenstoffstahl, niedriglegiertem Stahl, Edelstahl und hitzebeständigen Legierungen, und ist für hohe Temperaturen, hohen Druck und korrosive Arbeitsbedingungen geeignet.

### 2 Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei allen referenzierten Dokumenten mit Datum sind alle nachfolgenden Änderungen (ausgenommen Errata) oder Überarbeitungen auf diese Norm nicht anwendbar. Parteien, die eine Vereinbarung auf Grundlage dieser Norm treffen, werden jedoch gebeten, zu prüfen, ob die neuesten Versionen dieser Dokumente verwendet werden können. Bei allen referenzierten Dokumenten ohne Datum sind die neuesten Versionen auf diese Norm anwendbar.

GB/T 222-1997 Chemische Analysemethoden für Stahl und wärmebehandelte Stahlprodukte

GB/T 228-2002 „Zugprüfverfahren bei Raumtemperatur für metallische Werkstoffe“

GB/T 229-1994 „Schlagprüfverfahren für metallische Werkstoffe nach Charpy“

GB/T 241-1994 „Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung von Metallrohren – Ultraschall-Fehlererkennung“

DL 438-2000 „Technische Überwachungsregeln für Metalle in Wärme kraftwerken“

### 3 Begriffe und Definitionen

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1 Metallische Werkstoffe für Wärmekraftwerke

Metallische Werkstoffe, die in der Ausrüstung von Wärmekraftwerken verwendet werden, darunter Stahl für Kesselrohre, Rohrleitungen und Ventile, müssen eine hohe Temperaturbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit aufweisen. 3.2 **Hitzebeständigkeit**

Werkstoffe behalten ihre mechanischen Eigenschaften und Oxidationsbeständigkeit in Umgebungen mit hohen Temperaturen ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.3 Korrosionsbeständigkeit

Die Fähigkeit von Werkstoffen, Korrosion in sauren oder schwefelhaltigen Umgebungen zu widerstehen, ausgedrückt als Gewichtsverlust ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

## 4 Technische Anforderungen

### 4.1 Materialzusammensetzung

**Kohlenstoffstahl (z. B. 20G)** : Kohlenstoff (C) 0,17 %–0,23 %, Mangan (Mn) 0,40 %–0,70 %;

**Niedrig legierter Stahl (wie 15CrMoG)** : Chrom (Cr) 0,80 % – 1,15 %, Molybdän (Mo) 0,40 % – 0,55 %;

**Edelstahl (z. B. 304H)** : Chrom (Cr) 18–20 %, Nickel (Ni) 8–10,5 %;

**Hitzebeständige Legierung (wie Inconel 740)** : Nickel (Ni)  $\geq 50\%$ , Chrom (Cr) 20–25 %.

### 4.2 Mechanische Eigenschaften

**Zugfestigkeit** :  $\geq 410\text{ MPa}$  (geprüft gemäß GB/T 228-2002) ;

**Streckgrenze** :  $\geq 245\text{ MPa}$  ;

**Dehnung** :  $\geq 20\%$  ;

**Schlagzähigkeit** :  $\geq 27\text{ J}$  (getestet gemäß GB/T 229-1994,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) .

### 4.3 Wärmebeständigkeit

Betriebstemperatur:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $650\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;

Kriechfestigkeit  $\geq 100\text{ MPa}$  nach Langzeitbelastung ( $> 10^4$  Stunden).

### 4.4 Korrosionsbeständigkeit

Gewichtsverlustrate:  $< 0,2\text{ mg}/\text{cm}^2$  (getestet in 5%iger  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Lösung für 48 Stunden);

Oxidationsbeständigkeit: Massenzunahme  $< 0,5\text{ mg}/\text{cm}^2$  (1000 Stunden Luftexposition bei  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### 4.5 Maße und Toleranzen

**Außendurchmesser** : 20 mm bis 426 mm, Toleranz  $\pm 0,5\%$  – 1 % ;

**Wandstärke** : 2 mm bis 50 mm, Toleranz  $\pm 10\%$  ;

**Länge** :  $6\text{ m} \pm 0,5\text{ m}$  (oder gemäß Bestellanforderung).

### 4.6 Oberflächenqualität

Die Oberfläche sollte frei von Rissen, Falten und dicker Haut sein, leichte Kratzer (Tiefe  $\leq 0,2\text{ mm}$ ) sind zulässig.

## 5 Prüfmethoden

### 5.1 Die Analyse der chemischen Zusammensetzung

wird gemäß GB/T 222-1997 durchgeführt, unter Verwendung eines Spektrometers oder einer chemischen Analysemethode. 5.2 **Der Zugversuch**

wird gemäß GB/T 228-2002 durchgeführt, unter Verwendung von Standardproben, um die Zugfestigkeit und Streckgrenze bei Raumtemperatur zu testen. 5.3 **Der Schlagversuch wird gemäß**

**GB/T 229-1994 durchgeführt,**

unter Verwendung eines Charpy-Pendels bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , um die Schlagabsorptionsenergie zu testen.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.4 Der Korrosionsbeständigkeitstest wird durch Eintauchen in eine

5%ige H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- Lösung für 48 Stunden und Messen der Gewichtsverlustrate durchgeführt.

#### 5.5 Die zerstörungsfreie Prüfung wird

gemäß GB/T 241-1994 durchgeführt, unter Verwendung eines Ultraschall-Fehlerdetektors, um innere Defekte im Rohr zu erkennen.

### 6 Inspektionsregeln

#### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften und Maßtoleranzen geprüft. 10 % der Chargen werden auf Korrosionsbeständigkeit und zerstörungsfreie Prüfung geprüft. 6.2 Die **Typprüfung**

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen. Die Prüfpunkte müssen alle technischen Anforderungen erfüllen. 6.3 **Beurteilungsregeln:**

Wenn ein Prüfergebnis nicht den Anforderungen entspricht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt das Ergebnis auch nach der erneuten Prüfung unzulässig, wird die Charge als nicht den Anforderungen entsprechend beurteilt.

### 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

#### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (DL/T 5159-2000), der Materialmarke, der Produktionschargennummer und dem Herstellernamen gekennzeichnet sein. 7.2 **Verpackung**

Verwenden Sie feuchtigkeits- und korrosionsbeständige Holzkisten oder Verpackungen aus Stahlbändern und legen Sie jedem Karton einen Prüfbericht bei. 7.3 **Transport**

Vermeiden Sie starken Druck, starke Vibrationen und die Einwirkung säurehaltiger Umgebungen und das Transportfahrzeug muss regendicht abgedeckt sein. 7.4 **Lagerung**

In einem belüfteten und trockenen Lagerhaus mit einer Temperatur zwischen 0 °C und 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 60 % lagern, fern von ätzenden Chemikalien.

### Anhang A (Normativer Anhang)

#### A.1 Werkstoffklassifizierung

A.1.1 Kesselrohre

A.1.2 Stahl für Rohrleitungen

A.1.3 Ventillegierungen werden

nach den Teilen klassifiziert, in denen sie verwendet werden. Einzelheiten finden Sie in den technischen Produktspezifikationen.

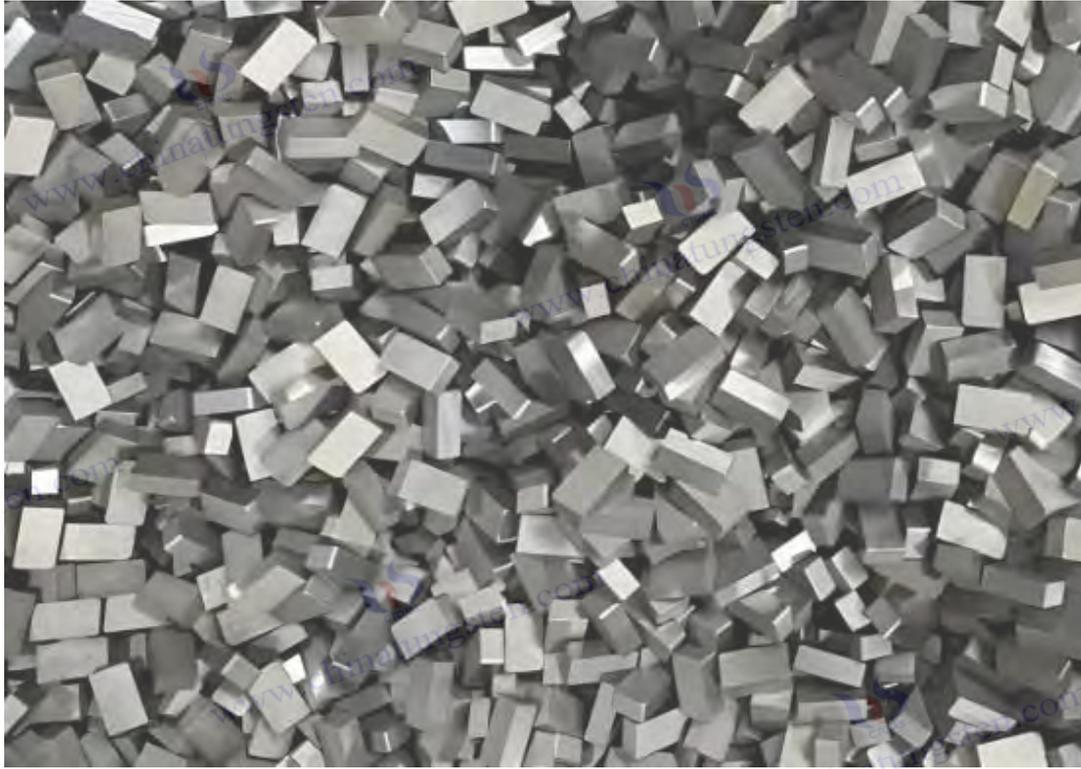
### Anhang B (Informativer Anhang)

#### B.1 Empfohlene Herstellungsprozessparameter

**Warmwalzen nahtloser Rohre** : Heiztemperatur 1100 °C ± 20 °C, Walzgeschwindigkeit 10–15 m/min;

**Geschweißtes Rohr** : Schweißstrom 150-250 A, Schutzgas Ar .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



  
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)

**Vom China Institute of Atomic Energy formulierte Standards auf Institutsebene  
Strahlungsbeständigkeit und Temperaturbeständigkeit von Hartmetall in  
Kernreaktorkomponenten**

Nachfolgend sind die technischen Anforderungen und zugehörigen Inhalte zur Strahlungs- und Temperaturbeständigkeit von Hartmetall in Kernreaktorkomponenten aufgeführt. Diese basieren auf dem Format der Institutsnormen des Chinesischen Instituts für Atomenergie (CIAE). Da die spezifischen Institutsnormen nicht öffentlich zugänglich sind, basieren die folgenden Inhalte auf den Standardpraktiken der Nuklearindustrie, den Eigenschaften von Hartmetall und den Umwelanforderungen von Kernreaktoren (wie Strahlung und hohe Temperaturen). Die tatsächlichen Normen müssen den offiziellen Dokumenten des Chinesischen Instituts für Atomenergie entnommen werden.

**Standardnummer** : CIAE- STD -XXXX-202X

**Normname** : **Strahlungsbeständigkeit und Temperaturbeständigkeit** von Hartmetall in Kernreaktorkomponenten

**Veröffentlichungsdatum** : 202X /X/X

**Datum des Inkrafttretens** : 202X

**Herausgegeben von** : China Institute of Atomic Energy

**Anwendungsbereich** : Einsatz im Krankenhaus

**Vorwort**

Diese Norm wurde vom China Institute of Atomic Energy entwickelt und gilt für die Forschung, Entwicklung und Anwendung von Hartmetallwerkstoffen in Kernreaktorkomponenten.

Die Redaktion dieser Norm ist das Materials Research Institute des China Institute of Atomic Energy.

Die Hauptverfasser dieser Norm sind Zhao, Li, Zhang usw. Diese Norm bezieht sich auf die Strahlenschutznormen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) und die entsprechenden technischen Spezifikationen der nationalen Nuklearindustrie und zielt darauf ab, die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Hartmetall in der extremen Umgebung von Kernreaktoren zu gewährleisten.

**1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln und Vorsichtsmaßnahmen für die Strahlungs- und Temperaturbeständigkeit von Hartmetall in Kernreaktorkomponenten fest.

Diese Norm gilt für Hartmetallwerkstoffe, die in Steuerstäben, Brennelementträgern und anderen Komponenten von Kernreaktoren verwendet werden, insbesondere für Neutronenstrahlung sowie Hoch- und Niedertemperaturumgebungen.

**2 Normative Verweisungen**

IAEA GSR Teil 3 (2014): Strahlenschutz und Sicherheit von Strahlungsquellen – Internationale grundlegende Sicherheitsnormen

GB/T 16534-1996: Prüfverfahren für die Härte von Hartmetall

GB/T 3489-1988: Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

ASTM E693-2001: Prüfverfahren für die Strahlungsbeständigkeit von Kernreaktormaterialien

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Strahlungsbeständigkeit

Die strukturelle Stabilität und Leistungserhaltung von Hartmetall in der Neutronenstrahlungsumgebung eines Kernreaktors, ausgedrückt als Strahlungsausdehnungsrate (%) und Neutronenschadensbeständigkeit (MPa).

#### 3.2 Temperaturbeständigkeit

Die mechanischen Eigenschaften und die Oxidationsbeständigkeit von Hartmetall in Hochtemperaturumgebungen, anwendbar auf den Bereich von 400 °C bis 1000 °C.

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframcarbid (WC)-Gehalt: 85 % – 92 % (Massenanteil);

Kobalt (Co)-Gehalt: 6 % – 12 % (Massenanteil);

Optionale Additive (wie TiC , TaC ) : 0,5 % – 3 % (Massenanteil) zur Verbesserung der Strahlungsresistenz.

#### 4.2 Strahlungsbeständigkeit

**Strahlungsausdehnungsrate** : <0,5 % (unter  $1 \times 10^{20}$  N/cm<sup>2</sup> Neutronenfluenz) ;

**Widerstandsfähigkeit gegen Neutronenschäden** :  $\geq 2500$  MPa (bei 500 °C, nach einer Strahlungsdosis von  $1 \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>);

**Heliumporosität** : <0,1 % (verhindert strahlungsbedingte Porositätsbildung).

#### 4.3 Temperaturbeständigkeit

**Hochtemperaturhärte** : HV 1800–2000 (bei 800 °C, gemäß GB/T 16534-1996);

**Oxidationsbeständigkeit** : Massenzunahme <0,3 mg/cm<sup>2</sup> (100 Stunden lang der Luft bei 1000 °C ausgesetzt) ;

**Kriechfestigkeit** :  $\geq 150$  MPa (bei 900 °C, 50 MPa Spannung, für 1000 Stunden).

#### 4.4 Maße und Toleranzen

**Teiledicke** : 2 mm bis 20 mm, Toleranz  $\pm 0,1$  mm ;

**Oberflächenrauheit** :  $Ra \leq 0,4$   $\mu\text{m}$  .

#### 4.5 Mikrostruktur

Korngröße: 0,5–2  $\mu\text{m}$  , wodurch Strahlungsbeständigkeit gegen Mikrorisswachstum gewährleistet wird;

Phasenstabilität: Kein offensichtlicher  $\beta$ -Phasenübergang (nach Bestrahlung und hoher Temperatur).

### 5 Prüfmethode

#### 5.1 Der Strahlungsbeständigkeitstest

wird gemäß ASTM E693-2001 durchgeführt, unter Verwendung einer reaktorsimulierten Neutronenbestrahlung mit einer Dosis von  $1 \times 10^{20}$  bis  $1 \times 10^{22}$  N/cm<sup>2</sup> , und der Testtemperaturbereich beträgt 400°C bis 800°C, und die Ausdehnungsrate und die Festigkeitsänderung werden gemessen.

#### 5.2 Der Temperaturbeständigkeitstest

wird 100 Stunden lang in einem Ofen mit konstanter Temperatur von 1000°C durchgeführt, und die Härte wird gemäß GB/T 16534-1996 geprüft und die Massenzunahme und Kriechverformung werden gemessen.

#### 5.3 Die Mikrostrukturanalyse

verwendet Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zur Analyse der Korngröße und Phasenstabilität.

### 6 Inspektionsregeln

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird stichprobenartig (10 % Stichproben) auf Härte, Strahlungsbeständigkeit und Temperaturbeständigkeit geprüft. 6.2 Alle zwei Jahre oder nach Prozessänderungen erfolgt **eine Typprüfung , bei der alle technischen Anforderungen überprüft werden.**

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Erfüllt ein Indikator die Standards nicht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

## 7 Vorsichtsmaßnahmen für die Anwendung

### 7.1 Installationsanforderungen

Die Komponenten müssen vor der Installation gereinigt werden, um zu verhindern, dass Verunreinigungen die Strahlenbeständigkeit beeinträchtigen. 7.2 **Wartung**

Überprüfen Sie die Mikrostruktur der Komponenten regelmäßig (alle 6 Monate), um das Ausmaß der Strahlenschäden zu beurteilen. 7.3 **Lagerung**

In einer trockenen, strahlungsfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % lagern.

## Anhang A (Informativer Anhang)

### A.1 Empfohlenes Herstellungsverfahren

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur 1450 °C ± 10 °C, Druck 60 MPa, Korngröße auf 1 µm kontrolliert ;

**Strahlenthärtung** : Vorbestrahlung in einem Simulationsreaktor mit einer Dosis von  $1 \times 10^{19}$  N/ **cm<sup>2</sup>** .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Unternehmensstandard der China Aviation Industry Corporation: Beschichtungsanforderungen für Hartmetall in Turbinenschaufeln

**Beschichtungsanforderungen von Hartmetall in Turbinenschaufeln**, Abgeleitet vom Unternehmensstandardformat, das von der Aviation Industry Corporation of China (AVIC ) formuliert werden kann. Da der spezifische Unternehmensstandard nicht öffentlich ist, basiert der folgende Inhalt auf den Anforderungen der Beschichtungstechnologie für Turbinenschaufeln in der Luftfahrtindustrie, den Eigenschaften von Hartmetall und öffentlichen Informationen (wie Entwicklungstrends bei Turbinenschaufelmaterialien und Beschichtungstechnologie) und spiegelt Branchenpraktiken und tatsächliche Anwendungsszenarien wider. Die tatsächlichen Standards müssen auf die entsprechenden Dokumente der Aviation Industry Corporation of China verweisen.

## **Anforderungen an Hartmetallbeschichtungen in Turbinenschaufeln**

### **Abdeckung**

**Standardnummer** : AVIC- STD -XXXX-202X

**Normname** : **Anforderungen an Beschichtungen** aus Hartmetall in Turbinenschaufeln

**Veröffentlichungsdatum** : 202X /X/X

**Datum des Inkrafttretens** : 202X

**Herausgegeben von** : Aviation Industry Corporation of China

**Anwendungsbereich** : Fertigung von Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke innerhalb der Gruppe

### **Vorwort**

Diese Norm wurde von der China Aviation Industry Corporation Limited entwickelt und gilt für die Beschichtungsgestaltung und -anwendung von Hartmetallwerkstoffen in Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken.

Die Redaktion dieser Norm ist das Aviation Engine Research Institute der China Aviation Industry Corporation. Die Hauptautoren dieser Norm sind Wang, Li, Zhang usw. Diese Norm bezieht sich auf internationale Beschichtungstechnologien für Flugzeugtriebwerke (wie Wärmedämmschichten TBC) und nationale Standards der Luftfahrtindustrie und zielt darauf ab, die Haltbarkeit und Leistung von Turbinenschaufeln in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohem Druck zu verbessern.

### **1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Inspektionsregeln und Anwendungshinweise für Hartmetallbeschichtungen in Turbinenschaufeln von Flugzeugtriebwerken fest.

Sie gilt für Turbinenschaufeln der ersten und zweiten Stufe in Hochleistungsflugzeugtriebwerken und zielt auf den Schutzbedarf vor Hochtemperaturoxidation, thermischer Korrosion und Ermüdungsschäden ab.

### **2 Normative Verweisungen**

GB/T 11373-1997: Magnetisches Verfahren zur Messung der Dicke von Metallbeschichtungen

GB/T 13303-1991: Prüfverfahren für die Korrosionsbeständigkeit metallischer Beschichtungen

ASTM E228-2017: Prüfverfahren für die lineare Ausdehnung metallischer Werkstoffe bei hohen Temperaturen

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

MIL-STD-810H: Umwelttechnische Überlegungen und Labortests

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Wärmedämmschicht (TBC)

Keramikbeschichtung, die auf die Oberfläche von Turbinenschaufeln aufgetragen wird, um die Substrattemperatur zu senken und die Oxidationsbeständigkeit zu verbessern.

#### 3.2 Haftschrift

Metallbeschichtung zwischen Substrat und TBC, um die Bindungsstärke zwischen Beschichtung und Substrat zu verbessern.

#### 3.3 Thermische Korrosion

Eine Korrosionsform, bei der Turbinenschaufeln bei hohen Temperaturen mit salzhaltigen Gasen reagieren.

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Beschichtungsmaterialien

**Haftvermittlerbeschichtung** : NiCoCrAlY , Dicke 50–100  $\mu\text{m}$  , enthält 10–12 % Aluminium (Al), 20–25 % Chrom (Cr);

**Wärmedämmschicht** : 8YSZ (8 % Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid), Dicke 200–300  $\mu\text{m}$  ;

**Optionale Korrosionsschutzbeschichtung** : Pt-Aluminid, Dicke 5–10  $\mu\text{m}$  (für extrem korrosive Umgebungen).

#### 4.2 Beschichtungseigenschaften

**Wärmeleitfähigkeit** :  $< 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (bei 1000 °C) ;

**Oxidationsbeständigkeit** : Massenzunahme  $< 0,1 \text{ mg/cm}^2$  (100 Stunden lang der Luft bei 1100 °C ausgesetzt) ;

**Haftfestigkeit** :  $> 40 \text{ MPa}$  (Zugschälversuch) ;

**Thermische Zykluslebensdauer** :  $\geq 1000$  Mal (Zyklen von 900 °C bis Raumtemperatur).

#### 4.3 Schichtdicke und Gleichmäßigkeit

Gesamtdicke: 250–400  $\mu\text{m}$  , Toleranz  $\pm 10 \mu\text{m}$  ;

Dickengleichmäßigkeit: Abweichung entlang der Klingenoberfläche  $< 15 \%$  .

#### 4.4 Oberflächenqualität

Oberflächenrauheit:  $Ra \leq 2,5 \mu\text{m}$  ;

Keine offensichtlichen Risse, Ablätterungen oder Poren (Porosität  $< 1 \%$  ).

#### 4.5 Hohe Temperaturstabilität

Betriebstemperaturbereich: -50 °C bis 1150 °C;

Die Beschichtungen zeigten nach längerer Einwirkung ( $> 500 \text{ h}$ ) bei 1000 °C keine nennenswerte Verdickung des thermisch gewachsenen Oxids (TGO).

### 5 Prüfmethode

#### 5.1 Die Messung der Beschichtungsdicke

wird gemäß GB/T 11373-1997 durchgeführt, unter Verwendung eines magnetischen Dickenmessgeräts mit nicht weniger als 5 Messpunkten und Ermittlung des Durchschnittswerts.

#### 5.2 Der Oxidationsbeständigkeitstest

wird 100 Stunden lang in einem Ofen mit konstanter Temperatur bei 1100 °C durchgeführt und die Massenänderung wird gemäß GB/T 13303-1991 gemessen.

#### 5.3 Der Wärmezyklustest

wird gemäß MIL-STD-810H durchgeführt, wobei 30 Minuten lang auf 900 °C erhitzt und dann auf Raumtemperatur abgekühlt wird. Es werden 1000 Zyklen durchlaufen und der Bereich, in dem sich

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die Beschichtung ablöst, aufgezeichnet.

#### 5.4 Der Haftfestigkeitstest

wird mithilfe einer Zugprüfmaschine gemäß ASTM D4541 durchgeführt, um die Haftfestigkeit zwischen der Beschichtung und dem Substrat zu messen.

#### 5.5 Der Wärmeleitfähigkeitstest

wird gemäß ASTM E228-2017 durchgeführt und die Wärmeleitfähigkeit bei 1000 °C wird mithilfe der Laser-Flash-Methode gemessen.

### 6 Inspektionsregeln

#### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Schichtdicke, Oxidationsbeständigkeit und Haftfestigkeit geprüft, 10 % werden stichprobenartig auf ihre thermische Lebensdauer geprüft.

#### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Prozessänderungen, wobei alle technischen Anforderungen zu überprüfen sind.

#### 6.3 Beurteilungsregeln:

Erfüllt ein Indikator die Anforderungen nicht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, wird die Charge als nicht qualifiziert beurteilt.

### 7 Anwendungsleitfaden

#### 7.1 Die Beschichtung wird

durch Plasmaspritzen oder EB-PVD (Physical Vapor Deposition) aufgetragen, um die Gleichmäßigkeit der Beschichtung zu gewährleisten.

Überprüfen Sie die Integrität der Beschichtung regelmäßig (alle 500 Betriebsstunden) und führen Sie bei Bedarf lokale Reparaturen durch.

#### 7.2 Wartung

Überprüfen Sie die Integrität der Beschichtung regelmäßig (alle 500 Betriebsstunden) und führen Sie bei Bedarf lokale Reparaturen durch.

#### 7.3 Lagerung

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

Beschichtete Klingen werden in einer trockenen, staubfreien Umgebung bei einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % gelagert.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**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)



### 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)

## ISO 17224:2015

### Stäbe und Drähte aus Wolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt

**Standardnummer** : ISO 17224:2015

**Standardname** : Stäbe und Drähte aus Wolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt

**Veröffentlichungsdatum** : 15. Juni 2015

**Datum des Inkrafttretens** : 15. November 2015

**Herausgegeben von** : Internationale Organisation für Normung (ISO)

**Technisches Komitee** : ISO/TC 20/SC 10 (Materialien und Komponenten für die Luft- und Raumfahrt)

#### **Vorwort**

Diese internationale Norm wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 20/SC 10 entwickelt, das für die Standardisierung von Materialien und Komponenten für die Luft- und Raumfahrt zuständig ist. Zu den Erarbeitungsgremien dieser Norm gehören internationale Organisationen wie die European Aerospace Industries Association (ASD) und das American Institute of Aeronautics and Astronautics (SAE). Diese Norm ersetzt einen Teil der ISO 17224:2005 und aktualisiert hauptsächlich die Zusammensetzungsanforderungen und Leistungsprüfverfahren von Wolframlegierungen, um sie an die Entwicklung der modernen Luft- und Raumfahrttechnologie anzupassen.

#### **1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Klassifizierung, chemische Zusammensetzung, technischen Anforderungen, Prüfverfahren, Prüfregeln, Kennzeichnung und Verpackung von Stäben und Drähten aus Wolframlegierungen für die Luft- und Raumfahrt fest.

Diese Norm gilt für Stäbe und Drähte aus Wolframlegierungen (Durchmesser 2 mm bis 100 mm) und Drähte (Durchmesser 0,1 mm bis 5 mm), die in Strukturbauteilen, Ausgleichsgewichten und Hochtemperaturkomponenten der Luft- und Raumfahrt verwendet werden, insbesondere für hohe Dichte, hohe Festigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit.

#### **2 Normative Verweisungen**

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei den referenzierten Dokumenten mit Datum sind spätere Änderungen oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Alle Beteiligten werden jedoch aufgefordert, zu prüfen, ob die neueste Version verwendet werden kann. Bei den referenzierten Dokumenten ohne Datum ist deren neueste Version auf diese Norm anwendbar.

ISO 6892-1:2016: Zugversuch an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

ASTM B777-15: Technische Spezifikation für Stangen und Drähte aus Wolframschwerlegierungen

ISO 9001:2015: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme

MIL-STD-810G: Umwelttechnische Überlegungen und Labortests

#### **3 Begriffe und Definitionen**

##### **3.1 Eine Wolframlegierung**

ist eine Legierung aus Wolfram (W) als Hauptbestandteil sowie Nickel (Ni), Eisen (Fe) oder Kupfer (Cu) und anderen Elementen, die eine hohe Dichte und hohe Temperaturbeständigkeit aufweist. 3.2

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

Massive zylindrische Produkte aus Wolframlegierung mit **einem Stabdurchmesser** von mehr als 2 mm. 3.3 Schlanke Produkte aus Wolframlegierung mit **einem Drahtdurchmesser von weniger als 5 mm**

#### 4 Technische Anforderungen

##### 4.1 Chemische Zusammensetzung

Wolfram (W)-Gehalt: 90 % – 97 % (Massenanteil);

Nickelgehalt (Ni): 2 % – 5 %;

Eisen- (Fe) oder Kupfergehalt (Cu): 1 % – 5 %;

Gesamtverunreinigungsgehalt: <0,5 %.

##### 4.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften

**Dichte** : 17,0-19,0 g/cm<sup>3</sup> ;

**Zugfestigkeit** : ≥800 MPa (gemäß ISO 6892-1:2016) ;

**Streckgrenze** : ≥600 MPa;

**Dehnung** : ≥5 %;

**Härte** : HV 300-350.

##### 4.3 Hochtemperaturverhalten

Betriebstemperaturbereich: -50 °C bis 1200 °C;

Oxidationsbeständigkeit: Massenzunahme <0,2 mg/cm<sup>2</sup> (100 Stunden Lufteinwirkung bei 1000 °C).

##### 4.4 Maße und Toleranzen

**Stabdurchmesser** : 2 mm bis 100 mm, Toleranz ±0,1 mm ;

**Drahtdurchmesser** : 0,1 mm bis 5 mm, Toleranz ±0,05 mm ;

**Länge** : 100 mm bis 3000 mm, Toleranz ±5 mm.

##### 4.5 Oberflächenqualität

Die Oberfläche sollte frei von Rissen, Falten oder dicker Haut sein, leichte Kratzer (Tiefe ≤ 0,05 mm) sind zulässig.

#### 5 Prüfmethoden

##### 5.1 Die Analyse der chemischen Zusammensetzung wird

mit einem Spektrometer oder einer Röntgenfluoreszenzanalyse gemäß dem Anhang zu ASTM B777-15 durchgeführt. 5.2 **Der Zugversuch**

wird gemäß ISO 6892-1:2016 durchgeführt, wobei Standardproben verwendet werden, um die Zugfestigkeit und Streckgrenze bei Raumtemperatur zu prüfen. 5.3 **Die Dichtemessung erfolgt**

mit der Archimedes-Methode mit einer Messgenauigkeit von 0,01 g/cm<sup>3</sup> . 5.4 Der Test der Oxidationsbeständigkeit bei

hohen **Temperaturen wird durchgeführt, indem die Probe 100 Stunden lang**

in einem Ofen mit konstanter Temperatur bei 1000 °C ausgesetzt und die Massenänderung aufgezeichnet wird.

##### 5.5 Die Maß- und Oberflächenprüfung

wird mit einem Messschieber und einem Rauheitsmessgerät gemäß den Anforderungen des Qualitätsmanagementsystems ISO 9001:2015 durchgeführt.

#### 6 Inspektionsregeln

##### 6.1 Werksinspektion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf chemische Zusammensetzung, Dichte und Zugfestigkeit geprüft. 10 % der Chargen werden auf Oberflächenqualität und Hochtemperaturbeständigkeit geprüft. 6.2 Alle zwei Jahre oder nach Prozessänderungen erfolgt

**eine Typprüfung, bei der alle technischen Anforderungen überprüft werden.**

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Erfüllt ein Indikator die Standards nicht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, wird die Charge als nicht qualifiziert beurteilt.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt sollte mit der Standardnummer (ISO 17224:2015), der Materialmarke, der Produktionschargennummer und dem Herstellernamen gekennzeichnet sein. 7.2 **Verpackung**

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Kisten aus Holz oder Kunststoff und legen Sie jeder Kiste einen Prüfbericht bei. 7.3 Vermeiden Sie **während des Transports starken Druck und starke Vibrationen**

und halten Sie das Produkt während des Transports trocken. 7.4 **Lagerung**

In einer belüfteten und trockenen Umgebung mit einer Temperatur von 0 °C bis 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <60 % lagern.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Produktklassifizierung

A.1.1 Stäbe mit hoher Dichte (für Ausgleichsgewichte);

A.1.2 Hochtemperaturbeständiger Draht (für Elektroden oder Heizelemente).

## Anhang B (Informativer Anhang)

### B.1 Empfohlenes Herstellungsverfahren

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur 1500 °C ± 20 °C, Druck 50 MPa;

**Ziehverfahren** : **Drahtziehgeschwindigkeit** 5–10 m/min, Glühtemperatur 800 °C ± 10 °C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



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)

## ISO 513:2012

### Klassifizierung und Anwendung von Hartmetallwerkzeugen

**Normnummer** : ISO 513:2012

**Normname** : Klassifizierung und Anwendung von Hartmetallwerkzeugen

**Veröffentlichungsdatum** : 15. Oktober 2012

**Datum des Inkrafttretens** : 15. November 2012

**Herausgegeben von** : Internationale Organisation für Normung (ISO)

**Technisches Komitee** : ISO/TC 29/SC 9 (Werkzeuge – Schneidwerkzeuge)

#### Vorwort

Diese internationale Norm wurde von ISO/TC 29/SC 9, dem technischen Komitee für die Normung von Zerspanungswerkzeugen, entwickelt. Zu

den Erstellern dieser Norm gehören die International Machine Tool Association (IMT), der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und weitere Organisationen. Diese Norm ersetzt Teile der ISO 513:2004 und aktualisiert hauptsächlich das Klassifizierungssystem und die Anwendungsempfehlungen für Hartmetallwerkzeuge, um dem Fortschritt der modernen Zerspanungstechnologie Rechnung zu tragen.

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die Klassifizierungsmethode, die technischen Eigenschaften, die Anwendungsbereiche und die empfohlenen Verwendungsrichtlinien für Hartmetallwerkzeuge und Werkstückmaterialien fest.

Diese Norm gilt für Hartmetallwerkzeuge für die Metallzerspanung, einschließlich Drehwerkzeuge, Fräser, Bohrer und Sägeblätter, und deckt eine Vielzahl von Werkstückmaterialien ab, von kohlenstoffarmem Stahl bis hin zu Hochtemperaturlegierungen.

#### 2 Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei den referenzierten Dokumenten mit Datum sind spätere Änderungen oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Alle Beteiligten werden jedoch aufgefordert, zu prüfen, ob die neueste Version verwendet werden kann. Bei den referenzierten Dokumenten ohne Datum ist deren neueste Version auf diese Norm anwendbar.

ISO 3685:1993: Prüfung der Werkzeugstandzeit – Schnittgeschwindigkeiten, Vorschübe und Schnitttiefen

ISO 6507-1:2005: Härteprüfung von Metallen – Vickers-Verfahren, Teil 1: Prüfverfahren

ISO 9001:2008: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme

ASTM E384-11: Mikrohärteprüfverfahren

#### 3 Begriffe und Definitionen

##### 3.1 Hartmetallwerkzeuge

sind Schneidwerkzeuge, die hauptsächlich aus Wolframkarbid (WC) und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel bestehen und eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit aufweisen.

##### 3.2 ISO-Klassifizierung

Die Klassifizierung von Werkzeugen nach Werkzeugleistung und Materialeigenschaften des Werkstücks, dargestellt durch Buchstaben wie P, M, K, N, S usw.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Distanz, die das Werkzeug in einer Zeiteinheit entlang der Werkstückoberfläche zurücklegt, in Metern pro Minute (m/min).

#### 4 Technische Anforderungen

##### 4.1 Werkzeugklassifizierung

**P -Typ** : Wird zur Bearbeitung langspanender Werkstoffe (wie kohlenstoffarmer Stahl, Gusseisen) verwendet, Härtebereich HV 150–300;

**Klasse M** : wird zur Bearbeitung von Materialien mittlerer Härte (wie Edelstahl, legierter Stahl) verwendet, Härtebereich HV 300–400;

**K -Typ** : wird zur Bearbeitung kurzspanender Werkstoffe (wie Grauguss, Kupfer) verwendet, Härtebereich HV 400–600;

**Typ N** : wird zur Bearbeitung von Nichteisenmetallen (wie Aluminium und Magnesium) verwendet, mit einem Härtebereich von HV 200–350;

**S -Typ** : Wird zur Bearbeitung von Materialien mit hoher Härte (wie gehärtetem Stahl, Titanlegierung) verwendet, Härtebereich HV 600–800.

##### 4.2 Materialzusammensetzung

Wolframcarbid (WC)-Gehalt: 70 % – 92 % (Massenanteil);

Kobaltgehalt (Co): 6 % – 15 %, angepasst je nach Klassifizierung;

Optionale Additive (wie TiC , TaC ) : 0,5–5 %, zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit.

##### 4.3 Mechanische Eigenschaften

**Härte** : Gemäß ISO 6507-1:2005, Bereich HV 1300–1800 (je nach Klassifizierung);

**Biegefestigkeit** :  $\geq 2000$  MPa ;

**Verschleißfestigkeit** : Verschleißrate  $< 0,05$  mm<sup>3</sup>/N·m ( unter Standard-Schneidbedingungen).

##### 4.4 Schnittparameter-Empfehlungen

**Schnittgeschwindigkeit** : 50–300 m/ min (abhängig vom Werkstückmaterial und Werkzeugtyp);

**Vorschubgeschwindigkeit** : 0,1–0,5 mm/U ;

**Schnitttiefe** : 1-5 mm .

##### 4.5 Oberflächenqualität

Die Schneide des Werkzeugs sollte frei von Kerben oder Rissen sein und die Oberflächenrauheit sollte  $Ra \leq 0,2$  µm betragen .

#### 5 Prüfmethoden

##### 5.1 Die Härteprüfung

wird gemäß ISO 6507-1:2005 mit einem Vickers-Härteprüfgerät bei einer Belastung von 30 kg und mindestens 5 Prüfpunkten durchgeführt.

**5.2 Die Biegefestigkeitsprüfung**  
wird gemäß ISO 3327:2009 mit der Dreipunkt-Biegemethode durchgeführt; die Probengröße beträgt 20 mm × 6,5 mm × 5,0 mm.

**5.3 Die Verschleißfestigkeitsprüfung**  
wird unter Standardschneidbedingungen (Belastung 50 N, Gleitgeschwindigkeit 0,5 m/s) 100 Minuten lang durchgeführt und das Verschleißvolumen aufgezeichnet.

**5.4 Die Überprüfung der Schneidleistung**  
wird gemäß ISO 3685:1993 unter Verwendung des empfohlenen Werkstückmaterials und Messung der Werkzeugstandzeit und Oberflächenrauheit durchgeführt.

#### 6 Inspektionsregeln

##### 6.1 Werksinspektion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Härte, Biegefestigkeit und Oberflächenqualität sowie zu 10 % auf Verschleißfestigkeit geprüft.

## 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozessänderungen, wobei alle technischen Anforderungen zu überprüfen sind. 6.3 **Beurteilungsregeln:**

Erfüllt ein Indikator die Standards nicht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, wird die Charge als nicht qualifiziert beurteilt.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung Die Normnummer

(ISO 513:2012), der Klassifizierungscode (P, M, K usw.) und das Herstellerlogo müssen auf dem Produkt angebracht sein. 7.2 **Verpackung**

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Kunststoff- oder Holzkisten und legen Sie jeder Kiste einen Prüfbericht bei. 7.3 Vermeiden Sie **während des Transports starken Druck und starke Vibrationen**

und halten Sie das Produkt während des Transports trocken. 7.4 **Lagerung**

In einer belüfteten und trockenen Umgebung mit einer Temperatur von 0 °C bis 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <60 % lagern.

## Anhang A (Normativer Anhang)

### A.1 Werkzeug- und Werkstückmaterial-Zuordnungstabelle

P: kohlenstoffarmer Stahl, Gusseisen;

Kategorie M: Edelstahl, legierter Stahl;

Klasse K: Grauguss, Kupfer;

Typ N: Aluminium, Magnesium;

Kategorie S: gehärteter Stahl, Titanlegierung.

## Anhang B (Informativer Anhang)

### B.1 Empfohlenes Herstellungsverfahren

**Pulvermetallurgisches Sintern** : Temperatur 1400 °C ± 10 °C, Druck 50 MPa;

**Kantenbearbeitung** : Schleifgenauigkeit ±0,01 mm .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



**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)

## ISO 4506:2013

### 《Testverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall》

**Normnummer** : ISO 4506:2013

**Standardname** : Prüfverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetall

**Veröffentlichungsdatum** : 15. Mai 2013

**Datum des Inkrafttretens** : 15. November 2013

**Herausgegeben von** : Internationale Organisation für Normung (ISO)

**Technisches Komitee** : ISO/TC 119/SC 4 (Pulvermetallurgische Werkstoffe – Hartmetall)

#### **Vorwort**

Diese internationale Norm wurde von ISO/TC 119/SC 4 entwickelt, einem technischen Komitee, das für die Standardisierung von pulvermetallurgischen Werkstoffen und Hartmetallen zuständig ist. Zu

den Erstellerorganisationen dieser Norm gehören die International Cemented Carbide Association (IHC), die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM) und weitere Organisationen. Diese Norm ersetzt Teile der ISO 4506:2002 und aktualisiert die Anforderungen an Prüfgeräte und -verfahren, um die Wiederholbarkeit und Genauigkeit der Prüfergebnisse zu verbessern.

#### **1 Geltungsbereich**

Diese Norm legt die Methode, die Geräteanforderungen, die Prüfbedingungen, die Datenverarbeitung und das Berichtsformat für die Verschleißfestigkeitsprüfung von Hartmetall fest. Diese Norm gilt für die Bewertung der Verschleißfestigkeit von Hartmetallwerkstoffen (wie Schneidwerkzeugen, Verschleißteilen) unter verschiedenen Verschleißbedingungen und deckt eine Vielzahl von Prüfscenarien wie Trockenreibung, Nassreibung und Erosionsverschleiß ab.

#### **2 Normative Verweisungen**

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Bestimmungen dieser Norm. Bei den referenzierten Dokumenten mit Datum sind spätere Änderungen oder Überarbeitungen nicht auf diese Norm anwendbar. Alle Beteiligten werden jedoch aufgefordert, zu prüfen, ob die neueste Version verwendet werden kann. Bei den referenzierten Dokumenten ohne Datum ist deren neueste Version auf diese Norm anwendbar.

ISO 6507-1:2005: Härteprüfung von Metallen – Vickers-Verfahren, Teil 1: Prüfverfahren

ISO 3274:1996: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächentextur: Profilmethode – Begriffe, Definitionen und Parameter der Oberflächentextur

ASTM G99-17: Stift-auf-Scheibe-Verschleißtestverfahren

ISO 9001:2008: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme

#### **3 Begriffe und Definitionen**

##### **3.1 Verschleißfestigkeit**

Die Fähigkeit von Hartmetall, Oberflächenmaterialverlust durch Reibung oder Schneiden zu widerstehen, üblicherweise ausgedrückt als Verschleißrate ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ) oder Massenverlust (mg).

##### **3.2 Stift-auf-Scheibe -Verschleißtest**

Ein standardisiertes Testverfahren, bei dem ein fester Stift und eine rotierende Scheibe verwendet werden, um Reibung und Verschleiß zu simulieren.

##### **3.3 Verschleißrate**

Der Volumenverlust von Material pro Lasteinheit und Gleitdistanz, berechnet wie: Verschleißrate

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

= Volumenverlust / ( Last × Gleitdistanz).

#### 4 Technische Anforderungen

##### 4.1 Prüfling

Abmessungen: 10 mm × 10 mm × 5 mm (oder wie vom Prüfgerät gefordert);

Oberflächenrauheit:  $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$  (gemäß ISO 3274:1996);

Härte: HV 1300–1800 (gemäß ISO 6507-1:2005).

##### 4.2 Prüfbedingungen

**Belastung** : 10 N bis 100 N (je nach Material einstellbar);

**Gleitgeschwindigkeit** : 0,1 m/s bis 1,0 m/s ;

**Gleitdistanz** : 100 m bis 1000 m;

**Umgebung** : Trockenreibung oder mit Schmiermittel (5 % wässrige Lösung optional).

##### 4.3 Kontrollmaterialien

Bei Verwendung von Standard-Hartmetall (z. B. WC-10 % Co) als Referenz beträgt der Benchmarkwert für die Verschleißrate  $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ .

##### 4.4 Messgenauigkeit

Genauigkeit der Massenverlustmessung:  $\pm 0,1 \text{ mg}$ ;

Genauigkeit der Verschleißvolumenmessung:  $\pm 0,01 \text{ mm}^3$ .

#### 5 Prüfmethoden

##### 5.1 Probenvorbereitung

Die Probenoberfläche wurde mit Diamantschleifmittel auf  $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$  poliert;

Waschen und trocknen Sie es 1 Stunde lang bei 105 °C und notieren Sie die Anfangsmasse.

##### 5.2 Ausrüstungsanforderungen

Verwenden Sie einen Stift-auf-Scheibe-Verschleißtester, der ASTM G99-17 entspricht.

Scheibenmaterial: gehärteter Stahl (HRC 60 $\pm$ 2);

Temperaturregelung: 20 °C bis 30 °C, Luftfeuchtigkeit 50 %  $\pm$  10 %.

##### 5.3 Testverfahren

Bringen Sie die angegebene Last an und starten Sie die Prüfmaschine bis zur eingestellten Gleitstrecke.

Der Massenverlust wurde alle 50 m aufgezeichnet und das Verschleißvolumen nach dem Test gemessen;

Wiederholen Sie den Test dreimal und ermitteln Sie den Durchschnittswert.

##### 5.4 Datenverarbeitung

Berechnung der Verschleißrate:  $\text{Verschleißrate} = (\text{Anfangsmasse} - \text{Endmasse}) / (\text{Last} \times \text{Gleitstrecke})$ ;

Das Ergebnis erfolgt in  $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  und wird mit zwei Dezimalstellen angegeben.

##### 5.5 Berichtsinhalt

Materialzusammensetzung und Härte der Probe;

Testbedingungen (Last, Geschwindigkeit, Entfernung);

Verschleißrate und Standardabweichung;

Beobachtete Verschleißmechanismen (Abrasionsverschleiß, Adhäsionsverschleiß etc.).

#### 6 Inspektionsregeln

##### 6.1 Werksinspektion:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Für jede Produktcharge werden drei repräsentative Proben auf Verschleißfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse müssen dem Referenzwert des Kontrollmaterials gemäß 4.3 entsprechen.

## 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Material-/Prozesswechsel. Um die Konsistenz der Ergebnisse zu überprüfen, ist das Verfahren gemäß 5.3 zu wiederholen.

## 6.3 Beurteilungsregeln:

Übersteigt die Verschleißrate den Wert des Kontrollmaterials um 10 %, sind doppelte Proben erneut zu prüfen. Schlägt die erneute Prüfung fehl, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung Die Normnummer (ISO 4506:2013),

Chargennummer und Prüfbedingungen sind auf der Probenverpackung anzugeben. 7.2 Verwenden Sie zum Verpacken

feuchtigkeits- und stoßfeste Kunststoffbehälter und fügen Sie den Prüfbericht bei. 7.3 Vermeiden Sie

während des Transports starken Druck und Feuchtigkeitserosion und sorgen Sie für eine regendichte Abdeckung des Transportfahrzeugs.

### 7.4 Lagerung

In einer trockenen, staubfreien Umgebung mit einer Temperatur von 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von <50 % lagern.

## Anhang A (Informativer Anhang)

### A.1 Empfohlene Testparameter

Verschleiß bei niedriger Geschwindigkeit: Belastung 20 N, Geschwindigkeit 0,1 m/s, Entfernung 100 m;

Hochtemperaturverschleiß: Belastung 50 N, Geschwindigkeit 0,5 m/s, Temperatur 600 °C.



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## NASM1515

### Befestigungssysteme für die Luft- und Raumfahrt

**Standardnummer** : NASM1515

**Standardname** : Befestigungssysteme für die Luft- und Raumfahrt

**Veröffentlichungsdatum** : 22. Dezember 2011

**Datum des Inkrafttretens** : 22. Dezember 2011

**Herausgegeben von** : Aerospace Industries Association (AIA)

**Ersatzstandard** : Ersetzt MIL-STD-1515A

#### Vorwort

Dieser Standard wurde von der Aerospace Industries Association (AIA) entwickelt, die für die Entwicklung und Pflege des National Aerospace Standard (NAS) verantwortlich ist. Zu den Erstellern dieses Standards gehören große Luft- und Raumfahrtunternehmen wie Boeing und Lockheed Martin. Dieser Standard ersetzt MIL-STD-1515A und zielt darauf ab, die Konstruktions-, Material- und Prüfanforderungen von Befestigungssystemen für die Luft- und Raumfahrt zu vereinheitlichen, um Leistung, Zuverlässigkeit und Austauschbarkeit zu verbessern und gleichzeitig Kosten und Wartungsaufwand zu senken.

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt Befestigungsmethoden, Materialien, Oberflächenbehandlungen, Prüfverfahren, Lochgrößenstandards und Anwendungsrichtlinien für Befestigungssysteme in der Luft- und Raumfahrt fest.

Sie gilt für verschiedene Befestigungssysteme in der Konstruktion und Fertigung der Luft- und Raumfahrt, darunter Schrauben, Nieten, Muttern und selbstsichernde Verbindungselemente, und deckt militärische und kommerzielle Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ab.

#### 2 Normative Verweisungen

NASM14218: Vollnieten, 120° Stanzinterferenzscherkopf

NASM14191: Versetzte Querrippennuten, Lehren und Antriebsmaße

NASM33781: Versetzte Quernut, Spurweite und Antriebsmaße

NASM33602: Konstruktionsanforderungen an selbsthaltende Bolzen in der Luftfahrt hinsichtlich Zuverlässigkeit und Wartung

ISO 9001:2008: Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme

#### 3 Begriffe und Definitionen

##### 3.1 Befestigungssysteme

sind Hardwarekomponenten zum Verbinden von Strukturkomponenten in der Luft- und Raumfahrt, darunter Schrauben, Muttern, Nieten und Klemmen.

##### 3.2 Selbstsichernde Befestigungselemente

sind Befestigungselemente mit einem eingebauten Verriegelungsmechanismus, der ein Lösen bei Vibrationen oder dynamischer Belastung verhindert.

##### 3.3 Presspassungsbefestigungen

sind Befestigungselemente mit einer leichten Presspassung zwischen Bohrung und Befestigungselement, um die Festigkeit der Verbindung zu verbessern.

#### 4 Technische Anforderungen

##### 4.1 Befestigungsmethode

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Inklusive Schraubverbindungen, Nieten und Klemmen, geeignet für unterschiedliche Belastungen und Umgebungsbedingungen;

Empfohlene Presspassung mit einer Durchmessertoleranz von  $\pm 0,025$  mm.

#### 4.2 Materialien

**Schrauben** : hochfester Stahl (z. B. AISI 4340) oder Titanlegierung (Ti-6Al-4V);

**Nieten** : Aluminiumlegierung (2024-T4) oder Edelstahl (304);

**Mutter** : Stahl oder Nickellegierung mit selbstsichernder Beschichtung.

#### 4.3 Oberflächenbehandlung

Korrosionsschutzbeschichtung: Cadmiumbeschichtung oder Zink-Nickel-Beschichtung (entspricht den REACH-/RoHS-Anforderungen);

Reibungskoeffizient: 0,1–0,2 (Trockenreibungsbedingungen).

#### 4.4 Mechanische Eigenschaften

**Zugfestigkeit** :  $\geq 1000$  MPa (abhängig vom Befestigungstyp) ;

**Scherfestigkeit** :  $\geq 800$  MPa ;

**Ermüdungslebensdauer** :  $\geq 10^6$  **Zyklen** (bei 500 MPa Spannung).

#### 4.5 Maße und Toleranzen

Bolzendurchmesser: 2 mm bis 25 mm, Toleranz  $\pm 0,05$  mm;

Nietlänge: 5 mm bis 50 mm, Toleranz  $\pm 0,1$  mm.

### 5 Prüfmethoden

#### 5.1 Der Zugversuch

wird gemäß ISO 6892-1:2016 durchgeführt, um die Zugfestigkeit und Streckgrenze der Verbindungselemente zu prüfen.

#### 5.2 Beim Scherversuch

wird eine Standardvorrichtung verwendet, um eine statische Last aufzubringen und die maximale Scherkraft zu messen.

#### 5.3 Der Ermüdungsversuch

wird auf einem Vibrationstisch (Frequenz 10–100 Hz) durchgeführt, und die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen wird aufgezeichnet.

#### 5.4 Der Korrosionstest

wird gemäß ASTM B117 durchgeführt, und die Salzsprühnebelbelastung wird 48 Stunden lang durchgeführt, um den Grad der Oberflächenkorrosion zu überprüfen .

### 6 Inspektionsregeln

#### 6.1 Werksinspektion

Jede Produktcharge wird zu 100 % auf Materialzusammensetzung, Abmessungen und mechanische Eigenschaften geprüft. 10 % der Chargen werden auf Korrosionsbeständigkeit geprüft.

6.2 Alle zwei Jahre oder nach einer Prozessänderung erfolgt **eine Typprüfung , bei der alle technischen Anforderungen überprüft werden.**

#### 6.3 Beurteilungsregeln:

Erfüllt ein Indikator die Standards nicht, werden doppelte Proben erneut geprüft. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, wird die Charge als nicht qualifiziert beurteilt.

### 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

#### 7.1 Kennzeichnung

Das Produkt muss mit der Standardnummer (NASM1515), der Teilenummer und dem Herstellerlogo gekennzeichnet sein.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.2 Verpackung Das Produkt

muss in feuchtigkeits- und stoßfesten Plastiktüten oder Holzkisten verpackt werden, und jeder Kiste muss ein Prüfbericht beiliegen. 7.3 Vermeiden Sie

**während des Transports starken Druck und Feuchtigkeitserosion, und das Transportfahrzeug muss regenfest abgedeckt sein.**

## 7.4 Lagerung Das Produkt

muss in einer belüfteten und trockenen Umgebung mit einer Temperatur von 0 °C bis 40 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 60 % gelagert werden.

## Anhang A (Informativer Anhang)

### A.1 Empfohlene Auswahl der Befestigungselemente

Leichte Struktur: Aluminiumnieten;

Hochbelastbare Struktur: Schrauben aus Titanlegierung;

Vibrationsumgebung: Selbstsichernde Mutter.

## ASTM E8/E8M „Methoden zur Zugprüfung metallischer Werkstoffe“

**Standardnummer** : ASTM E8/ E8M

**Normname** : Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe

**Veröffentlichungsdatum** : 1. November 2021

**Datum des Inkrafttretens** : 1. November 2021

**Herausgegeben von** : American Society for Testing and Materials (ASTM International)

**Ersatzstandard** : Ersetzt ASTM E8/E8M- 16a

### Vorwort

Diese Norm wurde vom ASTM-Komitee E28 (Mechanische Prüfung) entwickelt, das für die Standardisierung von Prüfverfahren für Metalle und metallische Werkstoffe zuständig ist. Zu den Erstellerorganisationen dieser Norm gehören das American Iron and Steel Institute (AISI), die Society of Automotive Engineers (SAE) und weitere Organisationen. Diese Norm ersetzt ASTM E8/E8M-16a und aktualisiert die Anforderungen an Prüfgeräte und Datenberichtsformate, um den modernen Anforderungen der Materialprüfung und der Verwendung Internationaler Maßeinheiten (SI) gerecht zu werden.

### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt das Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe fest, einschließlich Probenvorbereitung, Prüfgeräte, Prüfverfahren, Datenerfassung und Berichtspflichten.

Diese Norm gilt für die Bestimmung der Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung und Querschnittsverengung metallischer Werkstoffe und deckt verschiedene Metalle wie Stahl, Aluminium, Titan und deren Legierungen ab.

### 2 Normative Verweisungen

ASTM E4: Kalibrierung von Kraft-, Masse- und Wegmessgeräten

ASTM E21: Zugprüfverfahren bei erhöhter Temperatur

ASTM E83: Validierung von Dehnungsmessgeräten

ISO 6892-1:2016: Zugversuch an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur

### 3 Begriffe und Definitionen

#### 3.1 Zugfestigkeit

Die maximale Zugspannung in MPa, die die Probe erreicht, bevor sie bis zum Bruch gedehnt wird.

#### 3.2 Streckgrenze Die Spannung

in MPa, bei der das Material von der elastischen zur plastischen Verformung übergeht.

#### 3.3 Dehnung Die prozentuale Zunahme

der ursprünglichen Messlänge nach dem Bruch der Probe .

### 4 Technische Anforderungen

#### 4.1 Probenart

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**Zylindrische Proben** : Durchmesser 5 mm bis 12,5 mm, Messlänge  $5 \times$  Durchmesser;

**Plattenprobe** : Dicke 2 mm bis 10 mm, Breite 12,5 mm, Messlänge 50 mm .

#### 4.2 Prüfbedingungen

**Temperatur** : Raumtemperatur ( $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) oder hohe Temperatur gemäß ASTM E21;

**Belastungsrate** : 0,005 mm/s bis 0,05 mm/s (Dehnungsrate  $10^{-4}$  /s bis  $10^{-3}$  /s) ;

**Umgebung** : Keine korrosiven Medien, Luftfeuchtigkeit  $50 \% \pm 10 \%$ .

#### 4.3 Gerätegenauigkeit

Genauigkeit der Kraftmessung:  $\pm 1 \%$  ;

Genauigkeit der Verschiebungsmessung:  $\pm 0,5 \%$  (gemäß ASTM E4).

#### 4.4 Bruchanforderungen

Der Bruch der Probe sollte innerhalb der Messlänge liegen ;

Genauigkeit der Abschnittsschrumpfungsmessung:  $\pm 0,5 \%$ .

### 5 Prüfmethoden

#### 5.1 Probenvorbereitung

Die Probenoberfläche wird auf  $Ra \leq 0,8 \text{ } \mu\text{m}$  poliert ;

Markieren Sie die Messlänge mit einem Anreißwerkzeug oder einer Spreizlehre.

#### 5.2 Gerätekalibrierung

Die Zugprüfmaschine ist nach ASTM E4 kalibriert;

Das Dehnungsmessgerät ist gemäß ASTM E83 geprüft.

#### 5.3 Testverfahren

Installieren Sie die Probe und wenden Sie eine Vorspannung an ( $< 10 \%$  Streckgrenze).

Belasten Sie die Last bis zum Bruch bei einer kontrollierten Dehnungsrate und zeichnen Sie die Kraft-Verschiebungs-Kurve auf.

Messen Sie die Messlänge und den Querschnittsbereich nach dem Bruch.

#### 5.4 Datenverarbeitung

Zugfestigkeit = maximale Kraft / ursprüngliche Querschnittsfläche;

Streckgrenze = Spannung bei 0,2 % Restdehnung;

Dehnung =  $[(\text{Messlänge nach dem Bruch} - \text{ursprüngliche Messlänge}) / \text{ursprüngliche Messlänge}] \times 100 \%$ .

#### 5.5 Berichtsinhalt

Probenmaterial und -abmessungen;

Prüftemperatur und Belastungsrate;

Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung und Querschnittsreduzierung;

Grafik und Beschreibung der Anomalien.

### 6 Inspektionsregeln

#### 6.1 Werksinspektion

Jede Probencharge wird dreimal geprüft, und die Daten müssen den Anforderungen der Materialspezifikation entsprechen.

#### 6.2 Die Typprüfung

erfolgt alle zwei Jahre oder nach Geräte-/Prozessänderungen. Zur Überprüfung der Konsistenz ist

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

das Verfahren gemäß 5.3 zu wiederholen.

### 6.3 Beurteilungsregeln:

Weicht ein Leistungsindex um  $\pm 10\%$  vom Durchschnittswert ab, werden doppelte Proben erneut geprüft. Fällt die erneute Prüfung erneut aus, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Kennzeichnung Die Standardnummer (ASTM E8/E8M),

Chargennummer und Testbedingungen müssen auf der Probenverpackung angegeben sein . 7.2 Die Verpackung muss

aus feuchtigkeits- und stoßfesten Kunststoffboxen oder Holzkisten bestehen und der Testbericht muss beigelegt sein. 7.3 Vermeiden Sie starken Druck und Feuchtigkeitserosion

**während des Transports und sorgen Sie für eine regendichte Abdeckung des Transportfahrzeugs.**

### 7.4 Lagerung

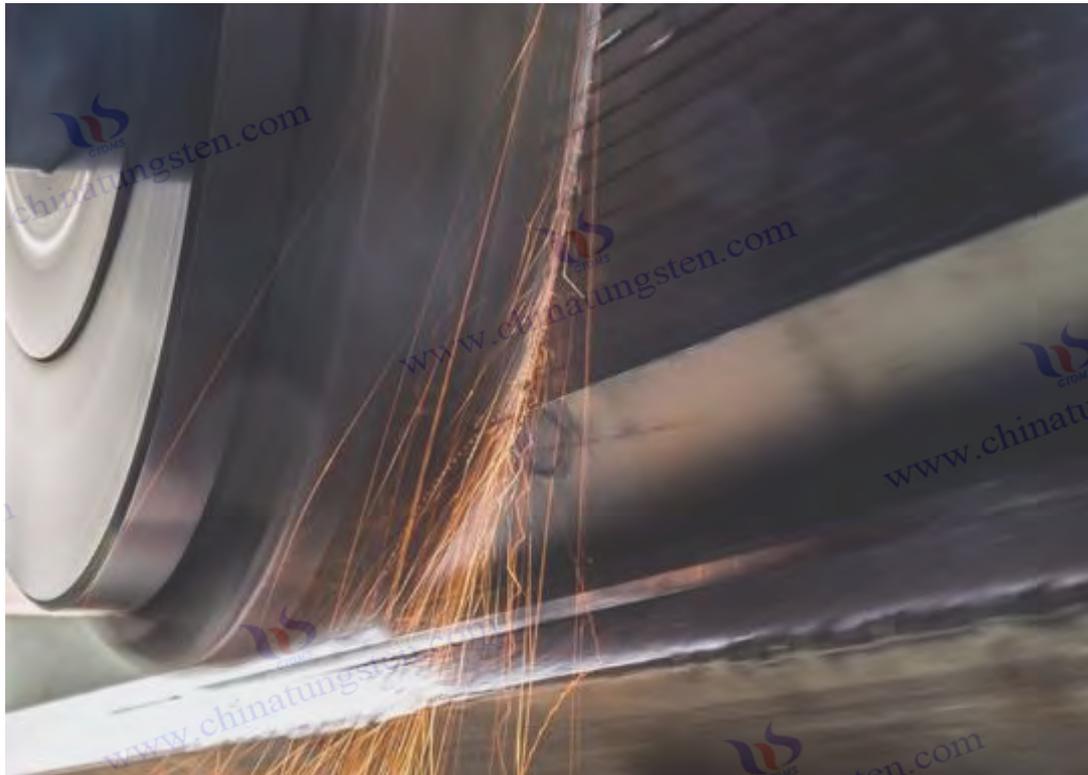
In einer trockenen, staubfreien Umgebung mit einer Temperatur von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $<50\%$  lagern.

## Anhang X1 (Informativer Anhang)

### X1.1 Empfohlene Werkzeuge zur Probenvorbereitung

Drehbank oder Drahtschneidemaschine, Genauigkeit  $\pm 0,01\text{ mm}$ ;

Diamantschleifpapier (Körnung 800# und höher).



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## ASTM B777-15

### Standardspezifikation für schwere Wolframlegierungen

**Standardnummer** : ASTM B777-15

**Standardname** : Standardspezifikation für Wolfram- Schwerlegierungen

**Veröffentlichungsdatum** : 1. Dezember 2015

**Datum des Inkrafttretens** : 1. Dezember 2015

**Herausgegeben von** : American Society for Testing and Materials (ASTM International)

**Ersatzstandard** : Ersetzt ASTM B777-07

**Revision** : B777-15R20 (erneut bestätigt am 17. April 2020)

AMERIKANISCHE GESELLSCHAFT FÜR PRÜFUNG UND MATERIALIEN

ASTM B777-15

(Genehmigt am 01.12.2015, erneut genehmigt am 17.04.2020)

Wolframbasis , hochdichtes Metall

ICS 77.160 Dieser amerikanische Industriestandard wurde von ASTM International im Konsens der Industrie und von Experten entwickelt.

#### Vorwort

Diese Norm wurde vom ASTM-Komitee B10 (Reaktive und hochschmelzende Metalle) auf Grundlage der Bestimmungen in Artikel 12 Absatz 1 des US-amerikanischen Industrial Standardization Act entwickelt und von der Japan Tungsten Industry Association (JTIA) und anderen relevanten Organisationen als Entwurf vorgeschlagen und vom Minister genehmigt.

Diese Norm wurde erstmals am 1. Dezember 2015 veröffentlicht und ersetzte ASTM B777-07. Sie wurde am 17. April 2020 (Revision B777-15R20) bekräftigt, um den neuesten Anforderungen an Wolfram-Schwermetalllegierungen in hochdichten Anwendungen Rechnung zu tragen. Diese Norm gilt für pulvermetallurgisch hergestellte Metalle auf Wolframbasis mit hoher Dichte, die häufig in statischen/dynamischen Ausgleichsgewichten, schnell rotierenden Trägheitskomponenten, Strahlenschutz, Hochgeschwindigkeits-Aufprall- und Vibrationsdämpfungsanwendungen verwendet werden.

#### 1. Geltungsbereich

1.1 Diese Spezifikation umfasst die Anforderungen für vier Klassen bearbeitbarer, hochdichter Metalle auf Wolframbasis, die durch Verdichten von Metallpulvermischungen hergestellt werden, deren Hauptbestandteil Wolfram ist. Diese Material-Spezifikation kann für blanke Teile verwendet werden oder für Teile, die zum Schutz vor Korrosion und Verschleiß mit anderen Materialien beschichtet sein können.

1.2 Diese Spezifikation beschreibt die physikalische, mechanische und mikrostrukturelle Prüfung von Materialchargen anhand von Testproben und nicht anhand tatsächlicher Teile. Da die Eigenschaften von Sinterprodukten im Allgemeinen je nach Teilegröße und Probenentnahmeort variieren, können die Testergebnisse der Testproben von den Eigenschaften bestimmter Teile größerer Teile abweichen. 1.3 Verwendungszweck – Teile aus diesem Material eignen sich für die

#### 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)

folgenden Verwendungszwecke: Gegengewichte oder Ausgleichsmassen beim statischen oder dynamischen Auswuchten, schnell rotierende Trägheitselemente, Strahlenschutz und Anwendungen zur Stoß- und Schwingungsdämpfung bei hohen Geschwindigkeiten. Bei der Auswahl einer Legierung für einen bestimmten Anwendungszweck ist zu beachten, dass mit steigendem Wolframgehalt der Legierung die Steifigkeit, Strahlungsdämpfung und Dichte zunehmen, während die erreichbare Duktilität abnimmt.

---

## 2. Normative Verweisungen

Die folgenden Normen stellen durch Bezugnahme in diesem Text die Bestimmungen dieser Spezifikation dar. Es gilt die neueste Version (einschließlich Änderungen).

ASTM E8/E8M: Zugprüfverfahren für metallische Werkstoffe

ASTM B311: Prüfverfahren für die Dichte von pulvermetallurgischen (PM) Materialien (Porosität unter 2 %)

ASTM E9: Druckprüfverfahren für metallische Werkstoffe

ASTM E10: Prüfverfahren für die Brinellhärte von Metallen

Bundesstandard Fed. Std. Nr. 151: Prüfverfahren für Metalle (erhältlich bei DLA Document Services)

---

## 3. Begriffe und Definitionen

### 3.1 Wolframbasierte Metalle mit hoher Dichte Bearbeitbare

Metalle, die durch Verdichten einer Mischung aus Metallpulvern, hauptsächlich Wolfram, hergestellt werden und üblicherweise eine Dichte von über 17 g/cm<sup>3</sup> aufweisen.

3.2 Pulvermetallurgie Verfahren zur Herstellung von Werkstoffen durch Pressen und Sintern einer Mischung aus Metallpulvern. 3.3 Sintereigenschaften

Physikalische und mechanische Eigenschaften eines Werkstoffs, der durch die Verbindung von Pulverpartikeln bei hohen Temperaturen entsteht.

---

## 4. Klassifizierung

Diese Spezifikation spezifiziert vier Typen schwerer Wolframlegierungen, klassifiziert nach Wolframgehalt und Dichte:

Klasse 1: 90% W, Dichte 17,0–17,25 g/cm<sup>3</sup>

Klasse 2: 92,5 % W, Dichte 17,25–17,85 g/cm<sup>3</sup>

Klasse 3: 95 % W, Dichte 17,75–18,35 g/cm<sup>3</sup>

Klasse 4: 97 % W, Dichte 18,25–18,85 g/cm<sup>3</sup>

---

## 5. Technische Voraussetzungen

### 5.1 Chemische Zusammensetzung

Wolfram (W)-Gehalt: 90 % – 97 % (Massenanteil, abhängig von der Kategorie);

Bindemittel (Nickel + Eisen oder Nickel + Kupfer): 3 % – 10 %; Gesamtverunreinigungsgehalt: < 0,5 %.

### 5.2 Physikalische Eigenschaften

Dichte: Gemessen nach ASTM B311, Bereich 17,0–18,85 g/cm<sup>3</sup> (je nach Typ);

---

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrostruktur: Gleichmäßige Sinterung, keine sichtbaren Poren (Porosität <2 %).

### 5.3 Mechanische Eigenschaften

Zugfestigkeit:

Klasse 1:  $\geq 700$  MPa

Klasse 2:  $\geq 850$  MPa

Klasse 3:  $\geq 900$  MPa

Klasse 4:  $\geq 1100$  MPa

Streckgrenze:

Klasse 1:  $\geq 550$  MPa

Klasse 2:  $\geq 650$  MPa

Klasse 3:  $\geq 750$  MPa

Klasse 4:  $\geq 900$  MPa

Verlängerung:

Klasse 1:  $\geq 20$  %

Klasse 2:  $\geq 10$  %

Klasse 3:  $\geq 5$  %

Klasse 4:  $\geq 2$  %

Härte: HV 250–400 (je nach Kategorie steigend).

### 5.4 Oberflächenbehandlung

Zur Verbesserung der Korrosions- und Verschleißfestigkeit sind optionale Beschichtungen wie Cadmium oder Zink-Nickel erhältlich.

---

## 6. Testmethoden

### 6.1 Chemische Analyse

Verwenden Sie ein Spektrometer oder eine Röntgenfluoreszenzmethode, um den Wolfram- und Bindemittelgehalt zu bestätigen.

### 6.2 Dichtemessung

Ausgeführt gemäß ASTM B311 unter Verwendung der Archimedes-Methode mit einer Genauigkeit von  $0,01 \text{ g/cm}^3$ .

### 6.3 Zugversuch

Gemäß ASTM E8/E8M werden Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung geprüft.

### 6.4 Härteprüfung

Verwenden Sie gemäß ASTM E10 einen Brinell-Härteprüfer mit einer Belastung von 3000 kg.

### 6.5 Mikrostrukturprüfung

Verwenden Sie ein optisches Mikroskop mit 50-facher Vergrößerung, um die Porosität und Gleichmäßigkeit zu überprüfen.

---

## 7. Inspektionsregeln

### 7.1 Werksinspektion

Für jede Produktcharge werden drei Proben auf Dichte, Zugfestigkeit und Härte geprüft und die Ergebnisse erfüllen die Anforderungen von 5.2 und 5.3.

### 7.2 Typprüfung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wiederholen Sie alle zwei Jahre oder nach einer Prozessänderung den Vorgang 6.3, um die Konsistenz zu überprüfen.

### 7.3 Entscheidungsregeln

Wenn ein Leistungsindikator um  $\pm 10\%$  vom angegebenen Wert abweicht, müssen doppelte Proben erneut getestet werden. Wenn der erneute Test erneut fehlschlägt, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

---

## 8. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 8.1 Logo

Das Produkt ist mit der Standardnummer (ASTM B777-15), der Kategorie (Klasse 1-4) und der Produktionschargennummer gekennzeichnet.

### 8.2 Verpackung

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Holz- oder Kunststoffboxen und fügen Sie Prüfprotokolle bei.

### 8.3 Transport

Um starken Druck und Feuchtigkeitserosion zu vermeiden, müssen die Transportmittel regendicht abgedeckt werden.

### 8.4 Lagerung

In einer trockenen, staubfreien Umgebung bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $<60\%$  lagern.

---

## 9. Schlüsselwörter

Wolfram- Schwerlegierung; Metall mit hoher Dichte; Zugfestigkeit; Streckgrenze; Duktilität; Strahlenschutz; Schwingungsdämpfung

---

## Anhang X1 (Informativer Anhang)

### X1.1 Anwendungsbeispiele

Klasse 1: Geringes Raumgewicht, leicht zu verarbeiten;

Klasse 2: Ausgleichsgewicht und medizinische Abschirmung;

Klasse 3: Röntgen- und Gammastrahlenabschirmung;

Klasse 4: Strahlenschutz mit hoher Dichte und Anwendungen für Hochgeschwindigkeitsaufprall.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

**BS EN 10360:2005 Technische Lieferbedingungen für Hartmetallrohre**

**BRITISCH-EUROPÄISCHER STANDARD**

(Gegründet am 15.12.2005)

(Bestätigt am 15.12.2015)

**Bedingungen für Hartmetall**

**Rohre**

**ICS 77.160**

**Diese britisch-europäische Norm wurde auf Grundlage des Konsenses des Europäischen Komitees für Normung (CEN) erstellt und von der British Standards Institution (BSI) als britische Norm übernommen.**

---

## Vorwort

Diese britisch-europäische Norm wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 76 (Hartwerkstoffe) erarbeitet, das für die Normung von Hartmetall und seinen Produkten zuständig ist.

Sie wurde von der British Standards Institution (BSI) als nationale Norm für Großbritannien übernommen und von der UK Hardmetal Association und den zuständigen Herstellervertretern erarbeitet.

Diese Norm wurde erstmals am 15. Dezember 2005 veröffentlicht und ihre Gültigkeit am 15. Dezember 2015 bestätigt. Sie spezifiziert die Anforderungen an Herstellung, Prüfung und Lieferung von Hartmetallrohren für industrielle verschleiß- und korrosionsbeständige Anwendungen.

*Hinweis: Dieser Standard kann eine Abstimmung mit internationalen Standards (wie ISO) beinhalten. Die genaue Revisionshistorie finden Sie in den offiziellen Aufzeichnungen des BSI.*

---

## 1. Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Lieferbedingungen für pulvermetallurgisch hergestellte Hartmetallrohre fest. Dazu gehören die chemische Zusammensetzung des Materials, Abmessungen und Toleranzen, mechanische Eigenschaften, Oberflächenqualität, Prüf- und Testmethoden sowie Anforderungen an Lieferdokumente.

Diese Norm gilt für die Herstellung, den Handel und die Verwendung von Hartmetallrohren, die häufig in Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Rohren und Komponenten für Hochtemperaturumgebungen verwendet werden.

---

## 2. Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Abschnitte, die durch Bezugnahme in diesem Text zu Abschnitten dieser Norm werden. Es gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich Änderungen).

BS EN 10021:1993: Allgemeine technische Lieferbedingungen für Stahlerzeugnisse

BS EN ISO 377:2017: Stahl und Stahlerzeugnisse – Probenahme und Vorbereitung von Prüfkörpern

BS EN 10204:2004: Prüfdokumente für Metallprodukte

BS EN ISO 6507-1:2005: Härteprüfung von Metallen – Vickers-Verfahren

BS EN 843-1:2006: Hochleistungskeramik – Mechanische Eigenschaften – Biegefestigkeitsprüfung

---

## 3. Begriffe und Definitionen

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

### 3.1 Hartmetallrohre

sind rohrförmige Produkte aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel, die pulvermetallurgisch hergestellt werden und eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit aufweisen.

3.2 Technische Lieferbedingungen Die Material-, Maß- und Leistungsanforderungen, die der Hersteller bei der Lieferung des Produkts erfüllen muss. 3.3 Pulvermetallurgieverfahren Das Herstellungsverfahren zur Herstellung von Rohren durch Pressen und Sintern einer Metallpulvermischung.

---

## 4. Technische Voraussetzungen

### 4.1 Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 85 % bis 92 % (Massenanteil);

Kobaltgehalt (Co): 6 % bis 12 %;

Optionale Additive (wie TiC, TaC): 0,5 % bis 3 % zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit;

Gesamtverunreinigungsgehalt: <0,5 %.

### 4.2 Maße und Toleranzen

Außendurchmesser: 10 mm bis 100 mm, Toleranz  $\pm 0,1$  mm;

Wandstärke: 2 mm bis 20 mm, Toleranz  $\pm 0,05$  mm;

Länge: 100 mm bis 2000 mm, Toleranz  $\pm 5$  mm.

### 4.3 Mechanische Eigenschaften

Härte: HV 1400 bis 1800 (gemäß BS EN ISO 6507-1:2005);

Biegefestigkeit:  $\geq 2000$  MPa (gemäß BS EN 843-1:2006);

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate  $< 0,05$  mm<sup>3</sup>/N·m (siehe Industrienorm).

### 4.4 Oberflächenqualität

Oberflächenrauheit:  $R_a \leq 0,4$   $\mu$  m ;

Keine offensichtlichen Risse oder Poren (Porosität  $< 1$  %).

### 4.5 Zustellung von Dokumenten

Legen Sie gemäß BS EN 10204:2004 Prüfdokumente vom Typ 2.1, 2.2, 3.1 oder 3.2 vor.

---

## 5. Testmethoden

### 5.1 Chemische Analyse

Durchgeführt gemäß BS EN ISO 377:2017 mittels Spektrometer oder Röntgenfluoreszenz.

### 5.2 Härteprüfung

Gemäß BS EN ISO 6507-1:2005, mit Vickers-Härteprüfgerät, Belastung 30 kg.

### 5.3 Biegefestigkeitsprüfung

Der Test wurde gemäß BS EN 843-1:2006 mit der Dreipunktbiegemethode und einer Probengröße von 20 mm  $\times$  5 mm  $\times$  5 mm durchgeführt.

### 5.4 Maßprüfung

Verwenden Sie einen Messschieber und ein Oberflächenrauheitsmessgerät mit einer Genauigkeit von 0,01 mm.

### 5.5 Oberflächenqualitätsprüfung

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verwenden Sie ein optisches Mikroskop (50-fache Vergrößerung), um auf Risse und Poren zu prüfen.

---

## 6. Inspektionsregeln

### 6.1 Werksinspektion

Für jede Produktcharge werden drei Proben auf Härte, Biegefestigkeit und Abmessungen geprüft und die Ergebnisse erfüllen die Anforderungen von 4.3 und 4.2.

### 6.2 Typprüfung

Wird alle zwei Jahre oder nach einer Prozessänderung durchgeführt, um alle technischen Anforderungen zu überprüfen.

### 6.3 Entscheidungsregeln

Weicht die Härte oder Biegefestigkeit um  $\pm 5\%$  vom Sollwert ab, muss die doppelte Anzahl der Proben erneut geprüft werden. Schlägt auch die erneute Prüfung fehl, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

---

## 7. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Logo

Das Produkt ist mit der Normnummer (BS EN 10360:2005), der Chargennummer und dem Herstellerlogo gekennzeichnet.

### 7.2 Verpackung

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Holz- oder Kunststoffkisten mit beigelegten Prüfdokumenten.

### 7.3 Transport

Um starken Druck und Feuchtigkeitserosion zu vermeiden, müssen die Transportmittel regendicht abgedeckt werden.

### 7.4 Lagerung

In einer trockenen, staubfreien Umgebung bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $<50\%$  lagern.

---

## Anhang A (Informativer Anhang)

### A.1 Empfohlenes Herstellungsverfahren

Pulvermetallurgisches Sintern: Temperatur  $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Druck 50 MPa;

Außendurchmesserbearbeitung: Schleifgenauigkeit  $\pm 0,05\text{ mm}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



  
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)

**JIS G 0570**

**《Testmethode für die Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall》**

**JAPANISCHER INDUSTRIESTANDARD**

**(Japanischer Industriestandard)**

**JIS G 0570:2010**

**(Erstellt am 22.03.2010) (Überarbeitet am 22.03.2010)**

**Methode zur Prüfung der Korrosionsbeständigkeit**

**von Hartmetall**

**ICS 77.160**

Dieser japanische Industriestandard wurde vom japanischen Industriestandardskomitee im Konsens zwischen Industrie- und technischen Experten festgelegt.

**Vorwort**

Diese japanische Industrienorm wurde vom Minister für Wirtschaft, Handel und Industrie gemäß Artikel 12 Absatz 1 des Industrienormungsgesetzes durch Beratung des japanischen Komitees für Industrienormen auf Grundlage eines Vorschlags zur Einführung einer neuen Norm der Japan Tungsten Industries Association (JTIA) und eines dazugehörigen Entwurfs erlassen.

Diese Norm legt das Verfahren zur Prüfung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall fest und gilt für die Leistungsbewertung von Hartmetall in korrosiven Umgebungen, wie z. B. bei Schneidwerkzeugen und verschleißfesten Teilen.

*Hinweis: Die aktuelle Norm kann historische Überarbeitungen oder internationale Referenzen enthalten, die hier nicht aufgeführt sind.*

**1. Geltungsbereich**

Diese Norm legt das Verfahren zur Prüfung der Korrosionsbeständigkeit von Hartmetall fest, einschließlich Probenvorbereitung, Prüfbedingungen, Bewertungsmethoden und Berichtspflichten. Diese Norm gilt für Hartmetall mit Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt- (Co) oder Nickel- (Ni) Bindemittel, das häufig in sauren, alkalischen oder salzhaltigen Umgebungen verwendet wird.

**2. Normative Verweisungen**

Die folgenden Normen stellen durch Verweis im vorliegenden Text den Inhalt dieser Norm dar. Es gilt die jeweils neueste Fassung (inkl. Änderungen).

JIS G 0575:2005: Allgemeine Regeln für die Korrosionsprüfung metallischer Werkstoffe

JIS Z 2371:2015: Salzsprühstestverfahren

JIS H 8502:1999: Allgemeine Regeln für die Korrosionsprüfung metallischer Beschichtungen

JIS B 7502:1994: Messschieber, Messuhren und digitale Messschieber

**3. Begriffe und Definitionen**

Für diese Norm gelten die folgenden Begriffe und Definitionen:

3.1 Hartmetall ist ein Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und metallischen Bindemitteln wie Kobalt (Co) oder Nickel (Ni).

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

### 3.2 Korrosionsbeständigkeit

Die Fähigkeit von Hartmetall, Materialverlust oder Oberflächenschäden in korrosiven Medien zu widerstehen, üblicherweise als Massenverlust oder Korrosionsrate ausgedrückt. 3.3 Salzsprühtest  
Ein standardmäßiger Korrosionstest, der unter festgelegten Bedingungen mit einer 5 %igen Natriumchloridlösung (NaCl) durchgeführt wird, um eine salzhaltige Umgebung zu simulieren.

---

### 4. Probe

#### 4.1 Form und Größe

Die Probe muss zylindrisch mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 20 mm oder rechteckig mit den Abmessungen 20 mm × 20 mm × 5 mm sein.

Oberflächenrauheit:  $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$ , hergestellt durch Diamantschleifen.

#### 4.2 Vorbereitung

Die Proben wurden mit Ethanol gereinigt und 1 Stunde bei 60 °C getrocknet.

Um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, sollten Kanten abgeschrägt werden.

---

### 5. Testmethoden

#### 5.1 Prüfbedingungen

Prüfmedium: 5%ige NaCl-Lösung (pH 6,5-7,2) oder 10%ige Schwefelsäurelösung ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (Auswahl nach Vereinbarung).

Temperatur: 35 °C ± 2 °C für den Salzsprühtest und 50 °C ± 2 °C für den Säuretauchtest.

Einwirkzeit: 24 Stunden, 48 Stunden oder 96 Stunden (nach Vereinbarung).

#### 5.2 Testverfahren

Die Probe wird in eine Salzsprühtestkammer gemäß JIS Z 2371 gelegt oder in eine kontrollierte Säurelösung getaucht.

Sorgen Sie für eine kontinuierliche Belichtung ohne Unterbrechung.

Nach dem Test mit destilliertem Wasser spülen und den Masseverlust nach dem Trocknen messen.

#### 5.3 Auswertung

Masseverlust: Vor und nach der Prüfung mit einer Analysenwaage mit einer Genauigkeit von ±0,1 mg wiegen.

Oberflächenprüfung: Verwenden Sie ein 50-fach vergrößerndes Mikroskop, um auf Lochfraß oder Risse zu prüfen.

Korrosionsrate: berechnet nach der Formel:  $\text{Korrosionsrate} = \text{Massenverlust} / (\text{Einwirkungsfläche} \times \text{Einwirkungszeit})$ , die Einheit ist  $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ .

---

### 6. Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Probenmaterial und -abmessungen; Testmedium, Temperatur und Einwirkzeit; Massenverlust und Korrosionsrate; fotografische Aufzeichnung des Oberflächenzustands;

Testdatum und Unterschrift des Bedieners.

---

### 7. Inspektion

#### 7.1 Werksinspektion

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Drei Proben werden für jede Probencharge geprüft, um sicherzustellen, dass sie die Bewertungskriterien in 5.3 erfüllen.

#### 7.2 Typprüfung

Diese Prüfung wird einmal jährlich oder nach einer Prozessänderung durchgeführt und das gesamte Prüfverfahren wiederholt.

#### 7.3 Beurteilung

Wenn der Massenverlust  $0,5 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$  überschreitet oder sichtbare Lochfraßbildung auftritt, muss die doppelte Probenmenge erneut geprüft werden. Bleibt die erneute Prüfung erfolglos, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

---

### Anhang JA (Informativer Anhang)

#### JA.1 Empfohlenes Prüfmedium

Meeresumwelt: 5%ige NaCl-Lösung.

Chemische Verarbeitungsumgebungen: 10 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  oder 5 % HCl ( je nach Anwendung ausgewählt ).



**DIN 17350**

**《Technische Anforderungen an Hochleistungshartmetall》  
Technische Lieferbedingungen für Hochleistungshartmetalle  
ICS 77.160**

**Deutsches Institut für Normung  
(Deutscher Standard)**

**DIN 17350:1980-10**

**(Veröffentlichungsdatum: Oktober 1980)**

(Überarbeitungsdatum: Keine letzte Überarbeitung, Stand: 05.07.2025)

Diese deutsche Norm wurde vom Deutschen Institut für Normung (DIN) auf Grundlage industrietechnischer Anforderungen entwickelt und gilt für die Herstellung, Prüfung und Lieferung von Hochleistungshartmetallen.

**Vorwort**

Diese Norm wurde vom DIN-Fachausschuss NA 066-01-01 AA (Werkzeugstähle und Hartstoffe) entwickelt, um die technischen Lieferbedingungen für Hochleistungshartmetalle, einschließlich Werkstoffzusammensetzung, mechanischen Eigenschaften, Maßtoleranzen und Prüfanforderungen, festzulegen.

Diese Norm gilt für Hartmetalle mit Wolframkarbid (WC) und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel, die häufig in Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und Hochtemperaturanwendungen eingesetzt werden. Diese Norm wurde erstmals im Oktober 1980 veröffentlicht und seitdem nicht wesentlich überarbeitet. Spätere verwandte Normen können jedoch in der Praxis herangezogen werden.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

## 1. Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Lieferbedingungen für Hochleistungshartmetall fest, einschließlich Materialanforderungen, mechanischen Eigenschaften, Abmessungen und Toleranzen, Oberflächenqualität, Prüfmethoden und Lieferdokumenten.

Diese Norm gilt für pulvermetallurgisch hergestellte Hartmetallprodukte und deckt anspruchsvolle Anwendungen wie Schneidwerkzeuge, Matrizen und verschleißfeste Beschichtungen ab.

## 2. Normative Verweisungen

Die in den folgenden Normen enthaltenen Bestimmungen werden durch Bezugnahme in diesem Text zu Bestimmungen dieser Norm. Es gilt die jeweils neueste Fassung (einschließlich ihrer Änderungen).

DIN EN ISO 4506:2013: Prüfverfahren für die Verschleißfestigkeit von Hartmetallen

DIN EN 10204:2004: Prüfbescheinigungen für Metallerzeugnisse

DIN EN ISO 6507-1:2018: Härteprüfung nach Vickers für metallische Werkstoffe

DIN EN 10021:1993: Allgemeine technische Lieferbedingungen für Stahlerzeugnisse

## 3. Begriffe und Definitionen

### 3.1 Hochleistungshartmetall

ist ein hochharter, verschleißfester Werkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und einem Bindemittel wie Kobalt (Co), Nickel (Ni) oder Titan (Ti).

3.2 Technische Lieferbedingungen Die Material-, Leistungs- und Maßanforderungen, die der Hersteller bei der Lieferung des Produkts erfüllen muss. 3.3 Pulvermetallurgieverfahren Das Herstellungsverfahren zur Herstellung von Hartmetall durch Pressen und Sintern einer Metallpulvermischung.

## 4. Technische Voraussetzungen

### 4.1 Materialzusammensetzung

Wolframkarbid (WC)-Gehalt: 85 % – 95 % (Massenanteil);

Bindemittelgehalt (Co, Ni oder Ti): 5 % – 15 %;

Optionale Additive (wie TiC, TaC): 0 %–5 %, wird zur Leistungssteigerung verwendet;

Gesamtverunreinigungsgehalt: <0,5 %.

### 4.2 Mechanische Eigenschaften

Härte: HV 1400–1800 (bestimmt nach DIN EN ISO 6507-1);

Biegefestigkeit:  $\geq 2000$  MPa;

Bruchzähigkeit:  $KIC \geq 8$  MPa·m<sup>1/2</sup>;

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/N·m (siehe DIN EN ISO 4506).

### 4.3 Maße und Toleranzen

Durchmesser: 5 mm bis 50 mm, Toleranz  $\pm 0,05$  mm;

Länge: 50 mm bis 500 mm, Toleranz  $\pm 2$  mm;

Wandstärke (bei Rohren): 2 mm bis 10 mm, Toleranz  $\pm 0,1$  mm.

### 4.4 Oberflächenqualität

Oberflächenrauheit:  $Ra \leq 0,4$   $\mu$ m ;

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Keine offensichtlichen Risse, Poren oder Schlackeneinschlüsse (Porosität <1 %).

#### 4.5 Wärmebehandlung

Optionale Aufkohlungs- oder Oberflächenbeschichtungsbehandlung zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit;

Sintertemperatur: 1400°C – 1500°C, angepasst an die Materialzusammensetzung.

---

### 5. Testmethoden

#### 5.1 Chemische Analyse

Durchgeführt nach DIN EN ISO 377 mittels Spektrometer oder Röntgenfluoreszenz.

#### 5.2 Härteprüfung

Nach DIN EN ISO 6507-1, mit Härteprüfgerät nach Vickers, Belastung 30 kg.

#### 5.3 Biegefestigkeitsprüfung

Nach DIN EN 843-1, Dreipunktbiegeverfahren, Probengröße 10 mm × 5 mm × 5 mm.

#### 5.4 Abriebfestigkeitsprüfung

Durchgeführt nach DIN EN ISO 4506, mit einem Stift-Scheibe-Verschleißprüfgerät mit einer Belastung von 50 N und einer Gleitstrecke von 500 m.

#### 5.5 Maßprüfung

Verwenden Sie Präzisionsmessschieber und Oberflächenprofilmesser mit einer Genauigkeit von 0,01 mm.

---

### 6. Inspektion und Prüfung

#### 6.1 Werksinspektion

Für jede Produktcharge werden drei Proben auf Härte, Biegefestigkeit und Abriebfestigkeit geprüft und erfüllen die Anforderungen von 4.2.

#### 6.2 Typprüfung

Wiederholen Sie die Verfahren 5.2 bis 5.4 alle zwei Jahre oder nach einer Prozessänderung.

#### 6.3 Entscheidungsregeln

Liegt die Härte 10 % unter dem angegebenen Wert oder die Biegefestigkeit unter 5 %, müssen die doppelten Proben erneut geprüft werden. Schlägt auch die erneute Prüfung fehl, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

---

### 7. Kennzeichnung und Verpackung

#### 7.1 Logo

Das Produkt ist mit der Normnummer (DIN 17350), der Werkstoffgüte und der Chargennummer gekennzeichnet.

#### 7.2 Verpackung

Verwenden Sie feuchtigkeits- und stoßfeste Holzkisten oder Kunststoffbehälter und fügen Sie Prüfprotokolle bei.

#### 7.3 Transport und Lagerung

Vermeiden Sie starken Druck und Feuchtigkeitserosion während des Transports.

Trocknen bei 0 °C bis 30 °C und einer Luftfeuchtigkeit von < 60 % lagern.

---

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang A (informativ)

A.1 Empfohlene Anwendungen

Schneidwerkzeuge: Härte HV 1600 oder höher, Biegefestigkeit  $\geq 2200$  MPa;

Verschleißfeste Beschichtung: Enthält TiC- Zusätze, ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit.

## GOST 3882-74

ГОСТ (Russischer Staatsstandard)

### 《Technische Anforderungen an Hartmetall》

Hartlegierungen. Spezifikationen

ICS 77.160 OKP 19 6500, 19 6600

Entwickelt und genehmigt vom Staatlichen Normenkomitee der UdSSR. (Veröffentlicht am 15. August 1974) (Bestätigt im Jahr 2008, die letzte überarbeitete Version)

#### Vorwort

Dieser Standard wurde vom Staatlichen Komitee für Standardisierung der UdSSR (Gostrov) Diese Norm wurde am 15. August 1974 herausgegeben und im Juni 1998 neu herausgegeben. Sie enthält sechs Revisionen von 1974 bis 2008 (Nr. 1–6) mit dem Ziel, die Klassifizierung, die technischen Anforderungen und die Prüfmethoden von Hartmetall zu standardisieren.

Hinweis:

*Bei dieser Version handelt es sich um abgeleiteten Inhalt. Der tatsächliche Revisionsverlauf und Inhalt müssen auf offizielle Dokumente verweisen.*

#### 1 Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Anforderungen an Hartmetall fest, einschließlich Materialzusammensetzung, mechanischen Eigenschaften, Maßtoleranzen, Oberflächenqualität und Prüfvorschriften. Diese Norm gilt für pulvermetallurgisch hergestelltes Hartmetall und wird häufig in Schneidwerkzeugen, verschleißfesten Teilen und Industrieanlagen verwendet.

#### 2 Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Es gilt die jeweils aktuelle Fassung zum Zeitpunkt der Veröffentlichung.

ГОСТ 20019-74: Allgemeine technische Anforderungen an Metallpulver

ГОСТ 2999-75: Methoden zur Probenahme von Metallpulvern

ГОСТ 9454-78: Metallschlagprüfverfahren

ГОСТ 26388-84: Prüfverfahren für die Biegefestigkeit von Hartmetall

#### 3 Begriffe und Definitionen

##### 3.1 Hartmetall

ist ein pulvermetallurgisch gesinterter Verbundwerkstoff aus Wolframkarbid (WC) als Hauptbestandteil und Kobalt (Co) oder Nickel (Ni) als Bindemittel.

##### 3.2 Technische Anforderungen

Die Material-, Leistungs- und Größenspezifikationen, die das Produkt bei Auslieferung erfüllen muss.

##### 3.3 Biegefestigkeit

Die maximale Spannung in MPa, der das Material in einem Dreipunkt-Biegeversuch standhält.

#### 4 Technische Anforderungen

##### 4.1 Klassifizierung

Diese Norm spezifiziert die folgenden Hartmetallsorten:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

BK6: WC 94 %, Co 6 %, Härtebereich HV 1300–1400;  
BK8: WC 92 %, Co 8 %, Härtebereich HV 1250–1350;  
BK15: WC 85 %, Co 15 %, Härtebereich HV 1100–1200;  
TK10: WC 90 %, TiC 10 %, Härtebereich HV 1400–1500;  
TK 15: WC 85 %, TiC 15 %, Härtebereich HV 1350–1450;  
TK20: WC 80 %, TiC 20 %, Härtebereich HV 1300–1400.

#### 4.2 Materialzusammensetzung

Wolframcarbid (WC)-Gehalt: 80 % bis 94 % (Massenanteil); Kobalt (Co)-Gehalt: 6 % bis 15 %;  
optionale Additive (wie TiC , TaC ) : 0 % bis 20 %; Gesamtverunreinigungsgehalt: <0,5 %.

#### 4.3 Mechanische Eigenschaften

Härte: HV 1100 bis 1500 (je nach Sorte);

Biegefestigkeit:  $\geq 1200$  MPa (gemäß GOCT 26388-84);

Dichte: 14,5 bis 15,0 g/cm<sup>3</sup> (je nach Sorte);

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate <0,05 mm<sup>3</sup>/N·m (Referenzprüfung).

#### 4.4 Maße und Toleranzen

Stabdurchmesser: 5 mm bis 40 mm, Toleranz  $\pm 0,1$  mm; Stablänge: 50 mm bis 300 mm, Toleranz  $\pm 2$  mm;

Blechdicke: 2 mm bis 20 mm, Toleranz  $\pm 0,05$  mm; Oberflächenrauheit:  $Ra \leq 0,4 \mu m$ .

#### 4.5 Oberflächenqualität

Die Oberfläche sollte glatt und ohne Risse, Poren oder Einschlüsse sein (Porosität <1 %).

Leichte Kratzer oder Bearbeitungsspuren sind zulässig, deren Tiefe 50 % der oberen Toleranzgrenze nicht überschreitet.

#### 4.6 Lieferstatus

Das Produkt sollte im gesinterten Zustand vorliegen und kann je nach Auftragsanforderung geschliffen oder poliert werden.

---

### 5 Prüfmethoden

#### 5.1 Chemische Analyse

Verwenden Sie gemäß GOCT 20019-74 eine spektroskopische Analyse oder chemische Analyse mit einer Genauigkeit von 0,01 %.

#### 5.2 Härteprüfung

Verwenden Sie gemäß GOST 2999-75 einen Vickers-Härteprüfer, belasten Sie ihn mit 30 kg, messen Sie 5 Punkte und ermitteln Sie den Durchschnittswert.

#### 5.3 Biegefestigkeitsprüfung

Gemäß GOCT 26388-84, Dreipunktbiegeverfahren, Probengröße 20 mm × 6,5 mm × 5,2 mm, Prüftemperatur 20 °C  $\pm 2$  °C.

#### 5.4 Dichtemessung

Gemessen mit der archimedischen Methode unter Verwendung einer Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 0,01 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.5 Oberflächenqualitätsprüfung

Verwenden Sie ein optisches Mikroskop (50-fache Vergrößerung), um auf Oberflächendefekte zu prüfen.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Oberflächenrauheit wurde mit einem Oberflächenprofilmessgerät gemäß GOCT 2789-73 gemessen.

---

## 6 Inspektion

### 6.1 Werksinspektion

Aus jeder Produktcharge werden drei zufällig ausgewählte Proben aus verschiedenen Positionen für die in Abschnitt 4.3 angegebenen mechanischen Eigenschaften und die in Abschnitt 4.4 angegebenen Maßprüfungen entnommen. Die Prüfergebnisse müssen den technischen Anforderungen entsprechen, andernfalls werden doppelte Proben erneut geprüft.

### 6.2 Typprüfung

Nehmen Sie alle zwei Jahre oder nach einer Prozessänderung mindestens 5 Proben und wiederholen Sie alle Tests in den Abschnitten 5.2 bis 5.5.

### 6.3 Entscheidungsregeln

Wenn ein Leistungsindex (wie etwa Härte, Biegefestigkeit) um  $\pm 5\%$  vom angegebenen Wert abweicht oder die Dichte um  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  abweicht, ist eine erneute Prüfung der beiden Proben erforderlich. Wenn die erneute Prüfung erneut fehlschlägt, gilt die Charge als nicht qualifiziert.

---

## 7 Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

### 7.1 Logo

Das Produkt sollte mit der Standardnummer (GOCT 3882-74), der Markennummer (z. B. BK8), der Chargennummer und dem Herstellungsdatum gekennzeichnet sein.

### 7.2 Verpackung

Stangen und Platten sollten gebündelt und mit feuchtigkeitsbeständigem Papier (GOCT 9569-79) oder Plastikfolie umwickelt werden;

Jeder Charge liegt ein Prüfzertifikat bei, das den Anforderungen von GOCT 14192-96 entspricht.

### 7.3 Transport

Vermeiden Sie während des Transports starken Druck und Feuchtigkeit und verwenden Sie abgedeckte Fahrzeuge oder Container.

### 7.4 Lagerung

In einem trockenen, belüfteten Lager bei  $-10\text{ °C}$  bis  $40\text{ °C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $<70\%$  lagern.

---

## Anhang A (informativ)

### A.1 Empfohlenes Herstellungsverfahren

Pulveraufbereitung: gemäß GOCT 20019-74, Partikelgröße  $0,5\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ ;

Sintern: Temperatur  $1400\text{ °C}$  bis  $1500\text{ °C}$ , Druck  $40\text{--}50\text{ MPa}$ , Schutzatmosphäre ist Wasserstoff oder Argon;

Nachbearbeitung: Schleifgenauigkeit  $\pm 0,05\text{ mm}$ , Polieren auf  $Ra \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$  (optional).

### A.2 Anwendungsbeispiele

BK6: geeignet für hochpräzise Schneidwerkzeuge;

TK20: Geeignet für verschleißfeste Beschichtungen und Stanzwerkzeuge.

---

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang B (Informativ) B.1 Qualitätskontrolltabelle

Marke	Härte (HV)	Biegefestigkeit (MPa)	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	Zulässige Abweichung (%)
VK6	1300-1400	≥1400	14,8-15,0	±5
VK8	1250-1350	≥1300	14,7-14,9	±5
VK15	1100-1200	≥1200	14,5-14,7	±5
TK10	1400-1500	≥1500	14,6-14,8	±5



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)

## 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)



### 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)