

Wolframhartmetall
Umfassende Untersuchung physikalischer und chemischer
Eigenschaften, Prozesse und Anwendungen (XIV)

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

EINFÜHRUNG IN DIE CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP® | Harte Technologie, intelligente Zukunft

Der weltweit führende Anbieter digitaler und intelligenter Dienstleistungen für die Wolfram-, Molybdän- und Seltenerdindustrie

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 88 – 92; Genauigkeit: Düsenlochtoleranz ±0,001 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,10,4 μm .

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

Effizienz: Unterstützt Hochdruckeinspritzung (0,1500 MPa), mit einer um 20 – 50 % 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 mm
Sandstrahldüse	Hochverschleißfeste	Entrosten von Schiffen, Entgraten von Autoteilen	Düsendurchmesser 2 - 12,
Sandstrahldüse	Ausführung, Strahlen	und Betonreinigung.	Länge 50 - 200
Wasserstrahldüse	Hochdruckwasserstrahl,	Schneiden von Titan in der Luft- und Raumfahrt,	Der Düsendurchmesser
Wasserstrahldüse	Schneiden harter Materialien	Schneiden von Verbundwerkstoffen für die Automobilindustrie, Steinbearbeitung.	beträgt 0,12, die Länge 20-100 ,
Sprühdüse	Präzises Aufsprühen von	Beschichtung von Turbinenschaufeln,	Der Düsendurchmesser
Sprühbeschichtungsdüse	Lacken oder Motorbeschichtung, Besprühen elektronischer Leiterplatten.		beträgt 0,55, die Länge 30-150 ,
Ölfelddüsen	Hohe Druckbeständigkeit,	Injektion von Ölbohrflüssigkeit,	Düsendurchmesser 3 - 15,
Ölfelddüse	Korrosionsbeständigkeit, Bohrspülung	Bohrlochreinigung, Injektion von Bergbauschlamm.	Länge 50 - 150,
Zerstäuberdüse	Feiner Zerstäubungsspray,	Versprühen landwirtschaftlicher Pestizide,	Der Düsendurchmesser
Zerstäuberdüse	flüssige Dispersion	Zerstäuben chemischer Flüssigkeiten, Behandlung von Umweltabgasen.	beträgt 0,23, die Länge 20-100 ,
Brenndüse	Hochtemperaturbeständige	Energiekesselverbrennung, chemische	Düsendurchmesser 1 - 10,
Brennerdüse	Ausführung, Kraftstoff- oder Gaseinspritzung	Hochtemperaturreaktion, Einspritzung in metallurgischen Öfen.	Länge 30 - 120,
Mikrodüse	Ultrakleines Düsenloch,	Medizinisches Medikamentenspray, Reinigung	Düsendurchmesser 0,05 -
Mikrodüse	hochpräzise Einspritzung	elektronischer Chips, Präzisionsbeschichtung für	0,5, Länge 10 - 50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		die Luftfahrt.	
Korrosionsbeständige Düsen	Beständig gegen starke Säuren, Laugen und Chemikalien	Injektion chemischer Säure- und Alkalilösungen, Umweltschutz, Entschwefelung und Denitrifikation, Meerwasserinjektion im Meeresbau.	Düsendurchmesser 1 - 10, Länge 30 - 150,
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.: 05925129595 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 $\pm 0,001$ mm, Oberflächenrauheit Ra 0,1 – 0,4 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 Matrizenspalt beträgt 0,010,1 mm, die Dicke beträgt 1580 mm und die Lebensdauer liegt bei 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-Stößel 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 HeavyDuty Matrize	Hochfestes Design, geeignet zum Stanzen dicker Platten.	Stanzen von dicken Blechen für Schwermaschinenteile,	Der Matrizendurchmesser beträgt 50300 mm, die Dicke 30120 mm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		Schiffskonstruktionen und Baubeschläge.	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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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	Praktische Beschreibung	Hauptanwendungen und Anwendungsszenarien	Typische Spezifikationen mm
Schneidpickel	Hochverschleißfestes Design, Hartgesteinsschneiden	Kohlebergbau, Tunnelbau und Hartgesteinsbergbau.	Zahndurchmesser 1050, Länge 50150
Tunnelnder Zahn	Hochfestes Design für Tunnelbauausrüstung	U-Bahn, Eisenbahntunnel, Tiefbaugrube.	Zahndurchmesser 1560 Länge 60180
Fräszahn	Hochtemperaturbeständiges Hochfrequenzschneiden, Straßenhobeln	Autobahnwartung, Start- und Landebahnfräsen, städtische Straßenreparatur.	Zahndurchmesser 830, Länge 40120
Bohrzahn	Beständig gegen hohen Druck, Korrosion und Bohrvorgänge.	Ölbohrungen, Erdgasexploration, geologische Untersuchungen.	Zahndurchmesser 1040, Länge 50140
Rotierende Grabzähne Rotierender Grabzahn	Hochrobustes Design, Drehbohrausrüstung	Bau von Pfahlgründungen, Brückengründungen, Bau von Hafenterminals.	Zahndurchmesser 2080, Länge 70200
Kohlebergbauzahn	Schlagfestes Design, Kohlebergbau	Kohlebergwerke im Tagebau, Kohlebergbau unter Tage, Kohlewaschanlagen.	Zahndurchmesser 1550, Länge 50160
Mikrozahn	Ultrakleine Größe, hochpräzises Schneiden	Präzise geologische Erkundung, Mikrobohrungen, Luftfahrtkomponenten.	Zahndurchmesser 520, Länge 2080
Korrosionsbeständige Zähne Korrosionsbeständiger Zahn	Starke Säure- und Alkalibeständigkeit, Schneiden in korrosiver Umgebung	Meeresbodenbergbau, Mineraliengewinnung, saure Bodentechnik.	Zahndurchmesser 1050, Länge 50150
Hochleistungszahn	Hochfestes Design, superhartes Material	Hartgesteinsminen, Eisenerzbergbau, großtechnische Zerkleinerung.	Zahndurchmesser 20100, Länge 80220

CTIA GROUP LTD

3. Stock, Nr. 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008
, 05925129595 18750234579
E-Mail: 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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Teil 4: Klassifizierung und Anwendungsgebiete von Hartmetall

Kapitel 14: Neue Anwendungen und Multifunktionalität von Hartmetall

Wolframcarbid ist ein Verbundwerkstoff mit hoher Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, der pulvermetallurgisch hergestellt wird. Wolframcarbid (WC) bildet die Hartphase und Kobalt (Co) oder andere Metalle (z. B. Nickel, Ni, Chrom, Cr) bilden die Bindephase. Zu den Grundbestandteilen gehören üblicherweise WC (70–94 %), Co (6–15 %) usw. In einigen fortgeschrittenen Formeln können Elemente wie TiC hinzugefügt werden. TaC oder Pt zur Leistungsoptimierung. Dank seiner hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften ist Hartmetall zu einem wichtigen Werkstoff in der modernen Industrie und in aufstrebenden Technologiefeldern geworden.

14.0 Eigenschaften von Hartmetall

Die Leistungsfähigkeit von Hartmetall beruht auf seiner einzigartigen Mikrostruktur und Zusammensetzung:

Hohe Härte

Der Härtebereich liegt zwischen HV 1600 und 2500 ± 30 . Dank der hohen Härte von WC (nahe der von Diamant) behält es auch bei hohen Temperaturen (bis zu $1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) eine hervorragende Verformungsbeständigkeit.

Ausgezeichnete Verschleißfestigkeit

Die Verschleißrate beträgt $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Seine Verschleißfestigkeit ist 10-20-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

mal höher als die von Stahl, sodass es für Umgebungen mit hoher Abrasivität wie Schneidwerkzeuge und abrasive Verarbeitung geeignet ist.

Elektrische Leitfähigkeit

Der spezifische Widerstand beträgt $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, was nahe an dem von Metalleitern liegt und für elektronische Anwendungen geeignet ist, insbesondere in Szenarien, in denen eine effiziente Wärmeableitung erforderlich ist.

Biokompatibilität

Die Zellüberlebensrate liegt bei $>95 \% \pm 2 \%$ und kann nach der Oberflächenbehandlung für die In-vivo-Implantation verwendet werden, wobei eine geringe Toxizität und eine gute Gewebeverträglichkeit vorliegen.

Katalytische Leistung

Mit einem MOR-Strom (Methanoxidationsreaktion) von $>450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ zeigen WC-basierte Katalysatoren in Brennstoffzellen eine gute Leistung und erreichen nahezu die katalytische Effizienz des Edelmetalls Pt.

Thermische Stabilität

Es behält seine strukturelle Integrität bei $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ und weist einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf (ungefähr $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), wodurch es sich für Hochtemperaturverarbeitung und Energiespeichergeräte eignet.

Mechanische Belastbarkeit

Biegefestigkeit $600\text{--}2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, Härte und Zähigkeit werden durch Anpassung des Co-Gehalts ausgeglichen.

Die Leistung von Hartmetall wurde durch Optimierung der Zusammensetzung (z. B. Co 6–15 % $\pm 1 \%$ zur Kontrolle der Zähigkeit, Pt 0,5–2 % $\pm 0,1 \%$ zur Verbesserung der katalytischen Leistung), Oberflächenmodifizierung (z. B. PVD/CVD-Beschichtungsdicke von $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit) und moderne Herstellungsverfahren (z. B. selektives Laserschmelzen (SLM, Laserleistung $200\text{--}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$)) deutlich verbessert. Beispielsweise wurde die Leitfähigkeit um ca. $20 \% \pm 3 \%$ erhöht, die katalytische Effizienz um ca. $30 \% \pm 5 \%$ gesteigert und die Porosität auf $< 2 \% \pm 0,1 \%$ reduziert. Dies legt den Grundstein für multifunktionale Anwendungen.

14.0 Multifunktionale Anwendung von Hartmetall

Hartmetall hat in aufstrebenden Bereichen seine Vielseitigkeit unter Beweis gestellt. Dank seiner überlegenen Leistung (hohe Härte $\text{HV } 1600\text{--}2000 \pm 30$, Druckfestigkeit $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, spezifischer elektrischer Leitfähigkeitswiderstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) wird es breit in zukunftsweisenden Bereichen wie der Elektronik, Biomedizin, katalytischen Energiespeicherung und additiven Fertigung eingesetzt. Darüber hinaus hat sich die multifunktionale Anwendung von Hartmetall basierend auf der umfassenden Netzwerksuche und den neuesten Branchentrends auf weitere Bereiche ausgeweitet, einschließlich, aber nicht beschränkt auf die folgenden Aspekte. Dieses Kapitel beginnt mit fünf Aspekten, analysiert systematisch deren Anwendung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Entwicklungstrends und bietet eine theoretische und praktische Grundlage für die nachfolgenden Abschnitte.

Elektronische und leitfähige Teile aus Hartmetall

Die hohe elektrische Leitfähigkeit und thermische Stabilität von Hartmetall (hält Temperaturen bis zu $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ stand) machen es zur idealen Wahl für elektronische Formen, Wärmeableitungssubstrate und elektrische Kontaktmaterialien, insbesondere in Halbleitergehäusen (Chip-Anschlussrahmen), 5G-Geräten (Hochfrequenz-Antennenhalterungen) und Batterieanschlüssen für Elektrofahrzeuge. Online-Daten zufolge wird Hartmetall (wie WC-Ni) aufgrund seines niedrigen spezifischen Widerstands ($< 8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) und seiner hervorragenden Oxidationsbeständigkeit ($< 0,01\text{ }\% \pm 0,001\text{ }\%$) in Werkzeugen zur Mikroelektronikverarbeitung und Bohrern für Leiterplatten mit ultrahoher Dichte verwendet und erfüllt die hohen Anforderungen an Präzision und Haltbarkeit von 5G-Basisstationen (Datenübertragungsraten $> 10\text{ Gbit/s} \pm 1\text{ Gbit/s}$) und Quantencomputern (Betriebstemperatur $< 4\text{ K} \pm 0,5\text{ K}$). Darüber hinaus weisen WC-basierte Verbundwerkstoffe in Kombination mit Graphen ($0,2\text{ }\% - 1\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$) eine verbesserte Leitfähigkeit ($> 150\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$) auf und finden Anwendung in flexibler Elektronik (z. B. tragbaren Sensoren, Flexibilität $> 90\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$) und elektromagnetischer Abschirmung (Abschirmeffizienz $> 90\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$).

Biomedizinische Anwendungen von Hartmetall

Die Biokompatibilität (Zytotoxizität $< 5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$), Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und hohe Härte von Hartmetall unterstützen die Entwicklung von Implantaten (wie Hüft- und Knieprothesen) und chirurgischen Instrumenten (wie Knochensägen und Bohrern), kombiniert mit Oberflächenmodifizierungstechnologien (wie Hydroxylapatitbeschichtung, Dicke $5\text{--}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$), um die Anforderungen an hohe Präzision ($< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) und Langzeitstabilität ($> 10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$) von Medizinprodukten zu erfüllen. Online-Daten zufolge wird WC-Co zunehmend in Zahnimplantaten (Knochenintegrationsrate $> 95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$) und Wirbelsäulenfixateuren (Dauerfestigkeit $> 1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) eingesetzt. Oberflächennitrierung (N-Gehalt $1\text{--}2\text{ }\% \pm 0,1\text{ }\%$) verbessert die antibakteriellen Eigenschaften (antibakterielle Rate $> 90\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$). Darüber hinaus zeigten WC-basierte Materialien aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche ($> 50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$) und Bioaktivität (Zelladhäsionsrate $> 85\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$) Potenzial für Biosensoren (Empfindlichkeit $> 10^3 \pm 10^2$) und Gerüste für das Tissue Engineering (Porosität $20\text{--}30\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$).

Katalyse und Energiespeicherung von Hartmetall

Die katalytische Leistung von WC-Pt-Verbundwerkstoffen (MOR-Strom $> 450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) ist in Brennstoffzellen (Leistungsdichte $> 1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$) und Elektrolyseuren (Wasserstoffproduktion $> 1\text{ l/min} \pm 0,1\text{ l/min}$) hervorragend und fördert die Entwicklung sauberer Energietechnologien, insbesondere in der Wasserstoffwirtschaft (globaler Markt > 200 Milliarden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

US-Dollar ± 20 Milliarden US-Dollar, 2025) mit großem Potenzial. Forschungsdaten zeigen, dass Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) in Superkondensatoren (spezifische Kapazität $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), Anoden von Lithium-Ionen-Batterien (spezifische Kapazität $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$) und bei der Wasserelektrolyse zur Wasserstoffherzeugung (OER-Strom $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) eingesetzt wurden und dass eine WC-Mo-Dotierung (Mo $1\% - 3\% \pm 0,1\%$) die OER-Effizienz (Strom $> 350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) verbessert. Darüber hinaus hat die katalytische Aktivität von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) bei der CO_2 -Reduktion (Umwandlungsrate $> 80\% \pm 2\%$) und der Ammoniaksynthese (Ausbeute $> 100 \text{ mg/h} \cdot \text{g} \pm 10 \text{ mg/h} \cdot \text{g}$) aufgrund ihrer mehrphasigen Struktur und hohen Stabilität (Korrosionsbeständigkeit $< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) Aufmerksamkeit erregt und unterstützt das Ziel der Kohlenstoffneutralität (Netto-Null-Emissionen im Jahr 2040 ± 5 Jahre).

Additive Fertigung von Hartmetall

Durch 3D-Drucktechnologien wie SLM und Binder Jetting kann Hartmetall kundenspezifisch mit komplexen geometrischen Formen hergestellt werden (Präzision $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), die in der Luft- und Raumfahrt (Turbinenschaufeln, hohe Temperaturbeständigkeit $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), im Formenbau (verschleißfeste Stanzformen, Lebensdauer $> 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und in Energieanlagen (Hochtemperaturventile, Druck $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) eingesetzt werden, wodurch die Fertigungsflexibilität (Druckgeschwindigkeit $> 100 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$) deutlich verbessert wird. Den Informationen des gesamten Netzwerks zufolge werden DED- und EBM-Technologien für die Reparatur großer Strukturteile (Grenzflächenfestigkeit $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und die Herstellung von Gradientenmaterialien (Co-Gehalt $6\text{--}15\% \pm 1\%$ Gradientenänderung) eingesetzt. Die Zugfestigkeit von WC- TiC- Verbundwerkstoffen in Hochtemperaturumgebungen ($> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) liegt bei $> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$. Die additive Fertigung hat sich zudem auf Mikro- und Nanogeräte (Merkmalgröße $< 10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) und Bioprinting (Gerüstporosität $20\text{--}40\% \pm 1\%$) ausgeweitet und fördert so personalisierte Medizin und Leichtbaukonstruktionen.

Hartmetall für Verteidigungs- und Extremumgebungsanwendungen

Hartmetalle finden zunehmend Anwendung in der Verteidigung und in extremen Umgebungen. WC-Co wird aufgrund seiner hohen Härte (HV 1800 ± 30) und Schlagzähigkeit (Schlagzähigkeit $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) in panzerbrechenden Sprengköpfen (Eindringtiefe $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$) und ballistischen Panzerungen (Schutzstufe NIJ IV $\pm$ 1) eingesetzt. WC- TiC -WN-Verbundwerkstoffe behalten ihre strukturelle Integrität (Restverformung $< 0,1\% \pm 0,01\%$) auch bei hohen Dehnungsraten ($> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$).

In der Tiefseeausrüstung (Druck $> 1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$) und der Weltraumtechnik (Vakuum $< 10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$, Temperatur -150°C bis $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) werden Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC) aufgrund ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) und ihrer Korrosionsbeständigkeit ($< 0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) als Dichtungen und Wärmeschutzbeschichtungen (Hitzebeständigkeit $> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) verwendet. Darüber hinaus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

weist WC ein multifunktionales Potenzial als Abschirmmaterial und Zielmaterial in der Nuklearindustrie (Strahlungstoleranz $> 10^{-6} \text{ Gy} \pm 10^{-5} \text{ Gy}$) und bei Experimenten in der Hochenergiephysik (Teilchenstrahlstabilität $> 99 \% \pm 0,5 \%$) auf.

Intelligente Fertigung und Sensoranwendung von Hartmetall

Hartmetall in Kombination mit intelligenter Fertigungstechnologie hat sich im Bereich Sensoren und Internet der Dinge etabliert. Online-Daten zufolge werden WC-basierte Materialien aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit ($> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) und mechanischen Stabilität (Druckfestigkeit $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) in Drucksensoren (Empfindlichkeit $> 10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), Temperatursensoren (Reaktionszeit $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) und Vibrationsmonitoren (Frequenzbereich $10 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$) eingesetzt. Integrierte Nanobeschichtungen (wie SiO_2 , Dicke $5 - 10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) verbessern die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung (Luftfeuchtigkeit $50 - 95 \% \text{ RH} \pm 5 \% \text{ RH}$). In Industrie 4.0 können WC-basierte intelligente Werkzeuge (Selbstdiagnoselebensdauer $> 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) durch eingebettete Sensoren eine Echtzeitüberwachung (Genauigkeit $\pm 1 \%$) erreichen, den Schneidvorgang optimieren (Werkzeugverschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) und die Parameter für den 3D-Druck anpassen.

In diesem Kapitel werden spezifische Anwendungsfälle, technische Herausforderungen und Zukunftsaussichten in diesen Bereichen behandelt. Dabei wird aufgezeigt, wie Hartmetall durch seine Multifunktionalität immer vielfältigere industrielle Anforderungen erfüllen kann.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.1 Elektronische und leitfähige Komponenten aus Hartmetall

In der Elektronikbranche hat Hartmetall aufgrund seiner hohen Härte ($HV\ 1800\text{--}2200 \pm 30$), seines niedrigen spezifischen Widerstands ($<10\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$), seiner hervorragenden Wärmeleitfähigkeit ($>100\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$) und seiner hervorragenden thermischen Stabilität (Betriebstemperatur bis $800\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$) große Beachtung gefunden. Es wird hauptsächlich in Formen und Wärmeableitungssubstraten verwendet. Formen werden für Chip-Verpackungen, Präzisionsstanzen und die Verarbeitung mikroelektronischer Komponenten verwendet und haben eine Lebensdauer von bis zu $10^6\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$. Wärmeableitungssubstrate unterstützen elektronische Geräte mit hoher Leistung (wie Leistungsmodule, LEDs und Komponenten von 5G-Basisstationen) mit einer Wärmeableitungseffizienz von über $90\ \% \pm 2\ \%$ und einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (etwa $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), wodurch die Dimensionsstabilität während thermischer Zyklen gewährleistet wird. Das Material basiert hauptsächlich auf dem WC-Co-System (der Co-Gehalt von Hartmetall beträgt $6\text{--}12\ \% \pm 1\ \%$), die Korngröße der Hartmetall-Rohmaterialien wird auf $0,5\text{--}2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ kontrolliert und die elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit werden durch Dotierung mit Cu ($1\text{--}5\ \% \pm 0,5\ \%$) oder Ni ($2\text{--}8\ \% \pm 0,5\ \%$) optimiert. Einige High-End-Formeln fügen Pt ($0,5\text{--}2\ \% \pm 0,1\ \%$) hinzu, um die katalytischen und leitfähigen Eigenschaften zu verbessern. Der hohe Schmelzpunkt von Hartmetall (ca. $2870\ ^\circ\text{C} \pm 20\ ^\circ\text{C}$) verleiht ihm eine hervorragende Haltbarkeit in extremen Umgebungen, und seine Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsbeständigkeitsindex $>90\ \% \pm 2\ \%$ kann durch PVD-Beschichtung erreicht werden) erweitert sein Anwendungsspektrum zusätzlich. Im Jahr 2025, mit der Entwicklung der Elektronikindustrie hin zu Hochfrequenz, hoher Leistung und Miniaturisierung, wird die Nachfrage nach Hartmetall in der Halbleiterfertigung, im Energiemanagement von Elektrofahrzeugen und in intelligenten Geräten weiter steigen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

In der Elektronikindustrie wird Hartmetall aufgrund seiner hervorragenden Härte ($HV\ 1600\text{--}2000 \pm 30$), Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), hohen Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitfähigkeit $> 100\ \text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) und hohen Temperaturbeständigkeit (Temperaturbeständigkeit $> 800\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$) häufig zur Herstellung von Formen und Wärmeableitungssubstraten verwendet. Diese Eigenschaften ermöglichen eine gute Leistung bei der Präzisionsbearbeitung und effizienten Wärmeableitung, insbesondere in den Bereichen Halbleiter, 5G-Technologie und Elektrofahrzeuge. Mit der steigenden Nachfrage nach Miniaturisierung und hochdichter Integration elektronischer Geräte erweitern sich die Anwendungsaussichten von Hartmetall in der Elektronikindustrie weiter.

14.1.1 Hartmetallformen für die Elektronikindustrie

Hartmetallformen für die Elektronikindustrie werden zur Präzisionsbearbeitung elektronischer Bauteile eingesetzt. Sie müssen eine hohe Präzision (Bearbeitungsabweichung $< 0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$), eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01\ \text{mm}/\text{Jahr} \pm 0,001\ \text{mm}/\text{Jahr}$) und eine lange Lebensdauer ($> 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) aufweisen, um den hohen Anforderungen der Mikroelektronikfertigung gerecht zu werden. Das Material besteht hauptsächlich aus WC-Co-Systemen (Co-Gehalt $6\text{--}10\ \% \pm 1\ \%$). Die Korngröße der Hartmetall-Rohstoffe liegt bei $0,5\text{--}1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$. Zur weiteren Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit werden Oberflächenbeschichtungen (z. B. TiN, Dicke $5\text{--}15\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$) oder CrN (Dicke $10\text{--}20\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$) eingesetzt. Die Form wird durch heißisostatisches Pressen (HIP, $1200\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, $150\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$) oder Laser-Oberflächenbehandlung optimiert.

In der Elektronikindustrie sind Hartmetallformen aufgrund ihrer hervorragenden Härte ($HV\ 1600\text{--}2000 \pm 30$), Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), hohen Hitzebeständigkeit (Temperaturbeständigkeit $> 800\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$), hervorragenden Präzision und hervorragenden Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu einem unverzichtbaren Kernwerkzeug im Herstellungsprozess elektronischer Komponenten geworden. Mit der rasanten Entwicklung der Elektronikindustrie in Richtung Ultraminiaturisierung, Hochleistung, Intelligenz, Umweltfreundlichkeit und Multifunktionalität haben sich die Anwendungsszenarien für Hartmetallformen erheblich erweitert und die Marktnachfrage steigt weiterhin stark an. Diese Formen wurden durch kontinuierliche Technologieiteration, Optimierung der Materialzusammensetzung und Innovation fortschrittlicher Herstellungsverfahren (wie additive Fertigung, präzise Oberflächenbehandlung und intelligente Überwachungstechnologie) schnell aktualisiert und sind zu einem der wichtigsten und am schnellsten wachsenden High-End-Verbraucherbereiche in der Hartmetallindustrie geworden. Hartmetallformen finden breite Anwendung in der Halbleiterfertigung, flexibler Elektronik, 5G/6G-Kommunikation, Unterhaltungselektronik, Automobilelektronik mit neuen Energien, IoT-Geräten und aufstrebenden Bereichen wie Quantencomputern und intelligenten medizinischen Geräten. Das Marktvolumen wird voraussichtlich 5 bis 500 Millionen US-Dollar erreichen, mit einer jährlichen Wachstumsrate von bis zu 15 bis 20 Prozent. Dies unterstreicht die Schlüsselrolle von Hartmetall bei der Förderung des technologischen Fortschritts und der industriellen Modernisierung in der Elektronikindustrie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Hartmetall-Stanzform für Leadframes

Was ist eine Hartmetall-Stanzform für Leadframes?

Hartmetall-Stanzformen für Leadframes sind hochpräzise Bearbeitungswerkzeuge, die speziell für den Halbleiter-Verpackungsbereich entwickelt wurden. Sie werden hauptsächlich für die Herstellung von IC-Pins, LED-Halterungen, Leistungsmodul-Anschlussleitungen und neuen Mikrosensor-Anschlussleitungen eingesetzt. Das Kernmaterial besteht aus WC-8Co, die Korngröße liegt präzise bei $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Die Herstellung erfolgt mittels Pulvermetallurgie und heißisostatischem Pressen (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), um Materialgleichmäßigkeit und hohe Dichte (Porosität $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) zu gewährleisten. Die TiN-Beschichtung (Dicke $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) wird durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) auf die Formoberfläche aufgetragen, wodurch der Reibungskoeffizient deutlich reduziert ($< 0,2 \pm 0,02$), die Oxidationsbeständigkeit verbessert (Dauertemperatur bis zu $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und die Haftung verringert wird, wodurch die Haltbarkeit (bis zu $1,2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und die Stanzgenauigkeit ($< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) effektiv verbessert werden. Durch die Kombination von Laser-Mikrobearbeitung, Mehrschichtbeschichtung (wie TiAlN oder TiSiN, Dicke $10\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) und adaptiver Kühltechnologie wird die Form weiter optimiert, um ultrafeine Leitungen (Breite $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), Hochfrequenzstabilität ($> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$) und Temperaturwechselbeständigkeit (-40°C bis $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) zu unterstützen. Durch die digitale Zwillings-Technologie werden eine Echtzeit-Verschleißüberwachung (Genauigkeit $\pm 1 \%$) und Parameteroptimierung erreicht, um den Anforderungen der Ultrapräzision und der Produktion im ultragroßen Maßstab gerecht zu werden.

Leistung der Stanzform für Hartmetall-Leadframes

Die Form weist eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$), eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), eine hohe Haltbarkeit ($> 1,2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und eine extrem hohe Stanzgenauigkeit ($< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) auf. Die TiN-Beschichtung reduziert die Reibung deutlich ($< 0,2 \pm 0,02$), verbessert die Oxidationsbeständigkeit (beständig bis $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und verbessert die Wärmezyklusstabilität (-40°C bis $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) durch Mehrschichtbeschichtung (z. B. TiAlN, hitzebeständig $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und adaptive Kühltechnologie. Darüber hinaus ermöglicht die Integration digitaler Zwillinge die Verschleißvorhersage (Fehler $< 5 \% \pm 0,5 \%$) und Prozessoptimierung.

Arten von Hartmetall-Stanzformen für Leadframes

Standardform

Basierend auf WC-8Co eignet es sich für die herkömmliche IC-Pin- und LED-Halterungsverarbeitung mit einer Genauigkeit von $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ und einer Haltbarkeit von $1 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturform

Durch Hinzufügen von TiC ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$) und TiAlN-Beschichtung ($10 - 15\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$) ist eine Hitzebeständigkeit von $> 800\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$ möglich, die für Leistungsmodule wie IGBT-Verpackungen geeignet ist.

Ultrafeine Form

Optimierte Korngröße ($< 0,5\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$) und Laser-Mikrobearbeitung unterstützen eine Anschlussbreite von $< 0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ und erfüllen damit die Anforderungen des 5-nm-/3-nm-Prozesses und der Mikro-LED.

Intelligente Form

Eingebettete Sensoren und digitale Zwillingsmodule überwachen den Verschleiß (Genauigkeit $\pm 1\%$) und passen die Parameter für Hochfrequenzanwendungen ($> 10\ \text{GHz} \pm 1\ \text{GHz}$) in Echtzeit an.

Anwendung von Hartmetall-Stanzformen für Leadframes

Hartmetall-Stanzformen für Leadframes finden breite Anwendung in zahlreichen Hightech-Bereichen und spielen insbesondere in der Halbleiter- und Elektronikindustrie eine Schlüsselrolle. Bei der Produktion hochdichter integrierter Schaltungen, beispielsweise bei der Herstellung von 5-nm- und 3-nm-Prozesschips, gewährleisten die Matrizen die höchste Präzision und Konsistenz der Leadframes und unterstützen so die Massenproduktion von High-End-Prozessoren und -Speichern. Im Bereich der Verpackung von Leistungshalbleitern werden die Matrizen zur Herstellung von IGBT-Modulen, MOSFETs sowie SiC- und GaN-Leistungsbauelementen eingesetzt, um die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen von Elektrofahrzeugen, Photovoltaik-Wechselrichtern und industriellen Motorantrieben zu erfüllen. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Verpackung von Mikro-LEDs. Die hochpräzise Stanztechnologie der Matrizen unterstützt die Herstellung optischer Komponenten für Mikrodisplays und tragbare Geräte und verbessert so die Displayhelligkeit und -auflösung.

Darüber hinaus werden Formen häufig bei der Herstellung neuer Mikrosensoren verwendet, darunter MEMS-Sensoren (mikroelektromechanische Systeme), Drucksensoren und Trägheitsmesseinheiten (IMUs), und bilden eine wichtige Grundlage für intelligente Geräte, IoT-Knoten und Medizinelektronik. Im Bereich der Automobilelektronik, insbesondere bei der Verpackung von Chips für autonomes Fahren, Radarmodulen und Bordcomputern, gewährleisten die Matrizen die Temperaturwechselbeständigkeit ($-40\ ^\circ\text{C}$ bis $150\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) und die Hochfrequenzstabilität ($> 10\ \text{GHz} \pm 1\ \text{GHz}$) der Form die langfristige Stabilität und Sicherheit elektronischer Systeme. Auch Hochleistungscomputerchips und Quantencomputergeräte sind auf die ultrafeine Leitungsverarbeitungsfähigkeit der Form (Breite $< 0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$) angewiesen, was die Entwicklung von Beschleunigern für künstliche Intelligenz und Quantenbit-Steuerschaltungen fördert.

Im Bereich der Unterhaltungselektronik unterstützen Formen die Verarbeitung mehrschichtiger Leadframes für Smartphones, Tablets und Spielkonsolen und verbessern so die Produktdünne und -leistung. In der industriellen Automatisierung werden Formen mit intelligenter

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fertigungstechnologie kombiniert, um die Massenproduktion von Präzisionsmechanikteilen und Steckverbindern zu ermöglichen und so die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung um $>20\% \pm 2\%$). Durch die digitale Zwillingstechnologie ermöglichen Formen eine vorausschauende Wartung und Optimierung der Prozessparameter, reduzieren Ausfallzeiten (Reduzierung um $>15\% \pm 2\%$) und eignen sich für die extremen Umgebungsanforderungen der Luft- und Raumfahrtelctronik (z. B. Satellitenkommunikationsmodule) und der Verteidigungselctronik (z. B. Radar- und Raketenleitsysteme), was ihr Anwendungsspektrum weiter erweitert.

(2) Hartmetall-Chip-Verpackungsform

Was ist eine Hartmetall-Chip- Verpackungsform?

Hartmetall-Chip-Verpackungsformen sind hochpräzise Verarbeitungswerkzeuge, die speziell für die Verpackung mikroelektronischer Geräte entwickelt wurden und hauptsächlich für BGA (Ball Grid Array), QFN (Quad Flat No-Lead Package), SIP (System-in-Package), 3D-IC-Stacking und Wafer-Level-Packaging (WLP) verwendet werden. Das Kernmaterial besteht aus WC-6Co mit einer Korngröße von $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Durch Feinmahlen und Sintern von Pulver in Kugelmöhlen wird eine hohe Dichte (Porosität $< 0,5\% \pm 0,1\%$) erreicht. Die Formen werden mit komplexen geometrischen Designs kombiniert (z. B. Mikrokanalbreite $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, Tiefe $0,1\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$, Seitenwandneigung $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$). Eine CrN-Beschichtung (Dicke $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, unter Verwendung von Multi-Arc-Ionenplattierungstechnologie) wird auf die Formoberfläche aufgetragen, um die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) und Hochtemperaturbeständigkeit ($> 350\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) deutlich zu verbessern und so die Lebensdauer effektiv zu verlängern (ungefähr $8 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$). Komplexe Strukturen (wie interne Kühlkanäle) werden durch die Kombination von PVD-Beschichtungen (wie AlTiN oder ZrN, mit einer Dicke von $15\text{--}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) und additiver Fertigungstechnologie (wie selektives Laserschmelzen SLM) angepasst. Die Form wird außerdem optimiert, um eine hohe Packungsdichte ($> 1000\text{ I/O} \pm 50\text{ I/O}$), thermische Zyklenbelastung ($> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) und Verpackungsprozesse mit geringer Belastung zu unterstützen. Die Echtzeitüberwachung der Spannungsverteilung und der Temperaturänderungen (Genauigkeit $\pm 1\%$) wird durch integrierte Sensortechnologie erreicht, die die Wärmemanagementfunktionen (Wärmeleitfähigkeit $> 120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) und die Verpackungsausbeute ($> 98\% \pm 1\%$) verbessert, um den Anforderungen an Miniaturisierung und hohe Zuverlässigkeit gerecht zu werden.

Leistung von Hartmetallchip-Verpackungsformen

Die Form weist eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$), hervorragende Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), hohe Haltbarkeit ($> 8 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und extrem hohe geometrische Genauigkeit (Mikrokanalbreite $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, Seitenwandvertikalheit $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$) auf. Eine CrN-Beschichtung verringert die Korrosionsrate erheblich ($< 0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) und verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit ($> 350\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), während eine AlTiN- oder ZrN-Mehrschichtbeschichtung die Temperaturwechselbeständigkeit weiter verbessert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Beständigkeit bis $> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$, Hitzebeständigkeit $> 600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Der additive Herstellungsprozess optimiert interne Kühlkanäle und verbessert das Wärmemanagement (Wärmeleitfähigkeit $> 120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), und die Sensorintegration ermöglicht eine Spannungsüberwachung (Fehler $< 5\% \pm 0,5\%$) und Prozessoptimierung.

Arten von Hartmetall-Chip-Verpackungsformen

Standardform

Basierend auf WC-6Co und CrN-Beschichtung ist es für herkömmliche BGA- und QFN-Pakete geeignet, mit einer Genauigkeit von $0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ und einer Haltbarkeit von $8 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

Hochtemperaturform

Hinzufügen von TiC ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$) und AlTiN-Beschichtung ($15 - 20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$), Hitzebeständigkeit $> 600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, geeignet für SIP- und 3D-IC-Stapelung.

Miniaturisierte Form

Optimierte Körner ($< 0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und SLM-Technologie zur Unterstützung von Mikrokanälen (Breite $< 0,02\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), um die Anforderungen von WLP- und neuromorphen Chips zu erfüllen.

Intelligente Form

Eingebettete Sensoren und Echtzeit-Überwachungsmodule optimieren die Spannungsverteilung (Genauigkeit $\pm 1\%$) und das Wärmemanagement für Verpackungen mit hoher Dichte ($> 1000\text{ I/O} \pm 50\text{ I/O}$).

Anwendung einer Hartmetall-Chip-Verpackungsform

Hartmetall-Chip-Verpackungsformen finden breite Anwendung in vielen hochmodernen Bereichen der Mikroelektronik-Verpackung. Bei der Verpackung hochdichter integrierter Schaltkreise unterstützt die Form BGA-, QFN- und WLP-Technologien und erfüllt die hohen Präzisionsanforderungen von 5-nm-Prozesschips und darunter, Beschleunigern für künstliche Intelligenz und Speichern (Präzision $< 0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$). Beim 3D-IC-Stacking und SIP (System-Level-Packaging) fördern das komplexe geometrische Design und die Wärmemanagementfähigkeiten der Form (Wärmeleitfähigkeit $> 120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) die Entwicklung von Multi-Chip-Modulen und heterogener Integration und finden breite Anwendung in Edge-Computing-Modulen, Hochleistungsservern und Rechenzentrumshardware.

Im Bereich der Unterhaltungselektronik werden Formen für die miniaturisierte Verpackung von Mobiltelefonen mit faltbarem Bildschirm und tragbaren Geräten (wie Smartwatches) verwendet. Sie gewährleisten die Mikrokanalgenauigkeit (Breite $0,02 - 0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) und die Beständigkeit gegen Hitzezyklen ($> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$), wodurch die Zuverlässigkeit und Lebensdauer flexibler Displays und tragbarer Geräte verbessert wird. Auch die Verpackung neuromorpher Chips und Quantencomputergeräte basiert auf der ultrapräzisen und spannungsarmen Herstellung von Formen, um das miniaturisierte Design neuer Computerarchitekturen zu unterstützen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich ist die Automobilelektronik. Formen unterstützen die Verpackung von Chips für Fahrerassistenzsysteme (ADAS), Radarmodulen und Bordcomputern und sind an extreme Temperaturbereiche ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und hohe Zuverlässigkeitsanforderungen (Ausbeute $> 98\% \pm 1\%$) angepasst. In der industriellen Automatisierung werden Formen für die Verpackung von Präzisionssensoren und -aktoren eingesetzt, um die Leistung und Stabilität intelligenter Fertigungsanlagen zu verbessern. Luft- und Raumfahrtelctronik (z. B. Satellitenkommunikationsmodule) und Verteidigungselektronik (z. B. Radar- und Raketenleitsysteme) nutzen die Korrosionsbeständigkeit ($< 0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) und die hohe Temperaturstabilität ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) der Formen, um den Anforderungen des Langzeiteinsatzes in extremen Umgebungen gerecht zu werden.

Durch Sensorintegration und digitale Zwillingstechnologie ermöglicht die Form eine vorausschauende Wartung (Reduzierung der Ausfallzeiten um $>15\% \pm 2\%$) und eine Optimierung der Prozessparameter. Dadurch ist sie für die Massenproduktion (Effizienzsteigerung um $>20\% \pm 2\%$) und Szenarien mit ultrahoher Packungsdichte ($>1000\text{ I/O} \pm 50\text{ I/O}$) geeignet und erweitert ihr Anwendungspotenzial in der zukünftigen Mikroelektroniktechnologie weiter.

(3) Hartmetall- Leiterplatten-Stanzform

Was ist eine Hartmetall-Stanzform für Leiterplatten ?

Hartmetall-Stanzformen für Leiterplatten sind hochpräzise Verarbeitungswerkzeuge, die speziell für die Leiterplattenverarbeitung entwickelt wurden. Sie werden hauptsächlich für Mehrschichtplatten, HDI-Platinen (High Density Interconnect), flexible Leiterplatten (FPC), Starrflex-Platinen und neue Hochfrequenz-Millimeterwellen-Leiterplatten verwendet. Das Kernmaterial besteht aus WC-TiC-8Co ($\text{TiC } 3\% \pm 0,5\%$) mit einer Korngröße von $0,8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Es wird bei hohen Temperaturen ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) gesintert und wärmebehandelt, um die Ermüdungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern (Ermüdungslebensdauer $> 10^7\text{-fach} \pm 10^5\text{-fach}$). Durch Laserbeschichtungstechnologie (Schichtdicke der Beschichtung $20\text{--}30\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, unter Verwendung von WC-Co-Pulver) werden verschlissene Kanten repariert, wobei die Stanzgenauigkeit $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ bleibt. Die Form unterstützt Hochgeschwindigkeitsstanzen ($> 100\text{ Mal/Sekunde} \pm 10\text{ Mal/Sekunde}$), komplexe Zwischenschichtausrichtungen (Abweichungen $< 0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) und Mikrolochverarbeitung (Durchmesser $0,1\text{ - }0,2\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$) und optimiert Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^7\text{ Mal} \pm 10^5\text{ Mal}$) und Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) durch Verbundstrukturen aus mehreren Materialien (wie WC- TiC-TaC oder WC-Co-Cr). Darüber hinaus verfügt die Form über eine Nanobeschichtung (z. B. WC/C, Dicke $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), um die Antihafwirkung zu verbessern (Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,02$), und eine bionische Struktur (z. B. eine wabenförmige Innenstütze) zur Verbesserung der Schlagfestigkeit ($> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), optimiert den Stanzpfad durch einen KI-Algorithmus, reduziert den Materialabfall ($< 2\% \pm 0,5\%$) und erfüllt die Anforderungen der Hochleistungs-Leiterplattenverarbeitung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistung von Hartmetall-Leiterplatten-Stanzwerkzeugen

Die Form weist eine hohe Härte ($HV 1800 \pm 30$), eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), eine hohe Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^7\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$) und ein hochpräzises Stanzen ($< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) auf. Die Laserauftragsschweißtechnologie repariert abgenutzte Kanten und erhält die Genauigkeit der Mikrolochverarbeitung (Durchmesser $0,1\text{--}0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), während Nanobeschichtungen (wie WC/C) den Reibungskoeffizienten senken ($< 0,2 \pm 0,02$) und die Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen ($> 900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) verbessern. Die Verbundstruktur aus mehreren Materialien optimiert die Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), die bionische Struktur verbessert die Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und die Optimierung durch den KI-Algorithmus reduziert den Materialabfall ($< 2 \% \pm 0,5 \%$), was die Ermüdungsbeständigkeit bei hohen Temperaturen insgesamt verbessert (Ermüdungslebensdauer $> 10^7\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$).

Arten von Hartmetall-Stanzformen für Leiterplatten

Standardform

Basierend auf WC-TiC-8Co eignet es sich zum Stanzen von Mehrschichtplatinen und FPCs mit einer Genauigkeit von $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ und einer Haltbarkeit von $1 \times 10^7\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$.

Hochtemperaturform

Durch die Zugabe von TaC ($2 \% - 5 \% \pm 0,5 \%$) und einer WC-Co-Cr-Verbundstruktur weist es eine Hitzebeständigkeit von $> 900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ auf und ist für Hochfrequenz-Millimeterwellen-Leiterplatten geeignet.

Mikrolochform

Optimieren Sie das Laserauftragsschweißen (Dicke $20\text{--}30 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) und die Mikrolochverarbeitung (Durchmesser $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), um die Anforderungen von HDI-Platinen zu erfüllen.

Intelligente Form

Ausgestattet mit KI-Algorithmen und bionischen Strukturen (Wabenunterstützung) optimiert es den Stanzpfad (Genauigkeit $\pm 0,5 \%$) und die Schlagfestigkeit ($> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) in Echtzeit.

Anwendung von Hartmetall-Leiterplatten-Stanzwerkzeugen

Hartmetall-Stanzformen für Leiterplatten finden in vielen wichtigen Bereichen der Leiterplattenverarbeitung breite Anwendung. Bei der Herstellung von Mehrschichtplatinen und HDI-Platinen (High Density Interconnect) unterstützen die hochpräzise Stanzung ($< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und die komplexe Zwischenschichtausrichtung (Abweichung $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) der Matrizen die Anforderungen an die hochdichte Verdrahtung von Smartphones, Tablets und Server-Motherboards. Bei der Verarbeitung von flexiblen Leiterplatten (FPCs) und starrflexiblen Leiterplatten erfüllen die hohe Temperaturbeständigkeit ($> 900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) und Ermüdungsfestigkeit ($> 10^7\text{-mal} \pm 10^5\text{-mal}$) der Matrizen die Miniaturisierungsanforderungen von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Faltdisplay-Smartphones, tragbaren Geräten und flexiblen Displays.

Die Produktion neuer Hochfrequenz-Millimeterwellen-Leiterplatten basiert auf der Leitfähigkeit der Form (spezifischer Widerstand $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und den Möglichkeiten zur Mikrolochverarbeitung (Durchmesser $0,1-0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$) und wird häufig in 5G-Basisstationen, Antennenmodulen und Radarsystemen eingesetzt. Im Bereich der Automobilelektronik unterstützen Formen die Massenproduktion von Leiterplatten für Batteriemanagementsysteme (BMS), Bordunterhaltungssysteme und Fahrerassistenzsysteme (ADAS) und passen sich an Hochtemperaturumgebungen ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und hohe Zuverlässigkeitsanforderungen (Ausbeute $>98 \% \pm 1 \%$) an. Bei der Produktion von Steuerplatinen für intelligente Haushaltsgeräte werden das Hochgeschwindigkeitsstanzen der Form ($>100 \text{ Mal/Sekunde} \pm 10 \text{ Mal/Sekunde}$) und die Materialeinsparungen (Abfall $<2 \% \pm 0,5 \%$) genutzt, um die Produktionseffizienz von Haushaltsgeräten wie intelligenten Lautsprechern und Waschmaschinen zu verbessern.

Avionik-Leiterplatten (wie Flugsteuerungsmodule und Navigationssysteme) und Verteidigungselektronik (wie Raketenleit- und Kommunikationsausrüstung) sind auf die Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^7 \pm 10^5$) von Formen angewiesen, um dem langfristigen Einsatz in extremen Umgebungen standzuhalten. Die Entwicklung von IoT-Geräten und 6G-Technologie fördert den Einsatz von Formen weiter, insbesondere bei der Verpackung von Edge-Computing-Modulen und Ultrahochfrequenz-Leiterplatten. Die Formen gewährleisten durch KI-Optimierung und Nanobeschichtung (WC/C) hohe Leistung und niedrige Wartungskosten (Reduzierung von Ausfallzeiten $> 15 \% \pm 2 \%$) und unterstützen so die intelligente und effiziente Entwicklung der zukünftigen Elektronikindustrie.

(4) Hartmetall-Mikrostecker-Stanzform

Was ist ein Hartmetall-Stanzwerkzeug für Mikroverbinder ?

Die Hartmetall-Mikrostecker-Stanzform ist ein hochpräzises Werkzeug für die Verarbeitung von Mikrosteckern. Sie wird hauptsächlich für Mikrostecker wie USB-C, HDMI, Lightning und neue Hochgeschwindigkeitsschnittstellen (wie Thunderbolt 5, optoelektronische Hybridschnittstelle) verwendet. Das Kernmaterial besteht aus WC-10Co mit einer Korngröße von $0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Die Ultrafeinpulver-Spritzgusstechnologie gewährleistet Materialgleichmäßigkeit, Stanzgenauigkeit $<0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ und eine Haltbarkeit von $1,5 \times 10^6 \pm 10^4$. Die DLC-Beschichtung (diamantähnlicher Kohlenstoff) (Dicke $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte HV 3000 ± 100) wird durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) auf die Formoberfläche aufgebracht, wodurch die Verschleißrate deutlich reduziert ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühtest $> 500 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$) und die Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,1 \pm 0,01$) verbessert wird. In Kombination mit einer Nanobeschichtung (wie WC/C oder aC:H, Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) und Mikro-EDM-Technologie unterstützt die Form ultrafeine Strukturen (Abstand $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), hohe Strombelastbarkeit ($> 5 \text{ A} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 A) und Stabilität bei der optischen Signalübertragung (Verlust $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$) und verlängert die Lebensdauer und reduziert die Wartungskosten ($< 5 \% \pm 1 \%$) durch selbstschmierende Funktionen (wie MoS₂-Zusätze) und erfüllt so die Anforderungen der Verarbeitung von Hochleistungssteckverbindern.

Leistung von Hartmetall-Mikrostecker-Stanzwerkzeugen

Die Form weist eine hohe Härte ($\text{HV } 2000 \pm 50$), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), hohe Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und ultrahohe Stanzgenauigkeit ($< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$) auf. Eine DLC-Beschichtung verbessert die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühbeständigkeit $> 500 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$) und Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,1 \pm 0,01$), und eine Nanobeschichtung (wie WC/C) verbessert die Haltbarkeit ($> 2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und Hochtemperaturbeständigkeit ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) zusätzlich. Die Selbstschmierfunktion optimiert die Wartungskosten ($< 5 \% \pm 1 \%$) und Mikro-EDM unterstützt ultrafeine Strukturen (Abstand $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und erfüllt so die Anforderungen an hohe Ströme ($> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) und optische Signalübertragung (Verlust $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$).

Arten von Hartmetall-Stanzwerkzeugen für Mikroverbinder

Standardform

Basierend auf WC-10Co und DLC-Beschichtung, geeignet für USB-C- und HDMI-Stempeln, Genauigkeit $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$, Haltbarkeit $1,5 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

Hochgeschwindigkeitsform

- Nanobeschichtung ($5\text{--}15 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$) hinzugefügt, unterstützt Thunderbolt 5-Hochstrom ($> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) und Haltbarkeit $> 2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

Photoelektrische Form

Optimieren Sie Mikro-EDM, um die optische Signalstabilität der optoelektronischen Hybridschnittstelle (Verlust $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$) und die Genauigkeit $< 0,002 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$ zu erreichen.

Selbstschmierende Form

Eingebettet in MoS₂-Additive und Sensoren reduziert es die Wartungskosten ($< 5 \% \pm 1 \%$) und ist für den Hochfrequenzeinsatz geeignet ($> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$).

Anwendung von Hartmetall-Stanzwerkzeugen für Mikroverbinder

Hartmetall-Stanzwerkzeuge für Mikrostecker finden breite Anwendung in der Unterhaltungselektronik und in Rechenzentren. In Smartphones, Tablets und Laptops unterstützen die Werkzeuge die Massenproduktion von USB-C-, HDMI- und Lightning-Schnittstellen. Sie gewährleisten ultrafeine Strukturen (Raster $< 0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und hochpräzises Stanzen ($< 0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$) und verbessern so die Zuverlässigkeit und Kompaktheit der Geräteanschlüsse. In Rechenzentren und Servern werden die Werkzeuge bei der Herstellung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Thunderbolt 5 und Hochgeschwindigkeits-Datenschnittstellen eingesetzt, um die Anforderungen an hohe Strombelastbarkeit ($> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) und Datenübertragungsraten ($> 40 \text{ Gbit/s} \pm 2 \text{ Gbit/s}$) zu erfüllen.

Die Entwicklung neuer optoelektronischer Hybridschnittstellen basiert auf der Stabilität der optischen Signalübertragung (Verlust $< 0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$) und Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^6 \text{ mal} \pm 10^4 \text{ mal}$) der Form, die häufig in Glasfaser-Kommunikationsgeräten und Hochleistungsrechnerclustern eingesetzt wird. In der Automobilelektronik unterstützt die Form die Verarbeitung von Steckverbindern für Fahrzeug-Infotainmentsysteme und fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (ADAS) und passt sich an Hochtemperaturumgebungen ($> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und hohe Zuverlässigkeitsanforderungen (Ausbeute $> 98 \% \pm 1 \%$) an. Auch Smart-Home-Geräte wie Smart-Lautsprecher und Router nutzen das Hochgeschwindigkeitsstanzen ($> 100 \text{ Mal/Sekunde} \pm 10 \text{ Mal/Sekunde}$) und die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühbeständigkeit $> 500 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$) der Form, um die Produkthaltbarkeit zu verbessern.

Industrielle Automatisierung und IoT-Geräte (wie industrielle Steuermodule und Sensorknoten) sind auf die Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,1 \pm 0,01$) und Selbstschmierfunktion der Form angewiesen, um die Wartungskosten zu senken ($< 5 \% \pm 1 \%$) und die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung $> 20 \% \pm 2 \%$). Luft- und Raumfahrtelctronik (wie Satellitenkommunikationsmodule) und Verteidigungselektronik (wie verschlüsselte Kommunikationsgeräte) nutzen die Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und Haltbarkeit der Form, um den Anforderungen des Langzeiteinsatzes in extremen Umgebungen gerecht zu werden. Durch Nanobeschichtung und KI-Optimierung unterstützt die Form zudem die Entwicklung zukünftiger Hochgeschwindigkeitsschnittstellen (wie 6G-Kommunikation) und miniaturisierter Steckverbinder und fördert so die Effizienz und Intelligenz der Elektronikindustrie.

(5) Hartmetall-Sensor-Verpackungsform

Was ist eine Hartmetall-Sensorverpackungsform ?

Hartmetall-Sensorgehäuseformen sind hochpräzise Werkzeuge, die speziell für den Sensorgehäusebereich entwickelt wurden und hauptsächlich für MEMS (mikroelektromechanische Systeme), Umweltsensoren (wie Druck-, Temperatur-, Gassensoren) und medizinische Sensoren (wie Blutsauerstoff-, EKG-Sensoren) verwendet werden. Das Kernmaterial verwendet die WC-Co-Ni-Formel ($\text{Ni } 2 \% \pm 0,5 \%$), die Korngröße $0,7 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ und wird durch heißisostatisches Pressen (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) hergestellt, um die Dichte zu verbessern (Porosität $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), komplexe 3D-Strukturen zu unterstützen (Höhe $0,05\text{--}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, Seitenwandrauheit $\text{Ra} < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) und eine Lebensdauer von etwa $7 \times 10^5\text{--}10^4\text{-mal}$. Eine ALD-Beschichtung (Atomlagenabscheidung) (wie etwa Al_2O_3 , Dicke $10\text{--}20 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) wird auf die Formoberfläche aufgetragen, um die Feuchtigkeitsbeständigkeit (Feuchtigkeitsbeständigkeit $> 95 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) und die antibakterielle Leistung (antibakterielle Rate $> 99 \% \pm 0,5 \%$) zu verbessern, und Mikrokühlkanäle (Durchmesser $0,01\text{--}0,02 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) werden verwendet, um den Hochtemperaturverpackungsprozess ($> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) zu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimieren. Eingebettete Sensoren überwachen die Verpackungsspannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), um die Anforderungen an Miniaturisierung (Größe $< 1 \text{ mm}^3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$), hohe Präzision (Abweichung $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$) und Biokompatibilität (gemäß ISO 10993-Standard) zu erfüllen.

Leistung der Hartmetallsensor-Verpackungsform

Die Form weist eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$), eine ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), eine hohe Haltbarkeit ($> 7 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und eine hochpräzise Verpackung (Abweichung $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$) auf. Die Al_2O_3 -Beschichtung verbessert die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 95 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) und die antibakterielle Leistung (antibakterielle Rate $> 99 \% \pm 0,5 \%$). Mikrokühlkanäle optimieren das Wärmemanagement (Temperaturregelung $< 200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), eingebettete Sensoren überwachen die Spannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und unterstützen komplexe 3D-Strukturen (Höhe $0,05\text{--}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, Seitenwandrauheit $R_a < 0,2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$), wodurch die Anforderungen an Biokompatibilität und Hochtemperaturverpackung erfüllt werden.

Arten von Hartmetall-Sensorverpackungsformen

Standardform

Basierend auf einer WC-Co-Ni- und Al_2O_3 -Beschichtung, geeignet für MEMS und Umweltsensoren, mit einer Genauigkeit von $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$ und einer Haltbarkeit von $7 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

Hochtemperaturform

Durch die Zugabe von TiC ($5 \% \text{--} 10 \% \pm 0,5 \%$) wird eine Hochtemperaturverpackung ($> 200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) unterstützt, die für industrielle IoT-Sensoren geeignet ist.

Medizinischer Schimmel

Optimierte Biokompatibilität (ISO 10993), Mikrokühlkanäle (Durchmesser $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) für Blutsauerstoff- und EKG-Sensoren.

Intelligente Form

Eingebetteter Spannungssensor zur Echtzeitüberwachung (Genauigkeit $\pm 1 \%$), geeignet für die Verpackung hochpräziser tragbarer Geräte.

Anwendung einer Hartmetall-Sensorverpackungsform

Hartmetall-Sensorverpackungsformen finden breite Anwendung im Smart Home, im industriellen Internet der Dinge und in der Medizinelektronik. Im Smart Home unterstützen Formen die Verpackung von intelligenten Thermostaten, Luftqualitätssensoren und intelligenten Lichtsteuerungen und gewährleisten Miniaturisierung (Größe $< 1 \text{ mm}^3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$) und hohe Präzision (Abweichung $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$), wodurch die Reaktionsfähigkeit der Geräte verbessert und Energie gespart wird. Im industriellen Internet der Dinge werden Formen für die Verpackung von Druck-, Temperatur- und Vibrationssensoren in intelligenten Fabriken verwendet. Sie passen sich an Hochtemperaturumgebungen ($> 200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und komplexe 3D-Strukturen (Höhe $0,05\text{--}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$) an und unterstützen die Automatisierung und vorausschauende

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wartung von Industrie 4.0 (Reduzierung von Ausfallzeiten um $>15\% \pm 2\%$).

Die Medizinelektronik ist ein wichtiges Anwendungsgebiet. Die Form unterstützt die Verpackung von Blutsauerstoffsensoren, EKG-Sensoren (Elektrokardiogramm) und Insulinpumpen. Dank ihrer Biokompatibilität (gemäß ISO 10993) und antibakteriellen Eigenschaften (Antibakterielle Rate $> 99\% \pm 0,5\%$) erfüllt sie die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen tragbarer Herzmonitore und implantierbarer medizinischer Geräte (Ausbeute $> 98\% \pm 1\%$). In der Unterhaltungselektronik werden Formen für die Verpackung von Umweltsensoren in Smartwatches und Fitness-Trackern eingesetzt, um die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) und Haltbarkeit ($> 7 \times 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) zu verbessern.

Im Bereich der Automobilelektronik unterstützen Formen die Verpackung von Bordsensoren (wie Reifendrucküberwachungs- und Kollisionserkennungssensoren), um sie an extreme Temperaturbereiche ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und hohe Präzisionsanforderungen (Abweichung $<0,001\text{ mm} \pm 0,0002\text{ mm}$) anzupassen. Luft- und Raumfahrtelctronik (wie Flugdatenschreiber) und Verteidigungselektronik (wie Sensoren zur Erkennung chemischer Kampfstoffe) nutzen die Korrosionsbeständigkeit und Haltbarkeit von Formen, um dem Langzeiteinsatz in extremen Umgebungen gerecht zu werden. In IoT- und Edge-Computing-Geräten optimieren Formen die Sensorleistung durch Mikrokühlkanäle und Spannungsüberwachung ($<10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) und unterstützen so die effiziente und intelligente Entwicklung zukünftiger Sensornetzwerke.

(6) Hartmetall-Laserbohrform

Was ist ein Hartmetall-Laserbohrwerkzeug ?

Die Hartmetall-Laserbohrmatrize ist ein hochpräzises Werkzeug für die Bearbeitung von Mikrobohrungen (Sacklöcher, vergrabene Löcher) in HDI-Platinen und hochwertigen Leiterplatten (z. B. Server-Motherboards, Radar-PCBs, Satellitenkommunikationsplatinen). Das Kernmaterial besteht aus WC-TiC-6Co mit einer Korngröße von $0,9\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Die Haltbarkeit wird durch Hochtemperatursintern ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Laser-Oberflächenhärtung (Härteerhöhung auf HV 2000 ± 50) verbessert. Die Bohrgenauigkeit beträgt $<0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, die Öffnungsabweichung $<0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$. Die Matrize verfügt über eine TiCN-Beschichtung (Dicke $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, unter Verwendung von CVD-Technologie), um die Beständigkeit gegen thermischen Schock durch Laser ($> 10^4\text{-mal} \pm 10^3\text{-mal}$) zu verbessern, und unterstützt Laserbohren mit hoher Energiedichte ($> 10^6\text{ W/cm}^2 \pm 10^5\text{ W/cm}^2$). In Kombination mit einem porösen Strukturdesign (Porendichte $> 1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$) und UV-Laserbeständigkeit (Wellenlänge $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Beständigkeit $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) optimiert die Form die Leistung durch ultrapräzise Verarbeitungstechnologie (wie Femtosekundenlaser) und selbstheilende Beschichtung (wie TiAlCN, Dicke $15\text{--}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$). Die mehrschichtige Gradientenstruktur verbessert die Wärmeleitfähigkeit ($> 200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) und reduziert thermische Risse (Länge $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) und erfüllt damit die Anforderungen der Mikrolochverarbeitung auf High-End-Leiterplatten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Leistung von Hartmetall-Laserbohrwerkzeugen

Die Form weist eine hohe Härte ($HV\ 2000 \pm 50$), hervorragende Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,01\text{ mm}^3 / N \cdot m \pm 0,001\text{ mm}^3 / N \cdot m$), hohe Haltbarkeit ($> 10^5\text{ mal} \pm 10^4\text{ mal}$) und hochpräzises Bohren ($< 0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, Lochdurchmesserabweichung $< 0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) auf. Die TiCN- Beschichtung verbessert die Beständigkeit gegen thermischen Schock durch Laser ($> 10^4\text{ mal} \pm 10^3\text{ mal}$) und selbstheilende Beschichtungen (wie TiAlCN) optimieren die Haltbarkeit ($> 2 \times 10^5\text{ mal} \pm 10^4\text{ mal}$) und thermische Stabilität ($> 800\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$). Die mehrschichtige Gradientenstruktur verbessert die Wärmeleitfähigkeit ($> 200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), reduziert thermische Risse ($< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), unterstützt eine hohe Energiedichte ($> 10^6\text{ W/cm}^2 \pm 10^5\text{ W/cm}^2$) und ist UV-Laser-tolerant (Wellenlänge $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$).

Arten von Hartmetall-Laserbohrwerkzeugen

Standardform

Basierend auf WC-TiC-6Co und TiCN- Beschichtung eignet es sich für Sacklöcher in HDI-Platten mit einer Genauigkeit von $< 0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ und einer Haltbarkeit von $1 \times 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$.

Hochtemperaturform

Fügen Sie eine selbstreparierende TiAlCN- Beschichtung ($15\text{--}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$) hinzu, Hitzebeständigkeit $> 800\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$, geeignet zum Bohren von Radar-Leiterplatten.

Mehrlochform

Optimierte poröse Struktur (Porendichte $> 1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$), unterstützt hochdichte Mikroporen in Satellitenkommunikationsplatinen und ist $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$ UV-beständig.

Ultrapräzisionsform

m·K für AR/VR-Geräte zu erfüllen, wird eine Femtosekundenlaserbearbeitung eingesetzt.

Anwendung einer Hartmetall-Laserbohrform

Hartmetall-Laserbohrmatrizen finden breite Anwendung in der High-End-Leiterplattenbearbeitung. Bei der Mikrolochbearbeitung von HDI-Platinen ermöglichen die Matrizen das präzise Bohren von Sacklöchern und vergrabenen Löchern (Genauigkeit $< 0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) und erfüllen so die Anforderungen an die hochdichte Verdrahtung von Smartphones, Tablets und Notebook-Motherboards. Bei der Produktion von Server-Motherboards und Rechenzentrumsplatinen gewährleisten die hohe Energiedichtetoleranz ($> 10^6\text{ W/cm}^2 \pm 10^5\text{ W/cm}^2$) und Wärmeleitfähigkeit ($> 200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) der Matrizen den zuverlässigen Anschluss von Hochleistungsprozessoren.

Bei der Herstellung von Radar-Leiterplatten und Satellitenkommunikationsplatinen kommt es auf die Beständigkeit der Form gegen thermischen Schock durch Laser ($> 10^4\text{-fach} \pm 10^3\text{-fach}$) und ihre poröse Struktur (Porendichte $> 1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$) an, wodurch die Mikrolochbearbeitung von 5G-Antennen, Millimeterwellenradaren und Kommunikationsmodulen für die Luft- und Raumfahrt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unterstützt wird. Im Bereich der hochwertigen Unterhaltungselektronik, etwa bei AR-/VR-Geräten und Smart Glasses, wird in Formen Femtosekundenlasertechnologie verwendet, um Ultramikrolöcher (Öffnung $<0,01 \pm 0,001$ mm) zu erzeugen und so die Integration optischer und elektronischer Komponenten zu verbessern. In der Automobilelektronik werden Formen zur Mikrolöcherbearbeitung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS) und fahrzeugmontierten Radarplatinen eingesetzt und passen sich an Hochtemperaturumgebungen ($>800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) und hohe Zuverlässigkeitsanforderungen (Ausbeute $>98\% \pm 1\%$) an.

Luft- und Raumfahrtelctronik (wie Flugsteuerungsmodule und Navigationssysteme) und Verteidigungselektronik (wie Raketenleitsysteme und elektronische Gegenmaßnahmensysteme) nutzen die UV-Laserbeständigkeit (Wellenlänge $193 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, $>10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) und Haltbarkeit ($>10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) der Form, um den Anforderungen der langfristigen Nutzung in extremen Umgebungen gerecht zu werden. Industrielle Automatisierung und IoT-Geräte (wie Smart-Factory-Steuerplatinen) verlassen sich auf die thermische Risskontrolle ($<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und die selbstheilende Beschichtung der Form, um die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung $>20\% \pm 2\%$) und die Wartungskosten zu senken ($<5\% \pm 1\%$). Mit der Entwicklung der 6G- und Millimeterwellentechnologie unterstützt die Form durch mehrschichtige Gradientenstrukturen und KI-Optimierung die effiziente Verarbeitung zukünftiger Hochfrequenzleiterplatten weiter.

Entwicklung und Perspektiven von Hartmetallformen in der Elektronikindustrie

Mit der wachsenden Nachfrage nach Miniaturisierung von mikroelektronischen Geräten (5 nm und darunter), flexibler Elektronik (dehnbare Schaltkreise, OLEDs und E-Textilien), 5G/6G-Kommunikation, Elektronik für Fahrzeuge mit neuer Energie (wie Batteriemanagementsysteme und Ladesäulen-Steuerplatinen), IoT-Geräten und intelligenter medizinischer Ausrüstung haben sich der Anwendungsbereich und die Anforderungen an die Leistungsoptimierung von Hartmetallformen für die Elektronikindustrie erheblich erhöht.

Die rasante Entwicklung der Elektronikindustrie hat die Weiterentwicklung der Hartmetall-Formtechnologie vorangetrieben. Neue, fortschrittliche Beschichtungen (wie ZrN, AlCrN, WC/C, Dicke $15\text{--}25 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) und additive Fertigungstechnologien (wie SLM, EBM) wurden hinzugefügt, um die Lebensdauer der Form ($>2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$), die Präzision ($<0,002 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$) und die Vielseitigkeit (wie Wärmeleitfähigkeit $>150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, Isolierung $>10^{12} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$) zu verbessern. Im High-End-Verbraucherbereich haben sich Hartmetall-Formen in den Bereichen KI-Chips, Quantencomputer, Elektronik für Elektrofahrzeuge, flexible Displays und intelligente medizinische Geräte hervorragend bewährt. Formen werden künftig intelligenter und integrieren Sensoren zur Verschleißüberwachung (Echtzeitgenauigkeit $<0,001 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$), adaptive Anpassungsfunktionen (Spannungskompensation $<5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$) und umweltfreundliches Design (Reduzierung des Schwermetalleinsatzes $<1\% \pm 0,1\%$), um den Herausforderungen hoher Zuverlässigkeit, niedriger Kosten und nachhaltiger Entwicklung in der Elektronikindustrie gerecht zu werden. Gleichzeitig werden globale Lieferkettenanpassungen

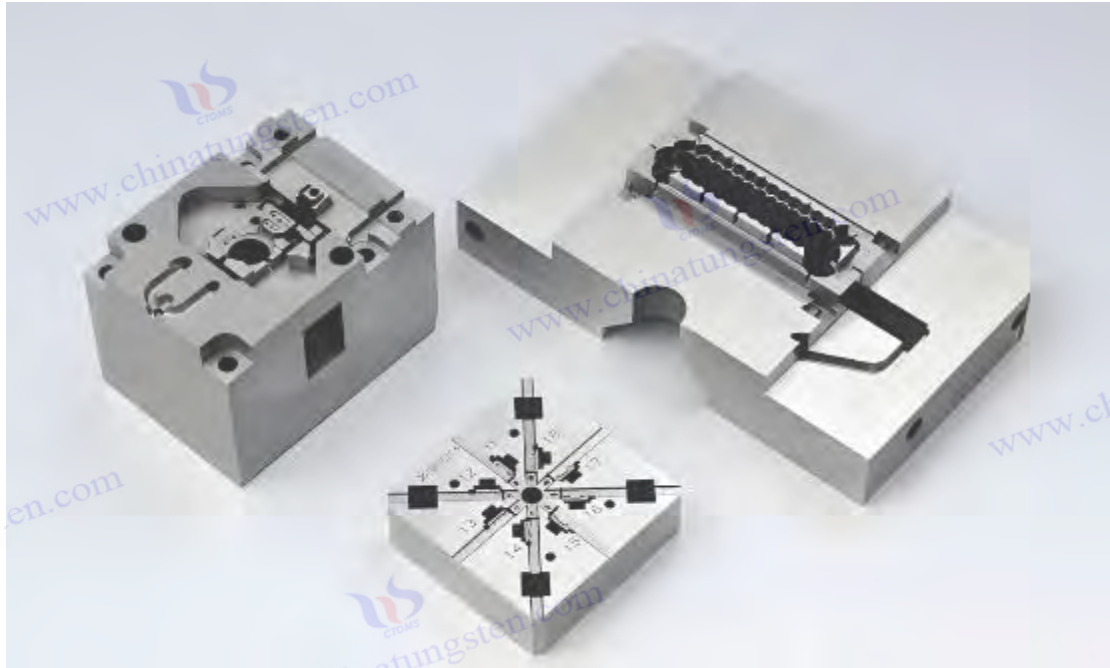
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und regionale Produktion (z. B. in Ostchina und Südostasien) die Optimierung des Formenbaus weiter vorantreiben.

In der Elektronikindustrie sind Kühlkörpersubstrate aus Hartmetall aufgrund ihrer hervorragenden Wärmeleitfähigkeit, hohen Temperaturbeständigkeit, ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer hervorragenden elektrischen Isolationsleistung zu Kernkomponenten von Wärmeableitungslösungen für elektronische Hochleistungsgeräte geworden. Mit der rasanten Entwicklung der Elektronikindustrie in Richtung hoher Leistung, Kompaktheit und Intelligenz ist die Nachfrage nach Kühlkörpersubstraten aus Hartmetall deutlich gestiegen. Diese Substrate müssen eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($>200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (ca. $4\text{-}6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) und eine ausgezeichnete Isolierung (Durchgangswiderstand $>10^{12} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$) aufweisen, um die Herausforderungen der Wärmeableitung von LEDs, 5G/6G-Basisstationen, Leistungsmodulen für Elektrofahrzeuge, Chips für künstliche Intelligenz und aufstrebenden Bereichen wie Quantencomputern wirksam zu bewältigen. Das Material wird durch die Verbindung von WC (Wolframkarbid) mit Cu (Kupfer), Diamant, AlN (Aluminiumnitrid), SiC (Siliziumkarbid) oder BN (Bornitrid)-Partikeln (Partikelgröße $10\text{-}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) hergestellt. Dabei kommen moderne Verfahren wie Kaltpressintern ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), Heißpressdiffusion ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$) oder isostatisches Pressen (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) zum Einsatz, um eine gleichmäßige Verteilung, Dichte (Porosität $< 1\% \pm 0,1\%$) und mikrostrukturelle Stabilität (Korngröße $< 1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) zu gewährleisten. Die Wärmeableitungseffizienz und Zuverlässigkeit dieser Substrate wird durch Präzisionsverarbeitung (wie chemisch-mechanisches Polieren CMP, Oberflächenrauheit $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) und Oberflächenmodifizierung (wie CVD-Beschichtung, Plasmaspritzen) weiter verbessert.

Aufgrund der hochdichten Integration elektronischer Geräte ($>10^6$ Transistoren/ $\text{mm}^2 \pm 10^5$ Transistoren/ mm^2), der erhöhten Leistungsdichte ($>100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$) und der höheren Betriebstemperatur ($>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) wird erwartet, dass der Markt für Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall ein Volumen von 3 Milliarden US-Dollar $\pm$ 300 Millionen US-Dollar erreichen wird, bei einer jährlichen Wachstumsrate von 20–25 %. Damit wird das Unternehmen zu einem High-End-Anwendungsfeld in der Hartmetallindustrie, insbesondere in der nächsten Generation der Kommunikation, bei Fahrzeugen mit alternativer Energie, in der industriellen Automatisierung und in der Verteidigungselektronik.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



14.1.2 Wärmeableitungssubstrat aus Hartlegierungen für die Elektronikindustrie

(1) Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu)-Verbundwärmeableitungssubstrat

Was ist ein Wolframkarbid-Kupfer-Verbundkühlkörper (WC-Cu) ?

Das Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu) ist ein Hochleistungsmaterial für effizientes Wärmemanagement. Es wird hauptsächlich in LED-Beleuchtungsmodulen, Leistungselektronikmodulen (wie IGBT- und MOSFET-Treibern), Stromversorgungseinheiten für Unterhaltungselektronik, Wechselrichtern für Elektrofahrzeuge und Netzteilen für Rechenzentrumsserver verwendet. Es besteht aus WC und Cu (Volumenverhältnis $70:30 \pm 1\%$) und wird durch Kaltpresssintern ($1200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $40\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) in Kombination mit einer anschließenden Wärmebehandlung ($1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, Glühen für 2 Stunden $\pm 0,1$ Stunden, Stickstoffschutz) hergestellt, um Materialgleichmäßigkeit und mikrostrukturelle Dichte (Porosität $< 0,8\% \pm 0,1\%$) zu gewährleisten. Das Substrat hat eine Wärmeleitfähigkeit von $220\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $5 \times 10^{-6}/\text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/\text{°C}$, eine Dicke von $0,5\text{--}1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, ist leicht (Dichte $12\text{--}13\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$) und hat eine hohe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $> 2500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$). Die Oberfläche ist mit einer Ni/Au-Schicht (Dicke $0,1\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) galvanisiert, um die Schweißbarkeit und Oxidationsbeständigkeit (Hochtemperaturbeständigkeit $> 300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, Feuchtigkeitsbeständigkeit $> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) zu verbessern, sowie mit einer chemisch plattierten Ni-P-Schicht (Dicke $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), um die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühtest $> 500\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$) zu verbessern.

Das Substrat kombiniert eine Mehrschichtstruktur (Dicke $0,3\text{--}0,7\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) mit einem Mikrokanal-Kühlsystem (Durchmesser $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, Durchflussrate $> 0,1\text{ l/min} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 l/min) und verwendet Nano-Cu-Partikel (Partikelgröße $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), um die Grenzflächenbindungskraft zu verbessern (Haftfestigkeit $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) sowie Laser-Mikrobearbeitungstechnologie, um eine Oberflächenmikrotextur zu erzielen. (Rauigkeit $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), optimieren die Wärmeableitungseffizienz ($> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), die Wärmespannung ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und die Wärmegleichmäßigkeit (Temperaturgradient $< 3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$) und erfüllen die Anforderungen an eine Hochleistungs-Wärmeableitung.

Leistung des Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu)-Verbundwerkstoff

Das Substrat verfügt über eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), optimiert auf $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), eine hohe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $> 2500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und ein leichtes Design (Dichte $12-13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$). Die Cu-Phase verbessert die elektrische Leitfähigkeit ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$), reduziert die Widerstandserwärmung ($< 0,5 \text{ }^\circ\text{C/W} \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C/W}$) und optimiert die Temperaturwechselbeständigkeit ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $150 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Zyklenzahl $> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$). Die Ni/Au-Beschichtung verbessert die Lötbarkeit (Hochtemperaturbeständigkeit $> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Feuchtigkeitsbeständigkeit $> 95 \% \text{RH} \pm 2 \% \text{RH}$) und die Ni-P-Schicht verbessert die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühnebelbeständigkeit > 500 Stunden ± 50 Stunden). Das Mikrokanal-Kühlsystem und die Nano-Cu-Partikel verbessern die Wärmeableitungseffizienz und die Schnittstellenhaftung (Haftfestigkeit $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) zusätzlich, und die KI-gesteuerte thermische Simulation reduziert die thermische Spannung ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und den Temperaturgradienten ($< 3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Arten von Wolframkarbid-Kupfer-Verbundkühlkörpersubstraten (WC-Cu)

Standardsubstrat

Basierend auf WC-Cu 70:30 und Ni/Au-Beschichtung, geeignet für LED-Beleuchtungsmodule, Dicke $0,5-1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Wärmeleitfähigkeit $220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Hochtemperatursubstrat

Hinzufügen einer Ni-P-Schicht ($1-3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), Hitzebeständigkeit $> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, geeignet für IGBT- und MOSFET-Treiber.

Miniaturisiertes Substrat

Optimierte Mehrschichtstrukturen (Dicke $0,3-0,7 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und Mikrokanäle (Durchmesser $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) für Mikro-LED- und AR/VR-Geräte.

Intelligentes Substrat

Integriert KI-Wärmesimulation und Nano-Cu-Partikel (Partikelgröße $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), mit einer Wärmeableitungseffizienz von $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, geeignet für die Stromversorgung von Rechenzentren.

Anwendung eines Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu)-Verbundwerkstoff

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeableitende Verbundsubstrate aus Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu) finden breite Anwendung in Beleuchtungs-, Elektronik- und Elektrofahrzeugen. In LED-Beleuchtungsmodulen unterstützt das Substrat hochhelle LED-Arrays (Leistungsdichte $> 50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$, Helligkeit $> 200 \text{ lm/W} \pm 10 \text{ lm/W}$), die für intelligente Straßenlaternen, fahrzeugmontierte LEDs und Innenbeleuchtung verwendet werden und die Lichteffizienz und Wärmeableitungsleistung (Wärmeleitfähigkeit $220 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) verbessern. In Leistungselektronikmodulen wird das Substrat für IGBT- und MOSFET-Treiber verwendet, um die thermische Zyklusleistung ($> 5000\text{-fach} \pm 500\text{-fach}$) und die elektrische Leitfähigkeit ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$) zu optimieren und die Anforderungen von industriellen Motorantrieben und Wechselrichtern für erneuerbare Energien zu erfüllen.

Energiemanagementeinheiten für Unterhaltungselektronik wie Laptop-Netzteile und Hochleistungsladegeräte sind auf das geringe Gewicht (Dichte $12\text{--}13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) und die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühnebelbeständigkeit $> 500 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$) des Substrats angewiesen, um die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Geräte zu verbessern. Bei Wechselrichtern für Elektrofahrzeuge unterstützen die hohe mechanische Festigkeit des Substrats ($> 2500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und die Mikrokanalkühlung (Durchflussrate $> 0,1 \text{ l/min} \pm 0,01 \text{ l/min}$) eine effiziente Wärmeableitung ($> 250 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) und thermische Gleichmäßigkeit ($< 3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$), um den hohen Leistungsbedarf von Fahrzeugen mit alternativer Antriebstechnik zu decken. Die Netzteile von Rechenzentrumsservern nutzen das KI-optimierte Design des Substrats und der Nano-Cu-Partikel (Haftfestigkeit $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), um die thermische Belastung ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) zu reduzieren und die Wärmeableitungseffizienz zu verbessern, wodurch der stabile Betrieb von Hochleistungsrechnern und KI-Beschleunigern unterstützt wird.

Im Bereich der Mikro-LED unterstützt das Substrat Displays mit einer Pixeldichte von $> 1000 \text{ PPI} \pm 100 \text{ PPI}$ und Auto-LEDs (Haltbarkeit $> 10^5 \text{ Stunden} \pm 10^4 \text{ Stunden}$), die in AR/VR-Geräten und Fahrzeugbeleuchtungssystemen verwendet werden. Medizinische Elektronik, wie etwa medizinische Hochleistungsgeräte und Luft- und Raumfahrt elektronik (wie etwa Satellitenstrommodule), ist auf die hohe Temperaturbeständigkeit ($> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 95 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) des Substrats angewiesen, um die Anforderungen an die Wärmeableitung in extremen Umgebungen zu erfüllen. Module für die industrielle Automatisierung und Edge-Computing nutzen die Mikrotextur der Oberfläche (Rauigkeit $\text{Ra} < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) und die Mehrschichtstruktur des Substrats, um die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung $> 20 \% \pm 2 \%$) und die Wartungskosten zu senken ($< 5 \% \pm 1 \%$), wodurch die weit verbreitete Anwendung von Hochleistungs-Wärmeableitungstechnologie in der Zukunft gefördert wird.

(2) Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant)-Verbund

Was ist ein Wärmeableitungssubstrat aus einem Wolframkarbid-Diamant-Verbundwerkstoff (WC-Diamant) ?

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant) ist ein hochwertiges Material für leistungsstarkes Wärmemanagement. Es wird hauptsächlich in HF-Modulen von 5G/6G-Basisstationen, Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge (Wechselrichter, Ladesäulen-Controller), Hochleistungs-Computerservern und militärischen Radarsystemen verwendet. Es besteht aus WC und Diamant (Partikelgröße $20\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Volumenverhältnis $60:40 \pm 1\%$) und wird durch Heißpressdiffusion ($1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$) und isostatisches Pressen (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) hergestellt, um Materialdichte (Porosität $<0,6\% \pm 0,1\%$) und Korngleichmäßigkeit ($<0,8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit des Substrats beträgt $320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, die Isolierung ist $>10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, Dicke $0,3\text{--}0,8\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, Temperaturbeständigkeit $>400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (thermische Stabilität $>500\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$), hohe mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit $>3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$).

Die Oberfläche ist mit einer CVD-Diamantbeschichtung (Dicke $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) versehen, um die Verschleißfestigkeit (Härte $\text{HV } 8000 \pm 500$) und die Gleichmäßigkeit der Wärmeableitung (Temperaturgradient $<5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu verbessern. Durch Plasmareinigungstechnologie wird die Schnittstellenhaftung optimiert ($>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). In Kombination mit der Gradienten-Verbundstruktur (WC-Gehalt $30\text{--}60\% \pm 1\%$) und der Nano-Wärmeableitungsschicht (Dicke $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) wird das Substrat durch Laser-Mikrobearbeitungstechnologie optimiert. Die Oberflächenmikrostruktur (Porosität $1\text{--}2\% \pm 0,1\%$) vergrößert die Wärmeableitungsfläche ($>300\text{ cm}^2 \pm 20\text{ cm}^2$) und verringert den Wärmewiderstand ($<0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$). Das adaptive Wärmemanagementmodul (Reaktionszeit $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) überwacht die Temperatur durch Einbettung von Thermoelementen (Genauigkeit $<0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$), um den Anforderungen der Wärmeableitung bei hohen Frequenzen und sehr hohen Strömen gerecht zu werden.

Leistung des Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant)-Verbundwerkstoff

Das Substrat verfügt über eine ultrahohe Wärmeleitfähigkeit ($320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, nach Optimierung $>350\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), hervorragende Isolierung ($>10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$), hohe mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit $>3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) und hohe Temperaturbeständigkeit ($>400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Wärmestabilität $>500\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$). Die Diamantbeschichtung verbessert die Verschleißfestigkeit (Härte $\text{HV } 8000 \pm 500$) und die Gleichmäßigkeit der Wärmeableitung (Temperaturgradient $<5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), eine Nano-Wärmeableitungsschicht verringert den Wärmewiderstand ($<0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$) und die Gradientenstruktur optimiert die Wärmeleitung ($>350\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$). Das adaptive Wärmemanagementmodul überwacht die Temperatur über Thermoelemente (Genauigkeit $<0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, Reaktionszeit $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) und unterstützt Hochfrequenz-Leistungsgeräte ($>10\text{ GHz} \pm 1\text{ GHz}$) und Anwendungen mit hoher Leistungsdichte ($>200\text{ W/cm}^2 \pm 20\text{ W/cm}^2$).

Arten von Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant)-Verbundsubstraten zur Wärmeableitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Standardsubstrat

Basierend auf WC-Diamant 60:40 und CVD-Beschichtung eignet es sich für 5G-Basisstations-HF-Module mit einer Dicke von $0,3\text{--}0,8\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und einer Wärmeleitfähigkeit von $320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Hochtemperatursubstrat

Hinzugefügte Gradientenstruktur (WC 30 % – 60 % $\pm 1\%$), Hitzebeständigkeit $> 400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, geeignet für Wechselrichter von Elektrofahrzeugen.

Hochfrequenzsubstrat

Integrierter Nano-Kühlkörper (Dicke $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), unterstützt Geräte $> 10\text{ GHz} \pm 1\text{ GHz}$ und hat einen Wärmewiderstand $< 0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Intelligentes Substrat

Eingebettetes adaptives Wärmemanagementmodul und Thermoelement, Wärmeableitungsfläche $> 300\text{ cm}^2 \pm 20\text{ cm}^2$, geeignet für militärische Radarsysteme.

Anwendung eines Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant)-Verbundmaterial

Wärmeableitende Substrate aus Wolframkarbid-Diamant-Verbundwerkstoffen (WC-Diamant) werden häufig in der Kommunikation, bei Elektrofahrzeugen und im Militärbereich eingesetzt. In 5G/6G-Basisstations-HF-Modulen unterstützt das Substrat Hochfrequenz-Leistungsgeräte (wie etwa GaN HEMT, $> 10\text{ GHz} \pm 1\text{ GHz}$) und eine hohe Leistungsdichte ($> 200\text{ W/cm}^2 \pm 20\text{ W/cm}^2$) und wird zur Wärmeableitung von Antennen und HF-Verstärkern verwendet, wobei es eine ultrahohe Wärmeleitfähigkeit ($320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) und Isolierung ($> 10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}$) aufweist. In der Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen wird das Substrat in Wechselrichtern und Ladesäulen-Controllern verwendet, um die Wärmezyklusleistung ($> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) und die hohe Temperaturbeständigkeit ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu optimieren, eine schnelle Ladeleistung ($> 350\text{ kW} \pm 10\text{ kW}$) zu unterstützen und einen effizienten Betrieb des Batteriemanagementsystems zu gewährleisten.

Hochleistungs-Computerserver verlassen sich auf die Gradientenstruktur und die Nano-Wärmeableitungsschicht des Substrats (Wärmewiderstand $< 0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$), um die Wärmespannung zu verringern ($< 15\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) und die Wärmeableitungsfläche zu vergrößern ($> 300\text{ cm}^2 \pm 20\text{ cm}^2$), wodurch die stabile Leistung von KI-Beschleunigern und Rechenzentren unterstützt wird. Militärische Radarsysteme nutzen die mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit $> 3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) und Verschleißfestigkeit (Härte HV 8000 ± 500) des Substrats, um dem Langzeiteinsatz von Radarmodulen und elektronischen Gegenmaßnahmen in extremen Umgebungen gerecht zu werden (Wärmestabilität $> 500\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$). Avionikgeräte (wie Flugsteuerungsmodul und Satellitenstromversorgungen) sind auf die hohe Temperaturbeständigkeit und gleichmäßige Wärmeableitung des Substrats (Temperaturgradient $< 5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) angewiesen, um die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Geräte zu verbessern.

Im Bereich der Unterhaltungselektronik unterstützen Substrate die Wärmeableitungsanforderungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

von AR/VR-Geräten und Hochleistungsspielkonsolen und eignen sich für Hochfrequenz- und Ultrahochstromanwendungen ($> 100 \text{ A} \pm 5 \text{ A}$). Industrielle Automatisierungs- und IoT-Geräte (wie z. B. Smart-Factory-Steuerplatinen) nutzen das adaptive Wärmemanagement (Reaktionszeit $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) und die lasermikrobearbeitete Oberfläche (Rauheitsoptimierung) des Substrats, um die Produktionseffizienz ($> 20 \% \pm 2 \%$) zu verbessern und die Wartungskosten ($< 5 \% \pm 1 \%$) zu senken. Mit der Entwicklung der 6G-Millimeterwellentechnologie können Substrate die Wärmeableitungsanforderungen zukünftiger Hochfrequenzkommunikation und Leistungselektronik durch KI-gesteuerte Optimierung und Mikrostrukturdesign noch besser bewältigen.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN)

Was ist ein Kühlkörper aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) -Verbundwerkstoff?

aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) ist ein Hochleistungsmaterial für das Wärmemanagement von Hochfrequenzelektronik und medizinischen Geräten. Es wird hauptsächlich in elektronischen Hochfrequenzgeräten (wie HF-Modulen, Mikrowellenradaren, Satellitenkommunikationsgeräten), medizinischer Elektronik (wie MRT-Leistungsverstärkern, Ultraschallgeräten) und industriellen Sensoren verwendet. Es besteht aus einem WC- und AlN-Verbund (Volumenverhältnis $50:50 \pm 1 \%$) und wird durch Kaltpressintern ($1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und Hochtemperaturglühen ($1300 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Stickstoffschutz) hergestellt, um die Materialdichte (Porosität $< 0,7 \% \pm 0,1 \%$) und die thermische Anpassung zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit des Substrats beträgt $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, die Isolierung ist $> 10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$, Dicke $0,4\text{-}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Wärmeausdehnungskoeffizient an Silizium angepasst ($4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Abweichung $< 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Das Substrat kombiniert die hohe Isolierung von AlN mit der mechanischen Festigkeit von WC (Biegefestigkeit $> 400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), eignet sich für Hochfrequenzschaltungen (Betriebsfrequenz $> 20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$) und Hochtemperaturumgebungen ($> 250 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und weist eine hohe mechanische Haltbarkeit ($> 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) auf. Die Oberfläche ist mit Si_3N_4 (Dicke $0,5\text{--}1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) beschichtet, um die Feuchtigkeitsbeständigkeit (Feuchtigkeitsbeständigkeit $> 95 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) und die Temperaturwechselbeständigkeit ($> 1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$) zu verbessern, und die Mikrolichtbogenoxidationstechnologie wird verwendet, um die Festigkeit der Grenzflächenbindung (Haftfestigkeit $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) zu optimieren. Durch die Kombination eines mehrschichtigen Gradientendesigns (AlN- Gehalt $40 \% \text{--} 60 \% \pm 1 \%$) und einer thermoelektrischen Trennschicht (Dicke $0,02\text{--}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) nutzt das Substrat eine Nanopartikeldispersionstechnologie (Partikelgröße $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), um die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitfähigkeit ($< 2 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) zu verbessern und die thermische Spannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) zu reduzieren und so den Anforderungen einer effizienten Wärmeableitung gerecht zu werden.

Leistung des Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) - Verbundwerkstoff

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Das Substrat verfügt über eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), hervorragende Isolierung ($>10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$), hohe mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit $>400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) und thermische Anpassung (Abweichung $<0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Die Si_3N_4 -Beschichtung verbessert die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($>95 \% \text{RH} \pm 2 \% \text{RH}$) und die Temperaturwechselbeständigkeit ($>1000\text{-fach} \pm 100\text{-fach}$), die mehrschichtige Gradientenstruktur optimiert die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitfähigkeit ($<2^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$) und die thermoelektrische Trennschicht verringert die thermische Spannung ($<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$). Die Partikeldispersionstechnologie im Nanomaßstab verbessert die Haltbarkeit ($>2 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$), unterstützt Hochtemperaturumgebungen ($>250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) und Hochfrequenzanwendungen ($>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$).

Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) -Verbund-Kühlkörpersubstrate

Standardsubstrat

Basierend auf WC- AlN 50:50 und Si_3N_4 -Beschichtung, geeignet für HF-Module, Dicke $0,4\text{--}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Wärmeleitfähigkeit $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Hochtemperatursubstrat

Thermoelektrische Trennschicht hinzugefügt ($0,02\text{--}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), Hitzebeständigkeit $>250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, geeignet für MRI-Leistungsverstärker.

Hochfrequenzsubstrat

Optimierte Gradientenstruktur (AlN $40\% \text{--}60\% \pm 1\%$), unterstützt Schaltkreise $>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$, mit einer Gleichmäßigkeit $<2^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$.

Nanoverstärkte Substrate

Integrierte Nanopartikel (Partikelgröße $<10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), thermische Spannung $<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, geeignet für Mikrowellenradar.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) - Verbundwerkstoff

aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN) werden häufig in der Hochfrequenzelektronik, der Medizin und der Luftfahrt eingesetzt. In elektronischen Hochfrequenzgeräten unterstützt das Substrat Hochfrequenzschaltungen ($>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$) von HF-Modulen, Mikrowellenradaren und Satellitenkommunikationsgeräten. Dank der hohen Isolierung ($>10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$) und der hohen Wärmeleitfähigkeit ($160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) erfüllt es die Anforderungen an die Wärmeableitung von 5G/6G-Basisstationen und Kommunikationsantennen. In der Medizinelektronik werden Substrate in MRI-Leistungsverstärkern und Ultraschallgeräten verwendet, um die thermische Anpassung (Abweichung $<0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) und die Hochtemperaturbeständigkeit ($>250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) zu optimieren und die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Geräte zu verbessern (Ausbeute $>98\% \pm 1\%$).

Industrielle Sensoren, wie Temperatur- und Drucksensoren für intelligente Fabriken, sind auf die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mechanische Haltbarkeit ($> 10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach) und Temperaturwechselbeständigkeit (> 1000 -fach ± 100 -fach) des Substrats angewiesen, um die Automatisierung und vorausschauende Wartung von Industrie 4.0 zu unterstützen (Reduzierung von Ausfallzeiten um $> 15\% \pm 2\%$). Avioniksysteme wie Flugsteuerungssysteme und Navigationsmodule nutzen das geringe Gewicht (Dicke $0,4\text{--}0,6\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) und die hohe mechanische Festigkeit ($> 400\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) des Substrats, um dem Langzeiteinsatz in extremen Umgebungen (thermische Stabilität $> 500\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$) gerecht zu werden. Intelligente medizinische Geräte wie implantierbare Herzfrequenzmonitore und tragbare Ultraschallgeräte sind auf die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 95\%$ relative Luftfeuchtigkeit $\pm 2\%$ relative Luftfeuchtigkeit) und das Gradientendesign des Substrats angewiesen, um die Gleichmäßigkeit der Wärmeableitung ($< 2\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$) zu optimieren und die thermische Belastung ($< 10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) zu reduzieren.

Im Bereich der Unterhaltungselektronik unterstützen Substrate die Wärmeableitungsanforderungen von Hochleistungsrechnern und Kommunikationsterminals und sind an hohe Temperaturen und hohe Frequenzen angepasst. Verteidigungselektronik wie elektronische Gegenmaßnahmenysteme und Radarmodule nutzen die Korrosionsbeständigkeit und Nanoverstärkungstechnologie von Substraten, um militärische Zuverlässigkeits- und Haltbarkeitsanforderungen ($> 2 \times 10^6 \pm 10^4$) zu erfüllen. Mit der Entwicklung von Millimeterwellenradaren, neuronalen Netzwerkbeschleunigern und biomedizinischen Geräten verbessern Substrate die Wärmeableitungseffizienz ($> 20\% \pm 2\%$) und die Wärmemanagementleistung durch KI-Optimierung und thermoelektrische Trennschichten weiter und fördern so die breite Nutzung von Hightech-Anwendungen in der Zukunft.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC)

Kühlkörper aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid-Verbundwerkstoff (WC- SiC) ?

Das Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC) ist ein Hochleistungs-Wärmemanagementmaterial für Hochleistungs- und Industrieanwendungen . Es wird hauptsächlich in Hochleistungslasern, Leistungselektronik-Wechselrichtern, industriellen Automatisierungssteuerungssystemen und Eisenbahnantriebsgeräten eingesetzt. Es besteht aus WC und SiC (Siliziumkarbid, Partikelgröße $15\text{--}40\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Volumenverhältnis $65:35 \pm 1\%$) und wird durch Heißpressdiffusion ($1350\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $60\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$) hergestellt, um Materialdichte (Porosität $< 0,9\% \pm 0,1\%$) und thermische Stabilität zu gewährleisten. Das Substrat hat eine Wärmeleitfähigkeit von $180\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$, einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, eine Dicke von $0,6\text{--}1,2\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ und eine Temperaturbeständigkeit von $> 450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ (thermische Zykluslebensdauer $> 1000\text{ Stunden} \pm 100\text{ Stunden}$). Das Substrat vereint die hohe Wärmeleitfähigkeit von SiC ($> 200\text{ W/m}\cdot\text{K}$) mit der Korrosionsbeständigkeit von WC (Säurebeständigkeit $< 0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$), wodurch es sich für Hochspannungsgeräte (wie $1000\text{ V} \pm 50\text{ V}$) und Anwendungen mit hoher Leistungsdichte ($> 150\text{ W/cm}^2 \pm 15\text{ W/cm}^2$) eignet und eine hohe mechanische Festigkeit (Schlagfestigkeit $> 600\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) aufweist. Die Oberfläche ist mit TiSiN beschichtet (Dicke $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$), um die Oxidationsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit (Härte $\text{HV } 2500 \pm 100$) zu verbessern, und die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Beschichtungshaftung ($> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) wird durch Plasmaspritztechnologie optimiert. In Kombination mit einer porösen Struktur (Porosität $1-3 \% \pm 0,1 \%$) und einer Kohlenstofffaserverstärkung (Gehalt $1-2 \% \pm 0,1 \%$) erhöht das Substrat die Wärmeableitungsfläche ($> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) und die Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und erfüllt so hohe Zuverlässigkeitsanforderungen.

Leistung des Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC) - Verbundmaterial

Das Substrat verfügt über eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($4,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), eine hohe mechanische Festigkeit (Schlagfestigkeit $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und eine hohe Temperaturbeständigkeit ($> 450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, thermische Zykluslebensdauer $> 1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$). Die TiSiN- Beschichtung verbessert die Oxidationsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit (Härte $\text{HV } 2500 \pm 100$) und verfügt über eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (Säurebeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$). Die poröse Struktur vergrößert die Wärmeableitungsfläche ($> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) und die Kohlefaserverstärkung optimiert die Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und unterstützt Anwendungen mit hoher Spannung ($1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$) und hoher Leistungsdichte ($> 150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$).

Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC) -Verbund-Kühlkörpersubstrate

Standardsubstrat

Basierend auf WC - SiC 65:35 und TiSiN- Beschichtung, geeignet für Laserschneidmaschinen, Dicke $0,6-1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Wärmeleitfähigkeit $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Hochtemperatursubstrat

Optimierte thermische Zykluslebensdauer ($> 1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$), Hitzebeständigkeit $> 450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, geeignet für Leistungselektronik-Wechselrichter.

Poröses Substrat

Integrierte poröse Struktur (Porosität $1 \% - 3 \% \pm 0,1 \%$), Wärmeableitungsfläche $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$, geeignet für Windkraftkonverter.

Verbessertes Substrat

Durch die Zugabe von Kohlefasern ($1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$) beträgt die Schlagfestigkeit $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, was für Industrieroboter geeignet ist.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC) -Verbundwerkstoff

aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC) finden breite Anwendung in der Hochleistungsindustrie und im Energiebereich. In Hochleistungslasern ermöglichen die Substrate eine hohe Leistungsdichte ($> 150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$) und hohe Temperaturbeständigkeit ($> 450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) von Laserschneidmaschinen und Schweißgeräten und verbessern so die Verarbeitungseffizienz und die Lebensdauer der Geräte. In Leistungselektronik-Wechselrichtern

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden die Substrate in Windkraft- und Solarwechselrichtern eingesetzt, um die Wärmeleitfähigkeit ($180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) und Korrosionsbeständigkeit (Säurebeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) zu optimieren und die Anforderungen an hohe Spannungen ($1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$) zu erfüllen.

Industrielle Automatisierungssteuerungssysteme sind auf die mechanische Festigkeit (Schlagfestigkeit $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und die poröse Struktur (Wärmeableitungsfläche $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) des Substrats angewiesen, um den stabilen Betrieb von Industrierobotern und intelligenten Fertigungsanlagen zu gewährleisten. Schienenfahrzeuge nutzen die thermische Lebensdauer ($> 1000 \text{ Stunden} \pm 100 \text{ Stunden}$) und die Kohlefaserverstärkung (Schlagfestigkeit $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) des Substrats, um eine hohe Zuverlässigkeit (Ausbeute $> 98 \% \pm 1 \%$) von Hochspannungs-Traktionswechselrichtern und Steuermodulen zu gewährleisten. Luft- und Raumfahrtelektronik wie Flugsteuerungssysteme und Verteidigungselektronik (wie Radarleistungsmodule) sind auf die hohe Temperaturbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit (Härte $\text{HV } 2500 \pm 100$) des Substrats angewiesen, um dem Langzeiteinsatz in extremen Umgebungen standzuhalten.

Im Bereich der grünen Energie unterstützen Substrate die effiziente Wärmeableitung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge und Energiespeichersystemen und erfüllen die Anforderungen an hohe Leistungsdichte und thermische Stabilität. Unterhaltungselektronik wie Hochleistungsserver und Industriesensoren nutzen das leichte Substrat (Dicke $0,6\text{--}1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die TiSiN-Beschichtung, um die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung $> 20 \% \pm 2 \%$) und die Wartungskosten zu senken ($< 5 \% \pm 1 \%$). Mit der Entwicklung von Industrie 4.0 und erneuerbaren Energien erfüllen Substrate durch Mehrschichtdesign und KI-Optimierung die Anforderungen an zukünftige hochzuverlässige Industrieelektronik und grüne Energieanlagen.

(5) Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoff

Was ist ein Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoff ?

Das Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN) ist ein Hochleistungsmaterial für das Wärmemanagement von hochpräzisen Instrumenten und Verteidigungselektronik. Es wird hauptsächlich für hochpräzise Instrumente (wie Lithografie-Leistungsmodule, Elektronenstrahlätzgeräte), Verteidigungselektronik (wie Radarsignalprozessoren, Raketenleitsysteme) und wissenschaftliche Forschungsgeräte verwendet. Es besteht aus WC und BN (Bornitrid, Partikelgröße $10\text{--}30 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, Volumenverhältnis $55:45 \pm 1 \%$) und wird durch isostatisches Pressen (HIP, $1250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $160 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) hergestellt, um Materialdichte (Porosität $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und thermische Stabilität zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit des Substrats beträgt $200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, die Isolierung beträgt $> 10^{15} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14} \Omega\cdot\text{cm}$, die Dicke $0,3\text{--}0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, der Wärmeausdehnungskoeffizient $4,2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, hohe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). Das Substrat kombiniert die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ultrahohe Isolierung von BN mit der mechanischen Festigkeit von WC und ist für Ultrahochfrequenzanwendungen ($>50\text{ GHz}\pm 5\text{ GHz}$) und extreme Umgebungen (-50°C bis $300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, Wärmestabilität $>600\text{ Stunden}\pm 50\text{ Stunden}$) geeignet. Die Oberfläche ist mit AlN beschichtet (Dicke $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}\pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), um die Feuchtigkeitsbeständigkeit (Luftfeuchtigkeitsbeständigkeit $>98\text{ \% RH}\pm 1\text{ \% RH}$) und die Wärmestabilität zu verbessern, und die Festigkeit der Grenzflächenbindung wird durch Laseroberflächenbehandlung optimiert (Haftfestigkeit $>55\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$). Durch die Kombination eines mehrschichtigen Gradientenverbunds (BN-Gehalt $40\text{--}60\text{ \%}\pm 1\text{ \%}$) und einer thermoelektrischen Isolationsschicht (Dicke $0,01\text{--}0,03\text{ mm}\pm 0,001\text{ mm}$) optimiert das Substrat die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitfähigkeit ($<1,5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) und reduziert elektromagnetische Störungen ($<0,1\text{ dB}\pm 0,01\text{ dB}$) durch Nano-Dispersionstechnologie, um höchste Präzision und extreme Umwelтанforderungen zu erfüllen.

Leistung des Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoff

Das Substrat verfügt über eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($200\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), eine hervorragende Isolierung ($>10^{15}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}\pm 10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$), eine hohe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $>3500\text{ MPa}\pm 100\text{ MPa}$) und einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($4,2\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}\pm 0,5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Die AlN-Beschichtung verbessert die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($>98\text{ \%rF}\pm 1\text{ \%rF}$) und die Wärmestabilität ($>600\text{ Stunden}\pm 50\text{ Stunden}$), die mehrschichtige Gradientenstruktur optimiert die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitfähigkeit ($<1,5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) und die Wärmeisolationsschicht verringert elektromagnetische Störungen ($<0,1\text{ dB}\pm 0,01\text{ dB}$). Die Dispersionstechnologie im Nanomaßstab verbessert die Haltbarkeit ($>2\times 10^6\text{-mal}\pm 10^4\text{-mal}$), unterstützt ultrahohe Frequenzen ($>50\text{ GHz}\pm 5\text{ GHz}$) und einen extremen Temperaturbereich ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $300\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Arten von Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundsubstraten zur Wärmeableitung

Standardsubstrat

Basierend auf WC-BN 55:45 und AlN-Beschichtung eignet es sich für Lithografie-Leistungsmodule mit einer Dicke von $0,3\text{--}0,5\text{ mm}\pm 0,01\text{ mm}$ und einer Wärmeleitfähigkeit von $200\text{ W/m}\cdot\text{K}\pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Hochtemperatursubstrat

Optimierte thermische Stabilität ($>600\text{ Stunden}\pm 50\text{ Stunden}$), Hitzebeständigkeit $>300^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, geeignet für Elektronenstrahlätzgeräte.

Hochfrequenzsubstrat

Integrierte thermische und elektrische Isolationsschicht ($0,01\text{--}0,03\text{ mm}\pm 0,001\text{ mm}$), unterstützt Anwendungen $>50\text{ GHz}\pm 5\text{ GHz}$ und $\text{EMI}<0,1\text{ dB}\pm 0,01\text{ dB}$.

Nanoverstärkte Substrate

Durch die Zugabe einer Dispersion im Nanomaßstab (Partikelgröße $<10\text{ nm}\pm 0,5\text{ nm}$) beträgt die Gleichmäßigkeit der Wärmeleitfähigkeit $<1,5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, was für Raketenleitsysteme geeignet ist.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendung eines Wärmeableitungssubstrats aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoff

Wärmeableitende Substrate aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoffen finden breite Anwendung in hochpräzisen Instrumenten, der Verteidigungselektronik und der wissenschaftlichen Forschung. In Anlagen zur Halbleiterherstellung unterstützt das Substrat die Leistungsmodul von EUV-Lithografie- und Elektronenstrahlätzenanlagen. Dank seiner ultrahohen Isolierung ($> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$) und Wärmeleitfähigkeit ($200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) erfüllt es die Anforderungen an höchste Präzision mit einer Linienbreite von $< 2 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$. In der Verteidigungselektronik wird das Substrat in Radarsignalprozessoren und Raketenleitsystemen verwendet, wobei die Ultrahochfrequenzleistung ($> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$) und die mechanische Festigkeit ($> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) optimiert und eine Anpassung an extreme Temperaturbereiche ($-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $300 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) sowie eine thermische Stabilität ($> 600 \text{ Stunden} \pm 50 \text{ Stunden}$) gewährleistet wird.

Wissenschaftliche Forschungsgeräte wie experimentelle Geräte für die Hochenergiephysik und Quantencomputermodule sind auf das leichte Substrat (Dicke $0,3\text{--}0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die Wärmeisolationsschicht angewiesen, um elektromagnetische Störungen ($< 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$) zu verringern und die Gleichmäßigkeit der Wärmeableitung ($< 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) zu verbessern. Avionikgeräte wie Flugsteuerungssysteme und Satellitenkommunikationsmodule nutzen die Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 98 \text{ \% relative Luftfeuchtigkeit} \pm 1 \text{ \% relative Luftfeuchtigkeit}$) und Korrosionsbeständigkeit des Substrats, um Zuverlässigkeit und Haltbarkeit in Luft- und Raumfahrtqualität ($> 2 \times 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) zu erreichen. Intelligente medizinische Geräte wie hochpräzise MRT- und Ultraschallbildgebungssysteme sind auf die thermische Anpassung und hohe mechanische Festigkeit des Substrats angewiesen, um Biokompatibilität und stabilen Betrieb in Hochtemperaturumgebungen zu unterstützen.

Industrielle Automatisierungssteuerungssysteme und Kommunikationsbasisstationen nutzen Gradientendesign und Nanoveredelungstechnologie von Substraten, um die Produktionseffizienz zu optimieren (Steigerung $> 20 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$) und die Wartungskosten zu senken ($< 5 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$). Durch die Verbesserung der Lithografiegenauigkeit und die Miniaturisierung der Verteidigungselektronik können Substrate durch KI-gesteuerte Optimierung und Mehrschichtstrukturen die Anforderungen zukünftiger hochpräziser Instrumente und elektronischer Geräte für extreme Umgebungen besser erfüllen und so die rasante Entwicklung der Halbleiter- und Verteidigungstechnologie fördern.

Entwicklungstrend und Marktaussichten von Wärmeableitungssubstraten auf Wolframkarbidbasis

für diese Substrate wächst aufgrund der hochdichten Integration elektronischer Geräte ($> 10^6$ Transistoren/ $\text{mm}^2 \pm 10^5$ Transistoren/ mm^2), der erhöhten Leistungsdichte ($> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$) und der höheren Betriebstemperatur ($> 150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) weiter, insbesondere in den Bereichen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

der Kommunikation der nächsten Generation (6G), mit neuer Energie betriebene Fahrzeuge (Batteriemanagementsysteme, Schnelllademodule), Chips für künstliche Intelligenz, industrielle Automatisierung, Verteidigungselektronik und intelligente medizinische Geräte. Die Technologieentwicklung bei Wärmeableitungssubstraten aus Hartmetall beschleunigt sich durch die Einführung moderner Herstellungsverfahren (wie Nanopartikeldispersion, Lasermikrobearbeitung, 3D-Druck) und Oberflächenbehandlungen (wie CVD-Beschichtung, Plasmaspritzen, ALD-Abscheidung), die eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit ($> 300 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), Isolierung ($> 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$), mechanische Festigkeit ($> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und Haltbarkeit ($> 10^7 \text{ mal} \pm 10^5 \text{ mal}$) bewirken. Der Markt wird voraussichtlich 3 ± 300 Millionen USD erreichen und jährlich um 20–25 % wachsen, insbesondere in den Bereichen Schnellladen von Elektrofahrzeugen ($> 350 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$), Millimeterwellenradar, Quantencomputer und biomedizinische Elektronik. Zukünftig werden Substrate intelligenter und nachhaltiger. Sie werden mit Wärmesensoren zur Temperaturüberwachung (Genauigkeit $< 0,1 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$), adaptiven Wärmeableitungsstrukturen (Wärmewiderstand $< 0,1 \text{ }^\circ\text{C/W} \pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C/W}$) und recycelbarem Design (Schwermetallgehalt $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) ausgestattet, um den vielfältigen Herausforderungen der Elektronikindustrie hinsichtlich effizienter Wärmeableitung, hoher Zuverlässigkeit und Umweltschutz gerecht zu werden. Gleichzeitig werden Anpassungen der globalen Lieferketten und regionale Produktion (z. B. in Ostchina, Deutschland in Europa und im Silicon Valley in den USA) die Optimierung des Layouts der Substratindustrie und die internationale Zusammenarbeit weiter vorantreiben.

Dieser Abschnitt befasst sich mit zwei Aspekten: Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten sowie der Optimierung der Leitfähigkeit von Hartmetall. Anhand theoretischer Mechanismen, experimenteller Daten und Branchentrends werden die Leistungsmerkmale und Verbesserungsmöglichkeiten eingehend analysiert. So wird eine umfassende theoretische und praktische Grundlage für neue Anwendungen geschaffen.

14.1.3 Technologie, Prinzipien und Verbesserungen von Hartmetallmatrizen und Wärmeableitungssubstraten

Technologie und Anwendung von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten

Hartmetallmatrizen und Kühlkörper spielen in der Elektronikindustrie eine entscheidende Rolle, da sie der Präzisionsfertigung bzw. einem effizienten Wärmemanagement dienen. Hartmetallmatrizen werden häufig in der Chipverpackung, beim Stanzen von Mikrosteckern, in der Präzisionsbearbeitung auf Halbleiterebene, beim Stanzen von Leiterplatten und in aufstrebenden Bereichen wie flexibler Elektronik und mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) eingesetzt. Diese Matrizen erfordern eine hohe Maßgenauigkeit ($< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit (Ermüdungslebensdauer $> 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) und starke Hochtemperaturstabilität (Temperaturbeständigkeit $> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeableitende Substrate unterstützen elektronische Hochleistungsgeräte, darunter Leistungshalbleiter (wie IGBTs, MOSFETs), Laserdioden, 5G/6G-Kommunikationsmodule, Wechselrichter für Elektrofahrzeuge und Chips für künstliche Intelligenz. Sie müssen ein effizientes Wärmemanagement (Wärmeableitungseffizienz $> 90 \% \pm 2 \%$), einen niedrigen Wärmewiderstand ($< 0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$) und eine hervorragende Isolierung (Massenwiderstand $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$) erreichen, um sicherzustellen, dass das Gerät mit hoher Leistungsdichte ($> 100 \text{ W/cm}^2$) $\pm 10 \text{ W/cm}^2$) und stabilem Betrieb in Hochtemperaturumgebungen ($> 150^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) betrieben werden kann.

Materialien und Eigenschaften von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten

Das Kernmaterial von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten basiert auf dem WC-Co-System mit einem Kobaltgehalt (Co) von $6-10 \% \pm 1 \%$. Die Korngröße der Hartmetallrohstoffe wird streng auf $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit ($> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) wird die Matrix mit Kupfer (Cu, $1-5 \% \pm 0,5 \%$) oder Nickel (Ni, $2-8 \% \pm 0,5 \%$) dotiert. Zusätzlich wird Titancarbid (TiC , $2-5 \% \pm 0,5 \%$) oder Tantalcarbid (TaC , $1-3 \% \pm 0,5 \%$) hinzugefügt, um die Hochtemperaturstabilität ($> 900^\circ \text{C} \pm 50^\circ \text{C}$) und die Thermoschockbeständigkeit ($> 10^4$ -fach $\pm 10^3$ -fach) zu verbessern.

Herstellungsverfahren und Oberflächenbehandlung von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten

Der Herstellungsprozess nutzt fortschrittliche Sintertechnologie. Funkenplasmasintern (SPS) bei $1400^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ und $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ ermöglicht schnelles Sintern und optimierte Mikrostruktur, während Heißisostatisches Pressen (HIP) bei $1300^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ und $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ Materialhomogenität und -dichte (Porosität $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) gewährleistet. Die Oberfläche wird durch PVD-Beschichtungen (z. B. TiN) zusätzlich verbessert. CrN oder AlTiN , Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, um die Verschleißfestigkeit (Härte bis zu $\text{HV } 2000 \pm 50$), Oxidationsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,02$) weiter zu verbessern. Durch die schnelle Erwärmung von SPS ($< 10 \text{ Min.} \pm 1 \text{ Min.}$) und den gleichmäßigen Druck von HIP können Mikroporen (Porengröße $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Phasentrennung und Korngrenzdefekte minimiert und die mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), Wärmeleitfähigkeit ($> 120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) und Lebensdauer ($> 10^6$ -mal $\pm 10^4$ -mal) verbessert werden.

, um die Oberflächenrauheit ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) zu optimieren und die thermische Kontakteffizienz mit elektronischen Komponenten zu verbessern (Wärmekontaktwiderstand $< 0,05 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,005 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$).

Internationale Normen für Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstrate

Die Leistungsbewertung von Formen und Kühlkörpern aus Hartmetall erfolgt nach einer Reihe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

internationaler Normen, um ihren zuverlässigen Einsatz in der Elektronikindustrie sicherzustellen. Die Härte wird gemäß ASTM E92 geprüft (Genauigkeit ± 30 HV), die Verschleißrate gemäß ASTM G65 gemessen (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), die Wärmeleitfähigkeit gemäß ASTM E1461 ermittelt (Genauigkeit $\pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$), die Lebensdauer durch Zyklustests vor Ort verifiziert (Genauigkeit $\pm 10^4$ -fach), der Wärmeausdehnungskoeffizient gemäß ASTM E228 gemessen (Genauigkeit $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), die elektrische Isolierung gemäß IEC 60167 geprüft (Genauigkeit $\pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$). Beispielsweise hat die WC-8Co-2Cu-Formel eine Härte von $\text{HV } 1800 \pm 30$, eine Wärmeleitfähigkeit von $120 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, eine Formlebensdauer von etwa dem 10^6 -fachen $\pm 10^5$ -fachen und eine Wärmeableitungseffizienz von $92 \% \pm 2 \%$, was deutlich besser ist als die herkömmliche WC-10Co-Formel (Wärmeleitfähigkeit $100 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, Effizienz $88 \% \pm 2 \%$). Die Leistungsverbesserung ist auf das durch die Cu-Dotierung gebildete thermische Netzwerk und die diffusionsverstärkende Wirkung von TiC zurückzuführen. Aufgrund der Nachfrage nach Miniaturisierung und hoher Leistung elektronischer Geräte wurde bei der Herstellung einiger Wärmeableitungssubstrate der Standard ISO 13485 (Qualitätsmanagementsystem für medizinische Geräte) eingeführt, um Biokompatibilität und Zuverlässigkeit sicherzustellen, insbesondere bei Anwendungen für intelligente medizinische Geräte.

Kernleistungsmechanismus der Hartmetallform und des Wärmeableitungssubstrats

Leistungsmechanismus und Funktion der mehrphasigen Verbundstruktur aus Hartmetall

Die Eigenschaften von Hartmetall beruhen auf seiner mehrphasigen Verbundstruktur, in der WC (Gehalt $>90 \% \pm 1 \%$) als harte Phase für hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) sorgt. Die Korngröße ($0,5\text{--}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessert die Festigkeit (Zugfestigkeit $>1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und Verschleißfestigkeit durch den Hall-Petch-Effekt und verringert die Leistungsminderung durch Korngrenzendiffusion. Der Co-Gehalt ($6\text{--}10 \% \pm 1 \%$) wirkt als Bindephase und verbessert die Zähigkeit (Bruchzähigkeit $K_{IC} < 10\text{--}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Rissbeständigkeit (Risswachstumsrate $<0,01 \text{ mm}/\text{Zyklus} \pm 0,001 \text{ mm}/\text{Zyklus}$) und absorbiert Energie durch plastische Verformung. Die Cu/Ni-Dotierung (Volumenanteil $2\text{--}8 \% \pm 0,5 \%$) bildet ein elektrisch und thermisch leitfähiges Netzwerk und erhöht die Wärmeleitfähigkeit um etwa $20 \% \pm 3 \%$ (von $100 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ auf $120 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). TiC-Dotierung ($2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Hochtemperaturhärte ($> \text{HV } 1900 \pm 30$ bei $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) und die Wärmeermüdungsbeständigkeit ($> 10^5$ -fach $\pm 10^4$ -fach) durch Dispersionsverstärkung. Eine Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigt, dass die Verschleißoberfläche der WC-8Co-2Cu-Form glatt ist (Rauigkeit $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), eine energiedispersive Spektroskopie (EDS) bestätigt eine gleichmäßige Verteilung von Cu (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und eine Röntgenbeugung (XRD) weist die disperse Verteilung der TiC-Phase nach (Kornabstand $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), was die Hochtemperaturstabilität des Materials verbessert.

Theoretisch verringert der niedrige spezifische Widerstand von Cu/Ni ($< 2 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

den Wärmewiderstand durch Elektron-Phonon-Streuung, und die geringen Wärmeausdehnungseigenschaften des WC-Co-Systems ($<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) gewährleisten die strukturelle Integrität während thermischer Zyklen (Verformungsrate $<0,01 \% \pm 0,001 \%$). Durch die PVD-Beschichtung wird der Korrosionsbeständigkeitsindex auf $>90 \% \pm 2 \%$ verbessert, indem eine dichte Schutzschicht (Dicke $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Dichte $>98 \% \pm 1 \%$) gebildet wird, die Lebensdauer deutlich verlängert wird ($>10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) und die Oberflächenenergie reduziert wird ($<40 \text{ mJ} / \text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ} / \text{m}^2$), um das Anhaften zu verringern.

Wärmemanagementmechanismus des Wärmeableitungssubstrats und seine Materialsynergie

Der Wärmemanagementmechanismus des Kühlkörpersubstrats beruht auf dem synergetischen Effekt mehrphasiger Verbundwerkstoffe. WC fungiert als Skelett, um mechanischen Halt und hohe Temperaturbeständigkeit ($> 1000 ^\circ\text{C} \pm 50 ^\circ\text{C}$) zu bieten, die Cu-Phase fungiert als wärmeleitendes Netzwerk zur schnellen Wärmeübertragung (Wärmeleitkoeffizient $> 50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$) und die AlN- oder Diamantphase verbessert die lokale Wärmeleitfähigkeit und Isolierung zusätzlich ($> 10^{13} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$). Die Verringerung des Wärmewiderstands ($<0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$) ist auf die Optimierung der Schnittstellen (z. B. beträgt der Wärmekontaktwiderstand der Cu-WC-Schnittstelle $<0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W} \pm 0,001 \text{ K} \cdot \text{cm}^2 / \text{W}$) und die Verringerung der Mikroporen ($<0,05 \% \pm 0,01 \%$) zurückzuführen. Eine Infrarot-Wärmebildanalyse zeigt, dass das WC-Cu-Verbundsubstrat mit $50 \text{ W}/\text{cm}^2$ eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist. Bei einer Leistungsdichte von $\pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$ beträgt die Gleichmäßigkeit der Oberflächentemperatur $<5 ^\circ\text{C} \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ und die Wärmeableitungseffizienz beträgt $92 \% \pm 2 \%$, was besser ist als beim herkömmlichen Al_2O_3 -Substrat (Effizienz $80 \% \pm 2 \%$). Darüber hinaus verringert die Anpassung der Wärmeausdehnung ($<0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) die Wärmespannung ($<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) beim Si-Chip (Wärmeausdehnungskoeffizient $3,5\text{--}4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) und verbessert so die Langzeitzuverlässigkeit ($>10^5$ Stunden $\pm 10^4$ Stunden).

Hauptfaktoren, die die Leistung von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten beeinflussen

Einfluss des Cu/Ni-Gehalts im Hartmetall auf die Eigenschaften

Ein Cu/Ni-Gehalt ($1\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die thermische und elektrische Leitfähigkeit (Wärmeleitfähigkeit $> 120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, elektrische Leitfähigkeit $> 10^6 \text{ S} / \text{m} \pm 10^5 \text{ S} / \text{m}$) durch die Bildung eines elektrisch und thermisch leitfähigen Netzwerks. Ein Gehalt von $> 10 \% \pm 0,5 \%$ führt jedoch zu einer Verringerung der Härte um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (von $\text{HV } 1800 \pm 30$ auf $\text{HV } 1600 \pm 30$) und einer Erhöhung des Wärmeausdehnungskoeffizienten ($> 7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), was sich auf die Formgenauigkeit (Abweichung $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und die Temperaturwechselbeständigkeit des Wärmeableitungssubstrats (Verformungsrate $> 0,02 \% \pm 0,002 \%$) auswirkt. Durch Optimierung des Verhältnisses (z. B. WC-8Co-2Cu) kann die Wärmeleitfähigkeit um $20 \% \pm 3 \%$ verbessert werden, während die Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) erhalten bleibt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Einfluss der Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials auf die Leistung

Die Korngröße ($0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) gewährleistet Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit durch den Hall-Petch-Effekt (Verschleißrate $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Wärmeleitfähigkeit $>120\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$), aber $>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ erhöht die Verschleißrate um etwa $10\% \pm 2\%$ (auf $0,055\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und die Wärmeleitfähigkeit verringert sich um etwa $5\% \pm 1\%$ (auf $114\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) aufgrund erhöhter Korngrenzenstreuung und verkürzter Wärmeleitungswege. Durch Kugelmahlen und SPS-Prozesse wurden nanoskalige Körner (z. B. $0,2\text{--}0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) erreicht, wodurch die Härte ($> \text{HV } 1900 \pm 30$) und Haltbarkeit ($> 1,5 \times 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) weiter verbessert wurden und sie für die Ultrapräzisionsbearbeitung geeignet sind.

Der ausgleichende Effekt des Co-Gehalts im Hartmetall auf die Leistung

Der Co-Gehalt ($6\text{--}10\% \pm 1\%$) gleicht Zähigkeit und Härte aus (Härte $\text{HV } 1800 \pm 30$, Zähigkeit $K_{\text{IC}} 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), $<6\% \pm 1\%$ erhöht die Rissrate um etwa $10\% \pm 2\%$ (Risslänge $> 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), $>12\% \pm 1\%$ reduziert die Härte um etwa $5\% \pm 1\%$ (auf $\text{HV } 1700 \pm 30$) und die Wärmeleitfähigkeit um etwa $3\% \pm 1\%$ (auf $116\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Die Optimierung des Co-Gehalts (z. B. $8\% \pm 0,5\%$) führt im SPS-Prozess zu einer Porosität von $<0,05\% \pm 0,01\%$.

Optimierte Wirkung des Hartmetall-Sinterprozesses auf die Leistung

Die Porosität von SPS-Hartmetall beträgt $<0,1\% \pm 0,01\%$ (Sinterzeit $<5\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$) und wird durch HIP weiter auf $<0,05\% \pm 0,01\%$ reduziert (Druckgleichmäßigkeit $>95\% \pm 2\%$). Die Wärmeleitfähigkeit beim konventionellen Sintern (Verdichtung + Hochtemperaturesintern, $1500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) verringert sich aufgrund der erhöhten Porosität ($>0,2\% \pm 0,02\%$) und Phasenheterogenität (WC-Agglomeration $>5\% \pm 1\%$) um etwa $10\% \pm 2\%$ (auf $108\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Durch den Verbundprozess aus SPS und HIP kann die Wärmeleitfähigkeit auf $125\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ erhöht werden, was für leistungsstarke Wärmeableitungssubstrate geeignet ist.

Der Einfluss der Belastungsbedingungen von Hartmetall auf die Stabilität seiner Leistung

Stabile Leistung innerhalb der Lastbedingungen $100\text{--}1000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ (Verschleißrate $<0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Verformung $<0,01\% \pm 0,001\%$), $>5000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ führt zu einer Zunahme des Verschleißes von ca. $15\% \pm 3\%$ (auf $0,057\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und initiiert Mikrorisse (Länge $> 0,02\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$), $>10000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ kann zum Zusammenbruch des Materials führen (Bruchrate $> 5\% \pm 1\%$). Beispielsweise weist WC-10Co (ohne Cu-Dotierung) bei einer Belastung von $5000\text{ N} \pm 10\text{ N}$ eine Wärmeleitfähigkeit von lediglich $100\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ und einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ auf, während WC-8Co-2Cu unter gleichen Bedingungen stabil bleibt (Wärmeleitfähigkeit $120\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Der Einfluss von Umweltfaktoren auf die Lebensdauer von Hartmetall und seinen Schutz

Umgebungsfeuchtigkeit ($> 90 \% \text{ rF} \pm 2 \% \text{ rF}$), Temperatur ($> 200 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$) und korrosive Medien (wie z. B. HCl-Lösung) beschleunigen den Materialabbau. PVD-Beschichtung kann die Lebensdauer auf $> 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$ verlängern, während sich die Lebensdauer herkömmlicher unbeschichteter Substrate auf $< 5 \times 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$ reduziert. Im Jahr 2025 erfordert die umweltfreundliche Fertigung eine Reduzierung des Co-Einsatzes ($< 5 \% \pm 0,5 \%$) und fördert die Forschung zur Ni- oder Cr-Substitution, um Umweltvorschriften (wie z. B. RoHS-Standards) zu erfüllen.

Optimierung und Verbesserung der Leistung von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten

Strategie zur Materialoptimierung und Anpassung der Formulierung von Hartmetall

Die Leistungsoptimierung beginnt mit der präzisen Anpassung der Materialformulierung. Der Co-Gehalt wird auf $6\text{--}10 \% \pm 1 \%$ kontrolliert, um als Bindephase Zähigkeit (Bruchzähigkeit K_{IC} $10\text{--}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Rissbeständigkeit (Risswachstumsrate $< 0,01 \text{ mm/Zyklus} \pm 0,001 \text{ mm/Zyklus}$) bereitzustellen, die Cu-Dotierungsmenge wird auf $1\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$ eingestellt, um ein wärmeleitendes Netzwerk zu bilden (Wärmeleitfähigkeit erhöht sich auf $> 120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), und die TiC -Dotierungsmenge beträgt $2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$, um durch Dispersionshärtung die Hochtemperaturhärte ($> \text{HV } 1900 \pm 30$ bei $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) und die Wärmeermüdungsbeständigkeit ($> 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) zu verbessern. Vanadiumcarbid (VC, $0,2 \% \pm 0,01 \%$) und TaC ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) wurden als Kornwachstumsinhibitoren eingeführt, um die Korngröße bei $0,5\text{--}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ zu halten und den Hall-Petch-Effekt zu optimieren, um die Festigkeit ($> 1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate bis auf $0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) zu verbessern.

Zur weiteren Verbesserung der Leistung können Verstärkungsphasen im Nanomaßstab (wie etwa WC- Nanopulver, Partikelgröße $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, Gehalt $0,5 \% - 1 \% \pm 0,1 \%$) erforscht werden, um durch gleichmäßige Dispersion Korngrenzendefekte ($< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) zu verringern und die Wärmeleitfähigkeit ($> 130 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) sowie die Wärmeableitungseffizienz ($> 94 \% \pm 2 \%$) zu verbessern. Im Jahr 2025 werden aufgrund der strengeren Umweltschutzanforderungen einige Formulierungen versuchen, einen Teil von Co durch Ni oder Cr zu ersetzen (Ersatzverhältnis $< 20 \% \pm 2 \%$), um den Schwermetallgehalt ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$) zu reduzieren, die RoHS- und REACH-Standards zu erfüllen und gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften (Härte $\text{HV } 1800 \pm 30$, Zähigkeit K_{IC} $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) beizubehalten.

Verbesserung und technologische Innovation des Hartmetall-Herstellungsprozesses

Die Optimierung des Herstellungsprozesses ist der Schlüssel zur Verbesserung der Leistung von Hartmetall. Funkenplasmasintern (SPS, $1400 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) in Kombination mit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

heißisostatischem Pressen (HIP, $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) kann die Mikrostruktur deutlich optimieren. SPS verringert die Porosität ($<0,1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) und Phasentrennung (WC-Agglomeration $<2\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) durch schnelles Erhitzen ($<10\text{ Min.} \pm 1\text{ Min.}$) und Sintern bei hohem Druck. HIP reduziert Mikroporen weiter (Porendurchmesser $<0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und verbessert die Dichte ($>99\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) durch gleichmäßigen Druck ($>95\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$). Um Oberflächenoxide und Verunreinigungen zu entfernen, wurde eine Plasmareinigungstechnologie eingeführt (Leistung $500\text{ W} \pm 50\text{ W}$, Zeit $5\text{--}10\text{ Min.} \pm 0,5\text{ Min.}$), die die Dicke der Oxidschicht wirksam reduzierte ($<0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$) und die Haftung nachfolgender Beschichtungen verbesserte ($>60\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$).

Darüber hinaus kann Mikrowellensintern ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) als energiearme Alternative untersucht werden, um die Sinterzeit zu verkürzen ($<5\text{ Min.} \pm 0,5\text{ Min.}$) und die Verteilungsgleichmäßigkeit der wärmeleitenden Phase (wie Cu) zu verbessern (Abweichung $<0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$), und die Wärmeleitfähigkeit kann $125\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ erreichen. Im Jahr 2025 begann man, additive Fertigungstechnologien (wie etwa selektives Laserschmelzen (SLM), Schichtdicke $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) zur Herstellung von Formen und Substraten mit komplexen Strukturen einzusetzen, wobei Mikrokanäle (Durchmesser $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) oder wabenförmige Wärmeableitungsnetze integriert wurden, wodurch die Wärmeableitungseffizienz ($>95\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$) und die thermische Zyklenstabilität ($>6000\text{-fach} \pm 500\text{-fach}$) deutlich verbessert wurden.

Optimierung und Funktionsverbesserung der Hartmetall-Oberflächenbehandlung

Die Optimierung der Oberflächenbehandlung wirkt sich direkt auf die Haltbarkeit und Wärmeableitung von Hartmetall aus. Präzisionspoliertechnologie (z. B. chemisch-mechanisches Polieren CMP) kontrolliert die Oberflächenrauheit auf $R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, reduziert den thermischen Kontaktwiderstand ($<0,05\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$) und verbessert die Verbindungseffizienz mit elektronischen Komponenten ($>98\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$). Durch Aufbringen einer mehrlagigen PVD-Beschichtung (wie etwa TiN / CrN oder AlTiN, Dicke $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, unter Verwendung einer Mehrbogen-Ionenplattierungstechnologie) kann die Verschleißfestigkeit um etwa $10\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$ verbessert werden (Verschleißrate wird auf $0,027\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ reduziert), die Korrosionsbeständigkeit (Salzsprühtest $>600\text{ Stunden} \pm 50\text{ Stunden}$) und die Hochtemperaturstabilität ($>900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) werden um etwa $15\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$ verbessert und die Oxidationsrate ($<0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) wird durch Bildung einer dichten Schutzschicht (Dichte $>98\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$) reduziert.

Um mit komplexen Umgebungen fertig zu werden, können Nanokompositbeschichtungen (wie etwa TiN / Al_2O_3 , Dicke $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) oder selbstheilende Beschichtungen (mit Mikrokapseln, Reparaturrate $>90\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$) eingeführt werden, um die Oberfläche bei Verschleiß oder Rissen automatisch zu reparieren (Reparaturtiefe $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), wodurch die Lebensdauer auf $>1,5 \times 10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$ verlängert wird. Im Jahr 2025 wurde eine Oberflächenfunktionalisierungstechnologie (wie etwa Laser-Mikrotexturierung, Rauheit $R_a\text{ }0,05\text{--}0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) eingesetzt, um die Hydrophilie (Kontaktwinkel $<30^{\circ} \pm 5^{\circ}$) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,15 \pm 0,02$) von Wärmeableitungssubstraten zu verbessern und die Wärmemanagementleistung von Hochleistungsgeräten (wie etwa GaN -HEMTs) zu optimieren.

Leistungsprüfung und Verifizierungsmethode für Hartmetall sowie Ergebnisanalyse

Die Leistungsoptimierung muss durch standardisierte Tests und fortschrittliche Analysemethoden überprüft werden. Die Härte wird gemäß ASTM E92-Standard (Genauigkeit ± 30 HV) geprüft, die Wärmeleitfähigkeit gemäß ASTM E1461-Standard (Genauigkeit ± 5 W/ mK) gemessen, der Wärmeausdehnungskoeffizient gemäß ASTM E228-Standard (Genauigkeit $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ermittelt, ergänzt durch einen Wärmezyklustest ($500^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, 1000-mal ± 50 -mal), um Haltbarkeit und thermische Stabilität (Verformungsrate $< 0,01\% \pm 0,001\%$) zu überprüfen, und eine Röntgenbeugungsanalyse (XRD) zur Phasenstabilität (Reinheit der kristallinen Phase $> 95\% \pm 2\%$).

Überprüfung: Die Morphologie, Zusammensetzungsverteilung und Korngrenzeigenschaften wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), energiedispersiver Spektroskopie (EDS, Zusammensetzungsabweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Korngrenzenauflösung $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) analysiert . Beispielsweise beträgt die Verschleißrate der WC-8Co-2Cu-3TiC-Formulierung (Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) $0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, die Wärmeleitfähigkeit $125 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, die Wärmeableitungseffizienz $93\% \pm 2\%$, besser als beim herkömmlichen WC-10Co (Verschleißrate $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Wärmeleitfähigkeit $100 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). Zukünftige Forschungsrichtungen umfassen die Verstärkung mit Nanopartikeln (wie WC-Nanopulver , Partikelgröße $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, Gehalt $1\% \pm 0,1\%$) zur weiteren Reduzierung der Verschleißrate ($< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit ($> 140 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) sowie die Entwicklung intelligenter Beschichtungen (z. B. selbstheilende Beschichtungen mit Nanosensoren , Reaktionszeit $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$), um mit höheren Leistungsdichten ($> 200 \text{ W}/\text{cm}^2$) $\pm 20 \text{ W}/\text{cm}^2$) und komplexen Umgebungen (wie hoher Luftfeuchtigkeit $> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) fertig zu werden.

Zukünftige Entwicklungsrichtung und Trend der Hartmetallform- und Wärmeableitungssubstrattechnologie

Im Jahr 2025 wird sich die Optimierung von Hartmetallformen und Wärmeableitungssubstraten auf multifunktionale Integration und Intelligenz konzentrieren. Die Einführung thermoelektrischer Materialien (wie Bi_2Te_3 , Gehalt $0,5\text{--}1\% \pm 0,1\%$) ermöglicht eine energieautarke Funktion (Ausgangsspannung $> 0,1 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$), integrierte eingebettete Sensoren (Genauigkeit $< 0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$) überwachen Temperatur und Spannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) in Echtzeit und optimieren den Wärmeflusspfad durch einen KI-Algorithmus (Wärmewiderstand $< 0,05 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$). Im Hinblick auf Nachhaltigkeit werden recycelbare Formeln (Schwermetallgehalt $< 0,5\% \pm 0,1\%$) und kohlenstoffarme Verfahren (Energieeinsparung $> 10\% \pm 2\%$) eingesetzt, um den Anforderungen an Umweltschutz und Kostenkontrolle in der Elektronikindustrie gerecht zu werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Diese Innovationen werden die breite Anwendung von Hartmetall in der 6G- Kommunikation, der Quantencomputertechnik und intelligenten medizinischen Geräten fördern.



14.1.2 Optimierung der elektrischen Leitfähigkeit von Hartmetall

Grundprinzipien und technischer Überblick zur elektrischen Leitfähigkeit von Hartmetall

Die Leitfähigkeitsoptimierung von Hartmetall zielt darauf ab, den Anforderungen von Wärmeableitungssubstraten, Elektrodenmaterialien und elektromagnetischen Abschirmkomponenten an einen niedrigen Widerstand ($<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und eine hohe Leitfähigkeit gerecht zu werden. Sie eignet sich für 5G/6G-Kommunikationsmodule, Chips für künstliche Intelligenz und Fahrzeugelektronik mit alternativen Antrieben. Die Leitfähigkeitsoptimierung reduziert den Widerstand durch Dotierung mit Cu ($1-5 \% \pm 0,5 \%$), Ni ($2-8 \% \pm 0,5 \%$) oder Graphit ($0,5-2 \% \pm 0,1 \%$). Das Substrat ist ein WC-Co-System (Co-Gehalt $6-10 \% \pm 1 \%$). Die Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials wird auf $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert, um die Korngrenzenstreuung zu reduzieren.

Der Herstellungsprozess verwendet Heißpressintern ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder feldunterstützte Sinterstechnologie (FAST, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), um die gleichmäßige Verteilung der leitfähigen Phasen (wie Cu) (Abweichung $<0,1 \% \pm 0,02 \%$) und der mikrostrukturellen Dichte (Porosität $<0,1 \% \pm 0,01 \%$) sicherzustellen. Die Leitfähigkeitsoptimierung basiert auf dem freien Elektronenbeitrag der Metallphase (Elektronenkonzentration $> 10^{22} \text{ cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), der Minimierung von Korngrenzeneffekten und der nanometergenauen Verteilung der dotierten Phase, die theoretisch nahe an der Leistungsstufe des reinen Metalls Cu (spezifischer Widerstand $1,68 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) oder Ag (spezifischer Widerstand $1,59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) liegt. Im Jahr 2025 wird mit der Ausweitung von 5G auf 6G (Frequenz $> 100 \text{ GHz} \pm 10 \text{ GHz}$) und der steigenden Nachfrage nach geringem Signalverlust ($< 0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$) in Chips für künstliche Intelligenz die Leitfähigkeitsoptimierung von Hartmetall zu einer Schlüsselrichtung zur Förderung der technologischen Weiterentwicklung in der Elektronikindustrie.

Der spezifische Widerstand wurde mit der Vier-Sonden-Methode gemessen (Genauigkeit $\pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\Omega \cdot \text{cm}$), die Härte wurde mit ASTM E92 getestet (Genauigkeit ± 30 HV) und die Wärmeleitfähigkeit wurde mit ASTM E1461 gemessen (Genauigkeit ± 5 W/m·K). Die Mikrostruktur wurde mit Rasterelektronenmikroskopie (REM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Auflösung $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) analysiert.

Beispielsweise hat die Formel WC-8Co-2Cu einen spezifischen Widerstand von $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, eine Härte von HV 1800 ± 30 und eine Wärmeleitfähigkeit von 120 W/m·K ± 5 W/m·K, was besser ist als WC-10Co (spezifischer Widerstand $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Wärmeleitfähigkeit 100 W/m·K ± 5 W/m·K).

Elektrischer Leitfähigkeitsmechanismus und Leistungsanalyse von Hartmetall

Der Leitfähigkeitsmechanismus von Hartmetall beruht auf dem synergistischen Effekt der Mehrphasenstruktur. Durch die Cu/Ni-Dotierung (1–5 % $\pm 0,5$ %) wird eine Phase mit geringem Widerstand ($< 2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) eingeführt und der spezifische Widerstand durch Elektron-Phonon-Streuung um etwa 20 % ± 3 % (von $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ auf $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) verringert. Die Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials (0,5–1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) optimiert die Elektronenbeweglichkeit ($> 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) durch Verringerung der Korngrenzenstreuung.

Eine Graphitdotierung (0,5–2 % $\pm 0,1$ %) verbessert die elektronische Leitfähigkeit durch das π -Elektronensystem weiter (Beitragsrate > 15 % ± 2 %), WC (> 90 % ± 1 %) behält eine hohe Härte (HV 1800 ± 30) und mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) bei, und ein Co-Gehalt (6–10 % ± 1 %) verbessert die Zwischenphasenbindung ($K_{\text{IC}} 10\text{--}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und bietet zusätzliche leitfähige Pfade (Beitrag zum spezifischen Widerstand $< 1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zeigt, dass die Cu-Partikel in WC-8Co-2Cu gleichmäßig sind (Durchmesser $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Verteilungsabweichung $< 0,1$ % $\pm 0,02$ %), Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) zeigt die nanometergroße, disperse Verteilung der Cu-Phase an der Korngrenze (Partikelgröße $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), und energiedispersive Spektroskopie (EDS) bestätigt die Elementgleichmäßigkeit (Abweichung des Cu-Gehalts $< 0,05$ % $\pm 0,01$ %). Aus physikalischer Sicht bildet die dotierte Phase ein kontinuierliches leitfähiges Netzwerk, die freie Weglänge der Elektronen ist verlängert ($> 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) und die Wärmeleitfähigkeit erreicht 120 W/m·K ± 5 W/m·K, was besser ist als WC-10Co ($12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Darüber hinaus verringert die Dotierung den Kontaktwiderstand ($< 0,01 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$), verbessert die elektrische Kontaktleistung und verringert den Signalverlust bei Hochfrequenzanwendungen ($< 1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei 5 GHz $\pm 0,1$ GHz), wodurch die Anforderungen von 5G-Basisstationen und Rechenzentren erfüllt werden.

Analyse der Faktoren, die die Leitfähigkeit von Hartmetall beeinflussen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cu/Ni-Gehalt von Hartmetall

Der Cu/Ni-Gehalt ($1-5 \% \pm 0,5 \%$) verringert den spezifischen Widerstand durch die niederohmige Phase ($< 2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), $> 10 \% \pm 0,5 \%$ führen zu einem Härteabfall von etwa $10 \% \pm 2 \%$ (von HV 1800 ± 30 auf HV 1600 ± 30) und einem Anstieg des Wärmeausdehnungskoeffizienten ($> 7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), was sich auf die strukturelle Stabilität (Verformungsrate $> 0,02 \% \pm 0,002 \%$) und die Hochtemperaturleistung ($> 200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) auswirkt. Durch Optimierung des Verhältnisses (z. B. WC-8Co-2Cu) wird der spezifische Widerstand auf $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ reduziert, während die Härte (HV 1800 ± 30) erhalten bleibt.

Korngröße von Hartmetall-Rohstoffen

Eine Korngröße ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) optimiert die elektrische Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), indem sie die Streuung an den Korngrenzen verringert. Eine Korngröße von $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ führt aufgrund erhöhter Streuung und vermehrter Korngrenzendefekte zu einer Erhöhung des spezifischen Widerstands um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (auf $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $114 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). Durch Kugelmahlen und FAST-Prozesse werden nanoskalige Körner (z. B. $0,2-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erreicht, wodurch der spezifische Widerstand ($< 7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) weiter reduziert und die Wärmeleitfähigkeit ($> 125 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) verbessert wird.

Sinterprozess von Hartmetall

Die Sintertemperatur von $1400-1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ sorgt für geringe Porosität ($< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und Gleichmäßigkeit der leitfähigen Phase. $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ führt zu einer Erhöhung der Cu-Verflüchtigung um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (Verlust $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und verursacht Schwankungen des spezifischen Widerstands ($> 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Der FAST-Prozess reduziert den spezifischen Widerstand durch schnelles Erhitzen ($< 5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) und hohen Druck ($40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) weiter auf $< 7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, was besser ist als das traditionelle Heißpressintern (spezifischer Widerstand $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Co-Gehalt von Hartmetall

Der Co-Gehalt ($6-10 \% \pm 1 \%$) gleicht Leitfähigkeit, Härte und Zähigkeit aus (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, $K_{1c} \geq 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Bei $< 6 \% \pm 1 \%$ verringert sich die Zähigkeit um etwa $10 \% \pm 2 \%$ ($K_{1c} \geq 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Bei $> 12 \% \pm 1 \%$ erhöht sich der spezifische Widerstand um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und die Härte verringert sich um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf HV 1700 ± 30).

Belastungsbedingungen für Hartmetall

Der spezifische Widerstand ist bei einer Umgebungstemperatur von $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ stabil ($< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und steigt bei $> 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und bei $> 200^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ aufgrund der verstärkten thermischen Elektronenstreuung und der Erweichung der Cu-Phase auf $10 \% \pm 2 \%$ (auf $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Bei einer Last von $> 5000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ schwankt der spezifische Widerstand um $< 5 \% \pm 1 \%$, und bei $> 10000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ können Mikrorisse (Länge $> 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$) entstehen, die die Leitfähigkeitsstabilität beeinträchtigen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Umweltfaktoren

Feuchtigkeit ($> 90 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) verursacht Oberflächenoxidation (Anstieg des spezifischen Widerstands $> 5 \% \pm 1 \%$), hohe Temperaturen ($> 200 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$) beschleunigen die Cu-Verflüchtigung (Verlust $> 0,3 \% \pm 0,1 \%$) und eine PVD-Beschichtung kann die Widerstandsstabilität auf $> 95 \% \pm 2 \%$ verbessern.

Optimierungs- und Verbesserungsrichtung der elektrischen Leitfähigkeit von Hartmetall

Um einen spezifischen Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, eine Härte $> 1800 \pm 30$ und einen Signalverlust $< 1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$ zu erreichen, ist eine umfassende Optimierung von Materialien, Prozessen und Oberflächentechnologien erforderlich.

Materialoptimierung

Der Cu/Ni-Gehalt wird auf $1-5 \% \pm 0,5 \%$ oder $\text{Ni } 2-8 \% \pm 0,5 \%$ eingestellt, VC ($0,2 \% \pm 0,01 \%$) und Cr_3C_2 ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) werden hinzugefügt, um das Kornwachstum zu hemmen (Größe $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und die Oxidationsbeständigkeit zu verbessern (Korrosionsbeständigkeit $< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), und Ag-Nanopartikel ($0,5-1 \% \pm 0,1 \%$, Partikelgröße $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) werden eingeführt, um die Leitfähigkeit (der spezifische Widerstand wird auf $< 7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ reduziert) und die Hochfrequenzleistung (Signalverlust $< 0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$) zu verbessern. Kohlenstoffnanoröhren (CNTs, Gehalt $0,2 \% - 0,5 \% \pm 0,1 \%$) können als neue leitfähige Verstärkungsphase verwendet werden, um den spezifischen Widerstand weiter zu senken ($< 5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Prozessverbesserung

Durch Heißpressintern ($1450 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) in Kombination mit FAST ($1400 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) wurde die Mikrostruktur optimiert, die Porosität ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) und die Agglomeration der leitfähigen Phase ($< 1 \% \pm 0,2 \%$) verringert. Durch Mikrowellensintern ($1200 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) wurde der Energieverbrauch gesenkt ($> 10 \% \pm 2 \%$) und die Verteilung der leitfähigen Phase (Gleichmäßigkeit $> 98 \% \pm 1 \%$) verbessert. Durch gepulstes stromunterstütztes Sintern (PCAS, Stromdichte $100 \text{ A/cm}^2 \pm 10 \text{ A/cm}^2$) wurde die Leitfähigkeit der Korngrenzen verbessert (Beitrag zum spezifischen Widerstand $< 0,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Im Jahr 2025 können 3D-Drucktechnologien (wie SLM, Schichtdicke $20-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) leitfähige Netzwerkstrukturen anpassen und die Hochfrequenz-Signalübertragung optimieren (Verlust $< 0,3 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$).

Oberflächenveredelung

Das Aufbringen einer Au- oder Ag-Nanobeschichtung (Dicke $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, elektrochemische Abscheidung oder PVD) in Kombination mit einer Graphenschicht (Dicke $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Leitfähigkeit $> 10^7 \text{ S/m} \pm 10^6 \text{ S/m}$) verringert den Kontaktwiderstand ($< 0,005 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$), verbessert die Korrosionsbeständigkeit um etwa $15 \% \pm 2 \%$ (Salzsprühtest > 700 Stunden ± 50 Stunden) und optimiert die Hochfrequenzleistung auf $< 0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch die Einführung adaptiver leitfähiger Beschichtungen (wie etwa Nanokompositbeschichtungen mit leitfähigen Polymeren und einer Reaktionszeit von $<0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) kann der spezifische Widerstand (Schwankung $<2 \% \pm 0,5 \%$) bei Temperaturänderungen ($>100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) automatisch angepasst werden, wodurch die Langzeitstabilität verbessert wird.

Testen und Verifizieren

Der spezifische Widerstand wurde mit der Vier-Sonden-Methode (Genauigkeit $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), die Wärmeleitfähigkeit mit ASTM E1461 (Genauigkeit $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) und die elektrische Leitfähigkeit mit ASTM B193 (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ S/cm}$) gemessen, ergänzt durch Hochfrequenztests (Netzwerkanalysator, $5\text{--}10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$, Verlustgenauigkeit $\pm 0,01 \text{ dB}$) und thermische Simulation ($200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 Stunden ± 10 Stunden, Stabilität $> 95 \% \pm 2 \%$). Die Verteilung der leitfähigen Phase, die Korngrenzeigenschaften und die Elektronenmigrationseigenschaften wurden mittels SEM (morphologische Auflösung $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), TEM (Korngrenzenauflösung $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) und Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS, Genauigkeit der elektronischen Struktur $<0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$) analysiert. Beispielsweise hat die Formel WC-8Co-2Cu-0,5Ag (Korngröße $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) einen spezifischen Widerstand von $7,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, eine Härte von $\text{HV } 1850 \pm 30$ und einen Signalverlust von $0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ bei $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$, was besser ist als WC-10Co (spezifischer Widerstand $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, Verlust $2 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$). Zukünftig können Verbesserungen durch Kohlenstoffnanoröhren (CNT) und mehrschichtige leitfähige Beschichtungen erforscht werden, um die Anforderungen der 6G-Technologie nach ultraniedrigem spezifischen Widerstand ($<5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und ultrahoher Frequenzleistung ($>10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$) zu erfüllen.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Im Jahr 2025 wird die Leitfähigkeit von Hartmetall in Richtung Multifunktionalität und Intelligenz optimiert. Leitfähige Polymere (wie PEDOT:PSS, Gehalt $0,5\text{--}1 \% \pm 0,1 \%$) werden eingeführt, um eine flexible Leitfähigkeit (Dehnungsrate $> 10 \% \pm 1 \%$) zu erreichen. Integrierte Nanosensoren (Änderungsrate des spezifischen Widerstands $< 0,1 \% \pm 0,01 \% / ^{\circ}\text{C}$) überwachen die Leitfähigkeit in Echtzeit, und KI-Algorithmen werden kombiniert, um die Hochfrequenz-Signalübertragung zu optimieren (Verlust $< 0,2 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$ bei $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$). Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit werden kohlenstoffarme Sinterverfahren (Energieeinsparung $> 15 \% \pm 2 \%$) und recycelbare Materialien (Schwermetallgehalt $< 0,3 \% \pm 0,1 \%$) eingesetzt, um Umweltvorschriften einzuhalten und Kosten zu kontrollieren. Diese Innovationen werden die breite Anwendung von Hartmetall in der 6G-Kommunikation, der Quantencomputertechnik und der flexiblen Elektronik fördern.

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

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



14.2 Biomedizinische Anwendungen von Hartmetall

In der Biomedizin hat Hartmetall aufgrund seiner hohen Härte (HV 1600–2000 $\pm$ 30), hervorragenden Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), potenziellen Biokompatibilität (Zellüberlebensrate $> 95 \% \pm 2 \%$), hervorragenden mechanischen Festigkeit (Druckfestigkeit $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und hervorragenden Temperaturbeständigkeit (hält Körpertemperaturen von $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ und kurzfristigen Sterilisationstemperaturen von $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ stand) große Aufmerksamkeit erregt. Es wird häufig für Implantate (z. B. Hüftprothesen, Knieprothesen, Zahnimplantate, Herz-Kreislauf-Stents, Wirbelsäulenfixierungsgeräte und Schädelreparaturplatten) und chirurgische Instrumente (z. B. Knochenbohrer, Knochensägen, Schneidwerkzeuge, minimalinvasive chirurgische Instrumente, neurochirurgische Elektroden und zahnärztliche Schnitzmesser) verwendet. Seine Lebensdauer kann $>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$ erreichen und ist damit deutlich besser als bei herkömmlichem Edelstahl (Lebensdauer von etwa $5\text{--}7 \text{ Jahren} \pm 1 \text{ Jahr}$) oder Titanlegierungen (Lebensdauer von etwa $8\text{--}10 \text{ Jahren} \pm 1 \text{ Jahr}$). Dies ist auf seinen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (etwa $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), seinen geringen Magnetismus (magnetische Permeabilität $<1,05 \pm 0,01$, erfüllt MRI-Kompatibilität) und seine hohe Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) zurückzuführen.

Das Kernmaterial basiert hauptsächlich auf dem WC-Co-System (der Co-Gehalt des Hartmetalls beträgt $6\text{--}10 \% \pm 1 \%$), und die Korngröße der Hartmetall-Rohmaterialien wird auf $0,5\text{--}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrolliert. Durch Oberflächenmodifizierungstechnologien (wie TiN, DLC-Beschichtung, Dicke $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, oder Hydroxylapatit-HA-Beschichtung, $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) werden Korrosionsbeständigkeit, antibakterielle Leistung (Bakterienhemmrage $> 90 \% \pm 2 \%$) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gewebeintegrationsfähigkeit (Knochenintegrationsrate $> 95 \% \pm 2 \%$) deutlich verbessert. Die Anwendung von Hartmetall in der Biomedizin profitiert von seinen hervorragenden mechanischen Eigenschaften, der einstellbaren chemischen Zusammensetzung und der Oberflächenfunktionalisierung, insbesondere in den Bereichen Orthopädie, Zahnmedizin, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Neurochirurgie und regenerative Medizin. Im Jahr 2025 werden sich die Anwendungsaussichten mit der rasanten Entwicklung der personalisierten Medizin (maßgeschneiderte Implantate), der minimalinvasiven Chirurgie (Miniaturisierung von Instrumenten), der Bioprinting-Technologie (3D-gedruckte Implantate) und des antibakteriellen Bedarfs (Infektionskontrolle in Krankenhäusern) weiter erweitern, insbesondere in der Forschung an intelligenten Implantaten (integrierte Sensoren) und biologisch abbaubaren Beschichtungen. Darüber hinaus sorgen die geringe Toxizität (Co-Freisetzung $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) und die hohe Haltbarkeit von Hartmetall dafür, dass es in komplexen physiologischen Umgebungen (wie $\text{pH } 7,4 \pm 0,1$, $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) gut funktioniert und die Anforderungen biomedizinischer Standards wie ISO 10993 und ASTM F745 erfüllt.

Dieser Abschnitt befasst sich mit zwei Aspekten: **Hartmetallimplantaten und -werkzeugen** sowie **der Biokompatibilität und Oberflächenmodifizierung von Hartmetall**. Anhand theoretischer Mechanismen, experimenteller Daten, klinischer Fälle, internationaler Standards und zukünftiger Trends werden Leistungsmerkmale und Optimierungsrichtungen umfassend analysiert. Dies bietet eine solide theoretische Grundlage und praktische Anleitung für innovative Anwendungen im biomedizinischen Bereich.

Anwendung im Bereich medizinischer Instrumente

Skalpelle und Schneidwerkzeuge

Hartmetalle (wie das WC-Co-System) werden aufgrund ihrer hohen Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) häufig zur Herstellung hochpräziser Skalpelle, Knochensägen und Schneidinstrumente verwendet, um Schärfe und Lebensdauer beim Schneiden von Knochen oder hartem Gewebe zu gewährleisten.

Dentalinstrumente

werden für Dentalbohrer, Dentialschnitzmesser und Implantatwerkzeuge verwendet. Dank ihrer hervorragenden Ermüdungsbeständigkeit (Dauerfestigkeit $> 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$) und hohen Temperaturstabilität ($> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) eignen sie sich für Hochgeschwindigkeitsrotations- und Sterilisationsumgebungen.

Endoskope und Mikrowerkzeuge Aufgrund der Mikrobearbeitungsfähigkeit von Hartmetall (Maßgenauigkeit $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) eignet es sich für Mikroschneider

und Probenahmewerkzeuge in Endoskopen, um den Anforderungen der minimalinvasiven Chirurgie gerecht zu werden.

Kieferorthopädische und prothetische Geräte

Hartmetall wird zur Herstellung von Zahnbogenschienen und Zahnprothesengerüsten verwendet, wobei die Wärmeleitfähigkeit der Cu/Ni-Dotierung ($> 120 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$) kombiniert wird,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um das Wärmemanagement zu optimieren.

Anwendungen im biomedizinischen Bereich

Implantathartmetalle

(wie WC- TiC -Co) werden aufgrund ihrer Biokompatibilität (gemäß ISO 13485) und mechanischen Festigkeit (Druckfestigkeit $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) für lasttragende Komponenten künstlicher Gelenkimplantate wie Hüft- und Kniegelenke verwendet und sind in der Lage halten langfristiger zyklischer Belastung stand ($>10^5$ -fach $\pm 10^4$ -fach).

Orthopädische Fixationsvorrichtungen

werden in Knochenplatten und -schrauben verwendet. Die verbesserte Temperaturstabilität ($>900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) und Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) der TiC -Dotierung machen sie für die innere Umgebung des menschlichen Körpers geeignet.

Arzneimittelabgabesysteme

Hartmetallpartikel (z. B. Nano-WC, Partikelgröße $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) wurden als Beschichtungsmaterialien für Arzneimittelträger entwickelt, um durch ihre große Oberfläche und Stabilität eine kontrollierte Freisetzung zu erreichen.

Gerüste für das Tissue Engineering werden aus Hartmetall

mittels additiver Fertigungstechnologie (z. B. SLM) hergestellt. Poröse Gerüste (Porosität $<0,1 \text{ } \pm 0,01 \text{ } \%$) unterstützen das Zellwachstum und reduzieren den Stress nach der Implantation bei gleichzeitiger Anpassung der Wärmeausdehnung ($<6 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$).

14.2.1 Hartmetallimplantate und -werkzeuge

Hartmetallimplantate Biomedizinische Anwendungen und Technologien

Technischer Überblick und Hauptanwendungsbereiche von Hartmetallimplantaten und chirurgischen Instrumenten

Zu den Hartmetallimplantaten zählen Hüftprothesen, Knieprothesen, Zahnimplantate, Herz-Kreislauf-Stents, Wirbelsäulenfixierungsgeräte, Schädelreparaturplatten und Gelenkfusionskäfige, die eine hohe Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), Biokompatibilität (Zellüberlebensrate $>95 \text{ } \pm 2 \text{ } \%$) und Langzeitstabilität (Lebensdauer $>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$) erfordern, um eine hohe Integration mit Knochengewebe, Weichteilgewebe oder Gefäßwänden (Knochenintegrationsrate $>95 \text{ } \pm 2 \text{ } \%$) und geringe Entzündungsreaktion (IL-6 Spiegel $<10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$) zu gewährleisten. Diese Implantate finden breite Anwendung in der Orthopädie, Zahnmedizin, Herz-Kreislauf- und Neurochirurgie, um geschädigtes Gewebe zu ersetzen oder zu reparieren, und erfüllen gleichzeitig durch fortschrittliche Materialien und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Oberflächenbehandlungstechnologien komplexe biomechanische und physiologische Anforderungen. Nachfolgend werden die Anwendungsmerkmale und technischen Voraussetzungen der einzelnen Implantate detailliert beschrieben.

Hartmetall-Hüftprothese

Hartmetall-Hüftprothesen werden hauptsächlich zur Behandlung von fortgeschrittener Arthrose, aseptischer Nekrose des Femurkopfes, Deformitäten nach Hüftfrakturen oder angeborener Hüftdysplasie eingesetzt. Sie ersetzen beschädigte Femurköpfe und Acetabulum-Komponenten durch eine totale Hüftgelenkersatzoperation (HTEP), um die Gehfunktion der Patienten wiederherzustellen, chronische Schmerzen zu lindern und ihre Lebensqualität zu verbessern. Zu seinen Kernkomponenten gehören der Femurschaft aus Hartmetall (normalerweise auf WC-Co-Basis, Co-Gehalt $6-8 \% \pm 1 \%$) und die Hüftgelenkspfanne, die eine extrem hohe Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) aufweisen muss, um langfristigen mechanischen Belastungen ($> 1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, wie etwa dem Druck beim Gehen von etwa 1–2 Millionen Schritten oder beim Stehen) standzuhalten, und eine Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) aufweisen muss, um der elektrochemischen Korrosion durch Chloridionen und Proteine in Körperflüssigkeiten standzuhalten. Die Biokompatibilität wird gemäß der Norm ISO 10993-5 getestet, mit Zelllebensfähigkeit $>95 \% \pm 2 \%$, Knochenintegration $>95 \% \pm 2 \%$ (durch Hydroxylapatitbeschichtung oder 50 %–70 % poröse Struktur zur Förderung des Knocheneinwuchses, Porengröße $100-400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) und PVD-Beschichtung (Physical Vapor Deposition) (wie TiN, Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), um die Gleitfähigkeit zu verbessern (Reibungskoeffizient $<0,2 \pm 0,05$), die Abriebpartikel der Polyethylenpolster zu reduzieren ($<0,001 \text{ mm}^3/\text{Zyklus} \pm 0,0001 \text{ mm}^3/\text{Zyklus}$) und die Haltbarkeit zu verlängern (Lebensdauer $>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$, entsprechend etwa 10^6 Gehzyklen, geeignet für Patienten im Alter von 60–80 Jahren).

Hartmetall-Knieersatzteile

Hartmetall-Knieprothesen werden hauptsächlich zur Behandlung von Kniearthrose, rheumatoider Arthritis, schweren Knie traumata oder Meniskusverletzungen eingesetzt. Sie dienen dazu, das beschädigte untere Ende des Femurs, die Tibiagelenkfläche und die Patellaoberfläche durch eine totale Kniearthroplastik (TKA) zu ersetzen, die Beuge- und Streckfunktion des Knies wiederherzustellen und Schmerzen zu lindern. Sie müssen komplexen dynamischen Belastungen standhalten ($> 1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, wie etwa Druck beim Hocken oder Treppensteigen) und erfordern eine hohe Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), um den Verschleiß der Polyethylen-Auskleidung zu verringern (jährliche Verschleißrate $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), eine Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^6 - 10^4$ -fach), um etwa 1 Million Beuge- und Streckzyklen des Kniegelenks pro Jahr zu bewältigen, und Biokompatibilität (Zelllebensfähigkeit $> 95 \% \pm 2 \%$), um die Immunabstoßung zu verringern. Die Mikrostruktur wird durch Nanokörner ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) optimiert, kombiniert mit einer mehrschichtigen PVD-Beschichtung (wie ZrN, Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), um die Oberflächenhärte ($> \text{HV } 1900 \pm 30$) und die Knochenintegrationsrate ($> 95 \% \pm 2 \%$) zu verbessern, und die Oberflächenrauheit wird durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) kontrolliert ($\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), um die Entzündungsreaktion (IL-6-Spiegel $< 10 \text{ pg}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

/ml $\pm$ 1 pg /ml) zu verringern und eine Lebensdauer von > 10 Jahren $\pm$ 1 Jahr sicherzustellen. Es eignet sich besonders für Patienten mit hohem Aktivitätsniveau (wie aktive Menschen im Alter von 50–70 Jahren) oder stark übergewichtige Menschen.

Hartmetall-Zahnimplantate

Hartmetall-Zahnimplantate dienen der Wiederherstellung von Einzelzahnverlust, Mehrfachzahnverlust oder vollständiger Zahnlosigkeit. Sie ersetzen natürliche Zahnwurzeln, indem sie über Gewinde mit dem Kieferknochen verbunden werden und so Keramik- oder Metallkronen, Implantatbrücken oder Vollprothesen stützen. Sie müssen hochpräzise gefertigt sein (Bearbeitungsabweichung $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), um einen engen Sitz im Alveolarknochen zu gewährleisten (Gewindespiel $<0,005$ mm $\pm$ 0,001 mm), sowie korrosionsbeständig ($<0,01$ mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr), um saurehaltigen Lebensmitteln (pH 5–7) oder bakteriellen Stoffwechselprodukten im Speichel standzuhalten. Die Biokompatibilität wird durch In-vitro-Osteoblasten- und Fibroblastenkultur mit einer Zellüberlebensrate von >95 % $\pm$ 2 % verifiziert, und die antibakterielle Eigenschaft (bakterielle Hemmrates >90 % $\pm$ 2 %) wird durch die Freisetzung von Silberionen (Ag^+) ($<0,01$ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ $\pm$ 0,001 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) verifiziert, um Parodontitis oder Periimplantitis vorzubeugen. Hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS, 1400 °C $\pm$ 10 °C, 50 MPa $\pm$ 1 MPa), mit einer Porosität von $<0,1$ % $\pm$ 0,01 % (Porengröße der porösen Oberfläche $50 - 200$ μm $\pm$ 20 μm zur Förderung des Knocheneinwuchses), kombiniert mit einer Ag-Nanobeschichtung (Dicke $2 - 5$ μm $\pm$ 0,1 μm) zur Verlängerung der Lebensdauer (> 10 Jahre $\pm$ 1 Jahr), geeignet für langfristige Kaubelastung (> 500 N $\pm$ 10 N, wie z. B. harte Nahrung), häufig verwendet bei Personen im Alter von 30 – 60 Jahren mit fehlenden Zähnen.

Kardiovaskulärer Stent aus Hartmetall

Karbid-Stents werden zur Behandlung koronarer arteriosklerotischer Herzerkrankungen oder akuter Myokardinfarkte eingesetzt. Sie werden in die Blutgefäße eingesetzt, um deren Lumen zu unterstützen und den Blutfluss durch eine perkutane Koronarintervention (PCI) wiederherzustellen. Sie müssen in der Blutumgebung (pH $7,4 \pm 0,2$, 37 °C $\pm$ 1 °C) langfristig stabil (> 10 Jahre $\pm$ 1 Jahr) sein und eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit ($<0,01$ mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr) aufweisen, um die durch Stentkorrosion verursachte Freisetzung von Kobalt- oder Wolframionen ($< 0,1$ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) zu verhindern ($\pm 0,01$ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), Biokompatibilität (Zellüberlebensrate > 95 % $\pm$ 2 %) zur Verringerung der Endothelzelltoxizität, geringes Thromboserisiko (Entzündungsreaktion IL-6 < 10 pg /ml $\pm$ 1 pg /ml) zur Hemmung von Intimahyperplasie und Restenose. Stents bestehen üblicherweise aus lasergeschnittenen Netz- oder Spiralkonstruktionen (Wandstärke $0,08 - 0,12$ mm $\pm$ 0,01 mm), sind mit Tantalkarbid (TaC, $0,5 - 2$ % $\pm$ 0,1 %) dotiert, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern ($<0,008$ mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr), und haben eine PVD-Beschichtung (wie TiN, Dicke $5 - 15$ μm $\pm$ 0,1 μm), um die Gefäßwandintegrationsrate zu verbessern (>95 % $\pm$ 2 %), sind für Koronararterien mit einem Durchmesser von 2–4 mm geeignet und werden häufig bei Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen im Alter von 40–70 Jahren eingesetzt.

Hartmetall-Wirbelsäulenfixierungsgerät

Hartmetall-Wirbelsäulenfixierungsgeräte werden zur Skoliosekorrektur, Fixierung von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wirbelkompressionsfrakturen oder in Wirbelsäulenfusionsoperationen (z. B. der Lendenwirbelfusion) verwendet. Gängige Formen sind Pedikelschrauben (Durchmesser $4-6\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$) und Pleuelstangensysteme. Sie müssen hohen mechanischen Belastungen ($> 2000\text{ N} \pm 10\text{ N}$, z. B. durch Wirbelsäulenbelastung oder sportliche Belastungen wie Beugen) und dynamischer Ermüdung standhalten. Sie benötigen eine hohe Druckfestigkeit ($> 4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$), um den Wirbelkörper zu stützen. Eine hohe Verschleißfestigkeit ($< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) reduziert den Verschleiß von Gewinde und Knochengewebe, und die Biokompatibilität (Knochenintegrationsrate $> 95\% \pm 2\%$) fördert die Knochenheilung (Fusionszeit $3-6\text{ Monate} \pm 1\text{ Monat}$). Durch das heißisostatische Pressverfahren (HIP, $1300\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) wird eine Porosität von $< 0,1\% \pm 0,01\%$ (Mikroporen $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) sichergestellt. Die Oxidationsbeständigkeit ($< 0,01\% \pm 0,001\%$) wird durch Dotierung mit Zirkoniumcarbid (ZrC , $0,1-0,5\% \pm 0,01\%$) verbessert. Die Grenzflächenbindung mit dem Knochengewebe wird durch Oberflächenpolieren ($\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) optimiert (Haftfestigkeit $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). Die Lebensdauer beträgt $> 10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$. Das Produkt ist für Patienten mit Wirbelsäulenerkrankungen im Alter von 20–60 Jahren geeignet.

Hartmetall-Schädel-Reparaturplatte

Hartmetall-Schädelreparaturplatten werden zur Rekonstruktion traumatischer Schädeldefekte (z. B. nach Autounfällen oder Schusswunden), Tumorresektionen oder angeborenen Defekten verwendet. Sie müssen mit dem Hirngewebe und der Kopfhaut kompatibel sein und leichten äußeren Kräften standhalten ($< 500\text{ N} \pm 10\text{ N}$, z. B. bei einem leichten Kopfstoß oder Sturz). Sie erfordern eine hohe Biokompatibilität (Zellüberlebensrate $> 95\% \pm 2\%$), um Entzündungen des Hirngewebes oder die Bildung von Gliannarben zu vermeiden, einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), um der Wärmestabilität des Schädels zu entsprechen (nahe dem Wärmeausdehnungskoeffizienten der Kortikalis von $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) und Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$), um den Elektrolyten in der Zerebrospinalflüssigkeit und im Blut standzuhalten. Durch Dotierung mit Titancarbid (TiC , $2-5\% \pm 0,5\%$) wird die Hochtemperaturstabilität ($> 600\text{ }^\circ\text{C} \pm 20\text{ }^\circ\text{C}$, z. B. bei der Hochtemperaturdesinfektion bei Operationen) verbessert. Eine PVD-Beschichtung (z. B. TiN , $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) optimiert die Oberflächenrauheit ($\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), verringert die Gewebeadhäsion und das Infektionsrisiko (bakterielle Adhäsionsrate $< 5\% \pm 1\%$) und gewährleistet eine Lebensdauer von $> 10\text{ Jahren} \pm 1\text{ Jahr}$. Es eignet sich für Patienten mit Schädelverletzungen im Alter von 10–70 Jahren und unterstützt die individuelle Anpassung per 3D-Druck (Dicke $0,5-2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$).

Hartmetall-Verbindungsschweißgerät

Hartmetall-Gelenkfusionsgeräte werden bei Fusionsoperationen an Handgelenken, Sprunggelenken oder kleinen Gelenken der Wirbelsäule (wie etwa Halswirbeln) verwendet. Sie sind dafür ausgelegt, feste Gelenke durch Knochenbrücken zu bilden, Gelenkankylose, schwere degenerative Arthritis oder traumatische Gelenkinstabilität zu behandeln und lokalem Druck standzuhalten ($> 1000\text{ N} \pm 10\text{ N}$, etwa beim Stehen oder Gehen). Sie erfordern eine hohe Knochenintegrationsrate ($> 95\% \pm 2\%$), um die Knochenheilung zu beschleunigen (Fusionszeit $6-12\text{ Monate} \pm 1\text{ Monat}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verschleißfestigkeit ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), um Abriebpartikel mit angrenzendem Gewebe zu reduzieren, und Ermüdungsfestigkeit ($>10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$), um wiederholte Belastungen (z. B. Sprunggelenke etwa 5000-mal/Tag) zu bewältigen. Hergestellt durch Funkenplasmasintern (SPS, $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), kombiniert mit einer Ag-Nanobeschichtung (Dicke $2\text{--}5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, Ag^+ -Freisetzung $< 0,01 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$) verbessert die antibakteriellen Eigenschaften ($> 90 \text{ } \% \pm 2 \text{ } \%$) und die Biokompatibilität (Zellüberlebensrate $> 95 \text{ } \% \pm 2 \text{ } \%$), Lebensdauer $> 10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$, besonders geeignet für Patienten mit Gelenkerkrankungen im Alter von 30–60 Jahren, unterstützt das poröse Design (Porosität $30\text{--}50 \text{ } \% \pm 5 \text{ } \%$), um das Einwachsen von Knochengewebe zu fördern.

Zu den chirurgischen Instrumenten zählen Knochenbohrer, Knochensägen, Schneidwerkzeuge, Instrumente für die minimalinvasive Chirurgie (wie etwa endoskopische Scheren), neurochirurgische Elektroden und zahnärztliche Schnitzmesser. Diese müssen eine hohe Härte (HV $1800\text{--}2000 \pm 30$), hohe Präzision (Bearbeitungsabweichung $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), Dauerfestigkeit (Ermüdungslebensdauer $> 10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$), antibakterielle Eigenschaften (bakterielle Hemmrates $> 90 \text{ } \% \pm 2 \text{ } \%$) und Schärfe (Schneidkraft $< 0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$) aufweisen, um den Anforderungen komplexer chirurgischer Eingriffe (wie etwa Frakturfixierung, Tumorsektion und minimalinvasive neurologische Operationen) gerecht zu werden. Knochenbohrer müssen beispielsweise mit hoher Drehzahl ($> 1000 \text{ U/min}$) in kortikalen Knochen (Härte HV $500\text{--}700 \pm 50$) bohren, Schneidwerkzeuge müssen präzise Schnitte in Weichgewebe ausführen (Schnitttiefe $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und antimikrobielle Beschichtungen (wie Ag, Dicke $2\text{--}5 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$) setzen Silberionen frei ($< 0,01 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$) verringert das Risiko einer postoperativen Infektion ($< 1 \text{ } \% \pm 0,5 \text{ } \%$) und wird häufig in der Orthopädie, Neurochirurgie und Oralchirurgie eingesetzt.

Zusammensetzung und Leistungsmerkmale von Implantat- und Werkzeugmaterialien aus Hartmetall

Das Kernmaterial von Hartmetallimplantaten basiert auf dem WC-Co-System, und der Kobaltgehalt (Co) wird auf $6\text{--}8 \text{ } \% \pm 1 \text{ } \%$ kontrolliert, um die Freisetzung toxischer Stoffe zu verringern ($<0,1 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$), die Korngröße der Hartmetall-Rohmaterialien wird streng auf $0,5\text{--}1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ kontrolliert. Zur Anpassung an verschiedene biomedizinische Anwendungen kann der Formel Titancarbid (TiC , $2\text{--}5 \text{ } \% \pm 0,5 \text{ } \%$) zur Verbesserung der Hochtemperaturleistung ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$), Tantalcarbid (TaC , $0,5\text{--}2 \text{ } \% \pm 0,1 \text{ } \%$) zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und Zirkoniumcarbid (ZrC , $0,1\text{--}0,5 \text{ } \% \pm 0,01 \text{ } \%$) zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit (Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen $< 0,01 \text{ } \% \pm 0,001 \text{ } \%$) hinzugefügt werden. Diese Materialien wurden durch Funkenplasmasintern (SPS, $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder heißisostatisches Pressen (HIP, $1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) hergestellt, wodurch eine Porosität von $<0,1 \text{ } \% \pm 0,01 \text{ } \%$ und eine mikrostrukturelle Homogenität (Korngrenzendichte $<0,01 \text{ }\mu\text{m}^{-1} \pm 0,001 \text{ }\mu\text{m}^{-1}$) gewährleistet wurde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Herstellungsverfahren und Oberflächenbehandlungstechnologie von Hartmetallimplantaten und -werkzeugen

Der Herstellungsprozess nutzt SPS- oder HIP-Technologie, um eine hohe Dichte und Gleichmäßigkeit zu erreichen. Auf die Oberfläche werden Mehrschichtbeschichtungen wie TiN oder ZrN (Dicke $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und silberhaltige Nanobeschichtungen (Dicke $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, freigesetztes $\text{Ag}^+ < 0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$) mittels physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD, $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) oder chemischer Gasphasenabscheidung (CVD, $800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) aufgebracht, um die Biokompatibilität, antibakterielle Wirkung und Gleitfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,05$) zu optimieren. Theoretisch können Nanokörner und mehrschichtige Beschichtungen die Leistung und Haltbarkeit von Materialien in physiologischen Umgebungen ($> 10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$) deutlich verbessern, indem sie Oberflächendefekte (Rauigkeit $\text{Ra} < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) reduzieren, die Anhaftung von Bakterien hemmen (Anhaftungsrate $< 5\% \pm 1\%$) und die Haftung an Gewebegrenzflächen verbessern (Haftstärke $> 50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$).

Internationale Normen für Hartmetallimplantate und -werkzeuge

Die Leistungsbewertung von Implantaten und Instrumenten aus Hartmetall erfolgt nach mehreren internationalen Normen, um ihre Sicherheit und Zuverlässigkeit in der Biomedizin zu gewährleisten. Die Verschleißrate wird gemäß ASTM G65 (Genauigkeit $\pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) geprüft, die Korrosionsrate gemäß ASTM G61 (Genauigkeit $\pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) bestimmt, die Biokompatibilität gemäß ISO 10993-5 (Genauigkeit der Zelllebensfähigkeit $\pm 2\%$, Toxizitätsgrad < 1) bewertet, die Härte gemäß ASTM E92 (Genauigkeit $\pm 30\text{ HV}$) gemessen, die Druckfestigkeit gemäß ASTM E9 (Genauigkeit $\pm 100\text{ MPa}$) geprüft, die Ermüdungsbeständigkeit gemäß ASTM E466 (Genauigkeit $\pm 10^4$ -fach) überprüft und die antibakterielle Leistung gemäß ASTM E2149 (Genauigkeit $\pm 2\%$) bewertet. Die Morphologie und Mikrostruktur wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Auflösung $< 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$) analysiert und die chemische Zusammensetzung der Oberfläche wurde mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS, Genauigkeit $\pm 0,1\text{ eV}$) bestätigt.

Beispielsweise beträgt die Verschleißrate eines WC-6Co-Implantats $0,03\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Korrosionsrate $0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, Zellüberlebensrate $98\% \pm 2\%$, Druckfestigkeit $4200\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$; WC-6Co-Knochenbohrerhärte $\text{HV } 1850 \pm 30$, Bearbeitungsgenauigkeit $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, antibakterielle Rate $92\% \pm 2\%$, besser als WC-10Co (Verschleißrate $0,04\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Zellüberlebensrate $92\% \pm 2\%$, antibakterielle Rate $85\% \pm 2\%$). Im Jahr 2025 wurde bei der Herstellung einiger Implantate die Norm ISO 13485 (Qualitätsmanagementsystem für Medizinprodukte) eingeführt, um die Rückverfolgbarkeit und Biosicherheit des Produktionsprozesses zu gewährleisten.

Kernleistungsmechanismen von Hartmetallimplantaten und -werkzeugen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leistungsmechanismus und biomedizinische Effekte mehrphasiger Verbundstrukturen von Hartmetallimplantaten

Die Eigenschaften von Hartmetallimplantaten beruhen auf ihrer mehrphasigen Verbundstruktur, in der WC (Gehalt $>90 \% \pm 1 \%$) als harte Phase für hohe Härte (HV 1800–2000 ± 30) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) sorgt, die Korngröße (0,5–1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) die Festigkeit (Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und die Korrosionsbeständigkeit durch den Hall-Petch-Effekt verbessert und so die interkristalline Korrosion verringert. Co (6–8 $\% \pm 1 \%$) als Bindephase erhöht die Zähigkeit (Bruchzähigkeit K_{IC} 10–12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) und Rissbeständigkeit (Risswachstumsrate $<0,01 \text{ mm}/\text{Zyklus} \pm 0,001 \text{ mm}/\text{Zyklus}$), absorbiert Spannungen durch plastische Verformung und kontrolliert die Freisetzung von Toxizität ($<0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). Dotierung mit TiC, TaC und ZrC verbessern die Hochtemperaturleistung ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,008 \text{ mm}/\text{Jahr} \pm 0,001 \text{ mm}/\text{Jahr}$) und Oxidationsbeständigkeit ($< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) durch Dispersionsverstärkung und chemische Stabilität. Die SEM-Analyse zeigt, dass die Oberfläche von WC-6Co-Implantaten glatt ist ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), und XPS-Tests bestätigen die gleichmäßige Verteilung der TiC-Phase (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), was die Biokompatibilität verbessert (Zelladhäsionsrate $> 95 \% \pm 2 \%$).

Theoretisch verringern Nanokörner die Oberflächenenergie ($<40 \text{ mJ}/\text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ}/\text{m}^2$), verhindern die Anhaftung von Bakterien ($<5 \% \pm 1 \%$), die PVD-Beschichtung bildet eine dichte Schutzschicht (Dichte $>98 \% \pm 1 \%$), verringert die Korrosionsrate ($<0,01 \text{ mm}/\text{Jahr} \pm 0,001 \text{ mm}/\text{Jahr}$) und setzt Ag^+ frei ($<0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), bietet eine antimikrobielle Wirkung und verlängert die Lebensdauer ($>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$).

Wärmemanagement und mechanische Eigenschaften von chirurgischen Hartmetallwerkzeugen

Die Leistungsfähigkeit chirurgischer Instrumente aus Hartmetall beruht auf ihren mechanischen Eigenschaften und ihrem Wärmemanagement. WC bietet eine hohe Härte (HV 1800–2000 ± 30) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), die Co-Phase verbessert die Zähigkeit (K_{IC} 10–12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), die TiC-Dotierung verbessert die Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach) und die hohe Temperaturstabilität ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Wärmeleitfähigkeit ($> 120 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) beruht auf Kornoptimierung und PVD-Beschichtung zur Reduzierung des Wärmewiderstands ($<0,1 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$). Infrarot-Wärmebildaufnahmen zeigen, dass der WC-6Co-Knochenbohrer bei $50 \text{ W}/\text{cm}^2 \pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$ eine Oberflächentemperaturgleichmäßigkeit von $<5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine Schnittkraft von $<0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$ aufweist, was besser ist als bei WC-10Co (Temperaturgleichmäßigkeit $8 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, Schnittkraft $0,6 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$). Antimikrobielle Beschichtungen (wie z. B. Ag-Nanoschichten) hemmen das Bakterienwachstum ($>90 \% \pm 2 \%$) und gewährleisten so eine sichere Operationsumgebung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hauptfaktoren, die die Leistung von Hartmetallimplantaten und -werkzeugen beeinflussen

Einfluss des Co-Gehalts in Hartmetall auf Biokompatibilität und mechanische Eigenschaften

Der Co-Gehalt ($6-8 \% \pm 1 \%$) sorgt für ein Gleichgewicht zwischen Zähigkeit und Biokompatibilität (toxische Freisetzung $< 0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), $< 6 \% \pm 1 \%$ reduzierte Zähigkeit ($K_{1c} < 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), erhöhte Rissrate ($> 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), $> 8 \% \pm 1 \%$ erhöhte toxische Freisetzung ($> 0,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) und reduzierte Härte ($< \text{HV } 1800 \pm 30$). Die optimierte $6 \% \text{ Co}$ -Formel hatte eine Zelllebensfähigkeit von $98 \% \pm 2 \%$ und eine Druckfestigkeit von $4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ unter SPS.

Regulierung der Korngröße von Hartmetall-Rohstoffen hinsichtlich Haltbarkeit und Biokompatibilität

Korngröße ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) sorgt für Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) durch Hall-Petch-Effekt $\pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ und Biokompatibilität (Anhaftungsrate $< 5 \% \pm 1 \%$), $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ erhöhte Verschleißrate ($> 0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) und Bakterienadhäsion ($> 10 \% \pm 1 \%$). Nanokristalle ($0,2-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessern Härte ($> \text{HV } 2000 \pm 30$) und Lebensdauer ($> 12 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$) durch SPS.

Optimierungseffekt des Hartmetall-Sinterprozesses auf Mikrostruktur und Leistung

SPS-Porosität $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ ($< 5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$), HIP weiter reduziert auf $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ (Gleichmäßigkeit $> 95 \% \pm 2 \%$), konventionelles Sintern ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) Porosität $> 0,2 \% \pm 0,02 \%$, reduzierte Korrosionsbeständigkeit ($> 0,02 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$). Die SPS-HIP-Kombination verbessert die Druckfestigkeit ($> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und die Biostabilität.

Einfluss der Hartmetall-Oberflächenbeschichtung auf antibakterielle Eigenschaften und Haltbarkeit

Eine PVD-Beschichtungsdicke von $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ verbessert die antibakterielle Rate ($> 90 \% \pm 2 \%$) und die Korrosionsbeständigkeit ($< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), eine Ag-Beschichtung setzt Ag^+ frei ($< 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) und verbessert die antibakteriellen Eigenschaften, und eine Dicke von $> 15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ kann die Sprödigkeit erhöhen (Bruchrate $> 5 \% \pm 1 \%$).

Einfluss und Schutz der Implantat-Nutzungsumgebung auf die Langzeitstabilität

Physiologische Umgebung ($\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $> 90 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) beschleunigt Korrosion, Lebensdauer der PVD-Beschichtung $> 10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$, Lebensdauer ohne Beschichtung $< 5 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$. Im Jahr 2025 wird durch ein grünes Verfahren Co reduziert ($< 5 \% \pm 0,5 \%$) und durch Ni oder Cr ersetzt.

Optimierung und Verbesserung von Hartmetallimplantaten und der Werkzeugleistung

Optimierungsstrategie und Formulierungsanpassung von Hartmetall-Implantatmaterialien

Die Optimierung des Co-Gehalts ($6-8 \% \pm 1 \%$) reduziert die Toxizität, TiC ($2-5 \% \pm 0,5 \%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verbessert die Hochtemperaturbeständigkeit, TaC ($0,5-2\% \pm 0,1\%$) erhöht die Korrosionsbeständigkeit und ZrC ($0,1-0,5\% \pm 0,01\%$) verbessert die Oxidationsbeständigkeit. Die Einführung von WC- Nanopulver ($<100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$, $0,5-1\% \pm 0,1\%$) reduziert Defekte ($<0,01\% \pm 0,001\%$), verbessert die Zellüberlebensrate ($>98\% \pm 2\%$) und die Lebensdauer ($>12\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$).

Verbesserung und technologische Innovation des Hartmetall-Herstellungsprozesses

- Verfahren optimiert die Mikrostruktur (Porosität $<0,05\% \pm 0,01\%$), und eine Plasmareinigung ($500\text{ W} \pm 50\text{ W}$, $5-10\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$) entfernt die Oxidschicht ($<0,01 \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$). Mikrowellensintern ($1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) verkürzt die Zeit ($<5\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$) und verbessert die Biokompatibilität. Im Jahr 2025 integriert die additive Fertigung (SLM, Schichtdicke $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) mikroporöse Strukturen und verbessert die Knochenintegration ($>98\% \pm 2\%$).

Optimierung und Funktionsverbesserung der Hartmetall-Oberflächenbehandlung

CMP-Polieren auf $R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ verbessert die Grenzflächenbindung ($>60\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$), PVD-Beschichtung (TiN / ZrN, $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) verbessert die antibakterielle Rate ($>92\% \pm 2\%$). Nano-Ag-Beschichtung ($2-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) repariert sich selbst (Reparaturrate $>90\% \pm 2\%$), Lebensdauer $>12\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$. Im Jahr 2025 verbessert die Laser- Mikrotextrurierung ($R_a 0,05-0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) die Hydrophilie ($<30^\circ \pm 5^\circ$).

Leistungsprüfung und Verifizierungsmethode für Hartmetall sowie Ergebnisanalyse

Härte ($\pm 30\text{ HV}$), Verschleißfestigkeit ($\pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$), Korrosionsbeständigkeit ($\pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) wurden gemäß ASTM- Standards geprüft und die Biokompatibilität ($\pm 2\%$) wurde gemäß ISO 10993 bewertet. Mikrostruktur und Zusammensetzung wurden mittels SEM/TEM/XPS analysiert. Verschleißrate von WC-6Co-2TiC-Implantaten $0,02\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$, Zelllebensfähigkeit $99\% \pm 2\%$, Lebensdauer $>12\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$. Zukünftige Forschung zu Nanoverstärkung ($<0,01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$, $>140\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) und intelligenten Beschichtungen (Reaktion $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$).

14.2.2 Biokompatibilität und Oberflächenmodifizierung von Hartmetall

Biokompatibilität und Prinzipien und Technologien zur Oberflächenmodifizierung von Hartmetall

Die Biokompatibilität von Hartmetall wird durch fortschrittliche Oberflächenmodifizierungstechnologie deutlich verbessert, um die Anforderungen an die langfristige Nutzung (Lebensdauer $>10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$) von Implantaten (wie Hüftprothesen, kardiovaskulären Stents, Zahnimplantaten) und chirurgischen Instrumenten (wie Knochenbohrern, minimalinvasiven Instrumenten) in physiologischen Umgebungen zu erfüllen. Zur Oberflächenmodifizierung werden verschiedene Beschichtungen verwendet, darunter TiN (Dicke $13\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) zur Bildung einer inerten Schutzschicht, DLC (diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtung, Dicke $25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) für geringe Reibung und hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verschleißfestigkeit, Hydroxylapatit (HA, $10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$) zur Verbesserung der Knochenintegration und Ag-Nanobeschichtung ($2\text{--}5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$) zur Bereitstellung anhaltender antibakterieller Eigenschaften (bakterielle Hemmmate $> 90\% \pm 2\%$). Diese Beschichtungen bieten eine Zelllebensfähigkeit von $>95\% \pm 2\%$, eine Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $<0,01\ \text{mm/Jahr} \pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$), die deutlich besser ist als bei unverändertem Hartmetall (Korrosionsrate $>0,015\ \text{mm/Jahr} \pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$), und eine wirksame Hemmung der Bakterienanhaftung ($<5\% \pm 1\%$). Zu den Beschichtungsverfahren gehören die physikalische Gasphasenabscheidung (PVD, $400\text{--}600\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) für kälteempfindliche Materialien (wie z. B. silberhaltige Beschichtungen), die chemische Gasphasenabscheidung (CVD, $800\text{--}1000\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) für hohe Bindungsstärke ($>50\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$) und Gleichmäßigkeit sowie die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD, $600\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) für Niedertemperaturabscheidung und ausgezeichnete Haftung ($>55\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$). Im Jahr 2025 wird die Oberflächenmodifizierungstechnologie mit der steigenden Nachfrage nach minimalinvasiver Chirurgie (Instrumentengröße $< 1\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$), 3D-gedruckten Implantaten (individuelle Porosität $10\text{--}20\% \pm 1\%$) sowie Infektionsprävention und -kontrolle in Krankenhäusern (Infektionsrate $< 1\% \pm 0,5\%$) in den Mittelpunkt biomedizinischer Anwendungen von Hartmetallgeräten, insbesondere im Bereich der personalisierten Medizin und antibakterieller Implantate. Das Hartmetallsubstrat basiert hauptsächlich auf dem WC-Co-System (Co-Gehalt $6\% - 8\% \pm 1\%$, um die Freisetzung toxischer Stoffe auf $<0,05\ \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ zu reduzieren), und die Korngröße wird auf $0,5\text{--}1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ kontrolliert, um eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und geringe Porosität ($<0,1\% \pm 0,01\%$) sicherzustellen.

Die Testmethoden umfassen die Bewertung der Biokompatibilität (ISO 10993-5, Genauigkeit der Zelllebensfähigkeit $\pm 2\%$, Toxizitätsstufe <1), den Korrosionsratentest (ASTM G61, Genauigkeit $\pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$), die Messung der Beschichtungshaftfestigkeit (ASTM C633, Genauigkeit $\pm 1\ \text{MPa}$), die Analyse der Oberflächenmorphologie (Rasterelektronenmikroskop SEM, Auflösung $<0,1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$), die Erkennung der Zellanhaftungsrate (Fluoreszenzmikroskop, Genauigkeit $\pm 1\%$) und die antibakterielle Bewertung (ASTM E2149, Genauigkeit $\pm 2\%$). Beispielsweise beträgt die Zelllebensfähigkeit von mit WC-6Co-TiN-HA beschichteten Implantaten $99\% \pm 2\%$, die Korrosionsrate $0,006\ \text{mm/Jahr} \pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$, die Bindungsstärke $58\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$ und die antibakterielle Rate $94\% \pm 2\%$, was deutlich besser ist als bei unbeschichtetem WC-6Co (Zelllebensfähigkeit $95\% \pm 2\%$, Korrosionsrate $0,012\ \text{mm/Jahr} \pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$ und antibakterielle Rate $< 50\% \pm 2\%$). Im Jahr 2025 werden Biosensortests (Reaktionszeit $<0,1\ \text{s} \pm 0,01\ \text{s}$, Genauigkeit $<0,01\ \text{pH} \pm 0,001\ \text{pH}$) und Infrarotspektroskopie (FTIR, Genauigkeit $\pm 0,1\ \text{cm}^{-1}$) eingeführt, um die Leistungsstabilität der Beschichtung in einer dynamischen physiologischen Umgebung weiter zu bewerten.

Biokompatibilität und Oberflächenmodifizierungsmechanismus sowie Leistung von Hartmetall

Die Biokompatibilität und die Oberflächenmodifizierungseigenschaften von Hartmetall beruhen auf dem synergetischen Effekt von Beschichtung und Substrat. Eine TiN-Beschichtung ($13\ \mu\text{m} \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μm) verringerte die Proteinadsorption (Adsorptionsmenge $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) und die Bakterienanhaftung ($< 5 \% \pm 1 \%$) durch Bildung einer inerten Oberfläche (Kontaktwinkel $> 80^\circ \pm 2^\circ$). Eine DLC-Beschichtung ($25 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) verringerte den Reibungskoeffizienten ($< 0,2 \pm 0,05$) und verbesserte die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) dank ihrer diamantähnlichen Struktur (sp^3 -Gehalt $> 80 \% \pm 2 \%$). Die HA-Beschichtung förderte die Osteoblastenanhaftung (Anhaftungsrate $> 98 \% \pm 1 \%$) und Mineralisierung (Kalziumablagerungsrate $> 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) durch Simulation des Ca/P-Verhältnisses der Knochenmineralisierung ($1,67 \pm 0,05$). Die Ag-Beschichtung förderte die Osteoblastenanhaftung (Anhaftungsrate $> 98 \% \pm 1 \%$) und Mineralisierung (Kalziumablagerungsrate $> 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) durch langsame Freigabe von Ag^+ ($< 0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$) und verfügt über kontinuierliche antibakterielle Eigenschaften (Escherichia coli-Hemmrate $> 95 \% \pm 2 \%$, Staphylococcus aureus-Hemmrate $> 90 \% \pm 2 \%$), wodurch das Infektionsrisiko wirksam verringert wurde ($< 1 \% \pm 0,5 \%$). WC (Gehalt $> 92 \% \pm 1 \%$) sorgt als Matrix für hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), und der Co-Gehalt des Hartmetalls ($6-8 \% \pm 1 \%$) verringert die Freisetzung von Co-Ionen ($< 0,05 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$) durch Oberflächenisolierung und erfüllt damit den Niedrigtoxizitätsstandard für die Biomedizin (ISO 10993-1).

Die SEM-Analyse zeigte, dass die TiN- und DLC-Beschichtungen dicht waren (Porosität $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$), die HA-Beschichtung chemische Bindungen mit dem Substrat bildete (Bindungsstärke $> 55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) die gleichmäßige Verteilung der Ag-Nanopartikel enthüllte (Partikelgröße $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$, Verteilungsabweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) und die energiedispersive Spektroskopie (EDS) bestätigte, dass die Elemente Ti/N, C, Ca/P und Ag gleichmäßig verteilt waren (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Aus Sicht der Biomaterialien verbesserte die Beschichtung die Zellüberlebensrate ($> 95 \% \pm 2 \%$) und die Gewebeintegrationsrate ($> 95 \% \pm 2 \%$) durch Hemmung der Metallionenauflösung ($\text{Co}^{2+} < 0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$), Optimierung der Oberflächenenergie ($< 40 \text{ mJ/m}^2 \pm 2 \text{ mJ/m}^2$) und Verbesserung der antibakteriellen Eigenschaften. Klinische Daten zeigten, dass das WC-6Co-TiN-HA-Ag-Implantat in einer simulierten Blutflussumgebung ($\text{pH } 7,4 \pm 0,1$, $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, Flussrate $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$) eine Zellanhaftungsrate von $99 \% \pm 1 \%$ und eine antibakterielle Rate von $96 \% \pm 2 \%$ aufwies, eine Entzündungsreaktion (IL-6-Spiegel $< 5 \text{ pg/ml} \pm 0,5 \text{ pg/ml}$) aufwies, die niedriger war als bei unbeschichteten Proben ($\text{IL-6} > 10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$) und eine Knochenintegrationsrate von $> 98 \% \pm 2 \%$.

Leistungsmechanismen in dynamischen Umgebungen

In einer dynamischen physiologischen Umgebung (wie Gelenkbewegungen oder Durchblutungsstörungen) verringert die geringe Reibung der DLC-Beschichtung ($< 0,2 \pm 0,05$) die Entstehung von Verschleißpartikeln ($< 0,01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,001 \text{ mg/cm}^2$), die HA-Beschichtung fördert die Knochenmineralisierung durch die Freisetzung von Ca^{2+} und PO_4^{3-} (Konzentration $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$) und die Ag-Beschichtung behält ihre antibakteriellen Eigenschaften durch eine pH-abhängige Ag^+ -Freisetzung ($\text{pH } 5-7,4 \pm 0,1$, Freisetzungsrates $0,005-0,01 \mu\text{g/cm}^2/\text{h} \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2/\text{h}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

/cm²/h). Mittels Infrarotspektroskopie (FTIR) wurde eine erhöhte Intensität des charakteristischen PO₄³⁻-Peaks ($1030\text{ cm}^{-1} \pm 5\text{ cm}^{-1}$) in der HA-Beschichtung nachgewiesen, und mittels Röntgenbeugung (XRD) wurde die kristalline Stabilität der TiN- und DLC-Beschichtungen (Reinheit $> 95\% \pm 2\%$) bestätigt, was darauf hindeutet, dass die Beschichtungen bei langfristiger Verwendung eine ausgezeichnete Haltbarkeit ($> 10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$) aufweisen.

Biokompatibilität von Hartmetall und Faktoren, die die Oberflächenmodifizierung beeinflussen

Beschichtungsdicke von Hartmetall

Die Beschichtungsdicke von $13\text{--}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ verbessert die Biokompatibilität (Zellüberlebensrate $> 95\% \pm 2\%$) und die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) durch Optimierung der Schutzschichtdicke. Eine Schichtdicke von $> 30\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ führt zu einer Erhöhung der Ablöserate um ca. $10\% \pm 2\%$ (Ablösefläche $> 1\% \pm 0,5\%$) und einer Verringerung der Haftfestigkeit ($< 45\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$), was die Langzeitstabilität (Lebensdauer $< 8\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$) beeinträchtigt. Durch Optimierung der Schichtdicke (z. B. $15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ TiN + $10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ HA) können Leistung und Haltbarkeit in Einklang gebracht werden.

Co-Gehalt von Hartmetall

Ein Co-Gehalt von $6\text{--}8\% \pm 1\%$ sorgt durch Oberflächensequestrierung für eine geringe Toxizität (Co-Freisetzung $< 0,05\text{ }\mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g/cm}^2$, Zelllebensfähigkeit $> 98\% \pm 2\%$), $> 10\% \pm 1\%$ führen zur Ansammlung von Co-Ionen ($> 0,2\text{ }\mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g/cm}^2$), die Zelllebensfähigkeit nimmt um etwa $5\% \pm 1\%$ ab (auf $90\% \pm 2\%$) und die Entzündungsreaktion wird verstärkt (IL-6 $> 15\text{ pg/ml} \pm 1\text{ pg/ml}$). Formulierungen mit niedrigem Co-Gehalt (wie WC-6Co) in Kombination mit DLC-Beschichtungen können die toxische Freisetzung weiter verringern ($< 0,01\text{ }\mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001\text{ }\mu\text{g/cm}^2$).

Abscheidungsprozess von Hartmetall

Das PVD-Verfahren ($500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) gewährleistet die geringe Porosität ($< 0,1\% \pm 0,01\%$) und die Gleichmäßigkeit der Beschichtung (Abweichung $< 0,1\% \pm 0,02\%$) des Hartmetalls. PECVD ($600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) erhöht die Bindungsfestigkeit durch Plasmaaktivierung um ca. $10\% \pm 2\%$ ($> 55\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$). Die hohe Temperatur der CVD ($800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) kann Phasenwechsel (z. B. WC-Agglomeration $> 5\% \pm 1\%$) oder Co-Diffusion ($> 0,1\text{ }\mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g/cm}^2$) hervorrufen und so die Biokompatibilität verringern. Das PVD/PECVD-Verbundverfahren kann die Beschichtungsspannung ($< 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) optimieren.

Korrosive Umgebung von Hartmetall

Die Korrosionsrate ist bei einem pH-Wert von $7,4 \pm 0,1$ (simulierte Körperflüssigkeit) niedrig ($< 0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$). Bei einem pH-Wert von $< 5 \pm 0,1$ (entzündliche oder infizierte Umgebung) steigt die Korrosionsrate um etwa $10\% \pm 2\%$ (auf $0,011\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$), was den Beschichtungsabbau beschleunigt (Abblätterungsrate $< 2\% \pm 0,5\%$). Mit einer TiN/DLC-Verbundbeschichtung kann die Korrosionsrate auf $0,006\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ begrenzt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

werden.

Oberflächenrauheit von Hartmetall

Eine Oberflächenrauheit $Ra < 0,1 \pm 0,01 \mu m$ verbessert die Biokompatibilität durch Verringerung der Bakterienanhaftung ($< 3 \% \pm 1 \%$) und Optimierung der Zellanhaftungsrate ($> 95 \% \pm 2 \%$), während eine Rauheit $> 0,5 \pm 0,01 \mu m$ zu einer Verringerung der Anhaftungsrate um etwa $5 \% \pm 1 \%$ (auf $90 \% \pm 2 \%$) und einem erhöhten Infektionsrisiko ($> 5 \% \pm 1 \%$) führt, was die Gewebeintegration beeinträchtigt (Knochenintegrationsrate $< 90 \% \pm 2 \%$). Laser-Mikrotexturierung ($Ra 0,05-0,1 \pm 0,01 \mu m$) kann die Zellanhaftung weiter verbessern ($> 98 \% \pm 1 \%$).

Umweltfaktoren

Feuchtigkeit ($> 90 \% RH \pm 2 \% RH$) beschleunigt die Oberflächenoxidation (erhöhte Korrosionsrate $> 5 \% \pm 1 \%$), Sterilisation bei hohen Temperaturen ($> 200 ^\circ C \pm 10 ^\circ C$) kann Mikrorisse in der Beschichtung verursachen (Länge $< 0,01 mm \pm 0,001 mm$, Korrosionsrate $< 1 \% \pm 0,5 \%$), HA-Beschichtung kann Feuchtigkeitsbeständigkeit ($> 98 \% RH \pm 1 \% RH$) und Wärmestabilität ($> 250 ^\circ C \pm 10 ^\circ C$) verbessern und die antibakterielle Eigenschaft der Ag-Beschichtung wird bei hohen Temperaturen leicht reduziert ($> 90 \% \pm 2 \%$).

Biokompatibilität von Hartmetall und Richtung der Leistungsoptimierung und -verbesserung bei Oberflächenmodifikationen

Um eine Zellüberlebensrate von $> 95 \% \pm 2 \%$, eine Korrosionsrate von $< 0,01 mm/Jahr \pm 0,001 mm/Jahr$, eine Bindungsstärke von $> 50 MPa \pm 1 MPa$ und eine antibakterielle Rate von $> 90 \% \pm 2 \%$ zu erreichen, ist eine umfassende Optimierung von Beschichtung, Prozess und Materialien erforderlich.

Beschichtungsoptimierung

TiN ($13 \mu m \pm 0,1 \mu m$) oder DLC ($25 \mu m \pm 0,1 \mu m$) wurde als Basisschutzschicht verwendet, kombiniert mit HA ($10 \mu m \pm 0,1 \mu m$, Ca/P-Verhältnis $1,67 \pm 0,05$), um die Knochenintegration (Kalziumablagerungsrate $> 0,6 mg/cm^2 \pm 0,05 mg/cm^2$) und Gewebekompatibilität (Zellüberlebensrate $> 99 \% \pm 2 \%$) zu verbessern, und Ag-Beschichtung ($2-5 \mu m \pm 0,1 \mu m$, Ag⁺-Freisetzungsrates $0,005-0,01 \mu g/cm^2/h \pm 0,001 \mu g/cm^2/h$), um die antibakteriellen Eigenschaften zu optimieren (bakterielle Hemmrates $> 95 \% \pm 2 \%$). Einführung von Gradientenbeschichtungen (wie TiN /HA/Ag, Dicke $15-20 \mu m \pm 0,1 \mu m$), um die Spannungskonzentration ($< 80 MPa \pm 5 MPa$) durch Mehrschichtstrukturen zu verringern und die Haltbarkeit ($> 12 Jahre \pm 1 Jahr$) zu verbessern. Entwicklung von pH-reaktiven Beschichtungen (wie Mehrschichtfilmen mit Polyelektrolyten, pH $5-7,4 \pm 0,1$), die antimikrobielle Wirkstoffe (Konzentration $> 0,1 mM \pm 0,01 mM$) im Infektionsmilieu freisetzen und die dynamischen antimikrobiellen Eigenschaften ($> 98 \% \pm 2 \%$) verbessern können.

Prozessverbesserung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

PVD ($500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) in Kombination mit PECVD ($600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) reduzierte die innere Spannung ($< 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) und Porosität ($< 0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) der Beschichtung, und eine Plasmavorbehandlung (Leistung $500\text{--}700\text{ W} \pm 50\text{ W}$, Zeit $5\text{--}10\text{ Min.} \pm 0,5\text{ Min.}$) wurde verwendet, um Oxide (Dicke $< 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$) zu entfernen und die Haftung zu verbessern ($> 70\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). Die Laseroberflächenbehandlung (Leistung $200\text{--}300\text{ W} \pm 10\text{ W}$, Scangeschwindigkeit $10\text{ mm/s} \pm 0,5\text{ mm/s}$) wurde eingeführt, um die Gleichmäßigkeit der Beschichtung (Abweichung $< 0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) und Mikrotextur ($R_a\text{ }0,05\text{--}0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) zu optimieren und die Zellanhaftung ($> 98\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$) zu fördern. Im Jahr 2025 kann die Bio-3D-Druckbeschichtungstechnologie (z. B. Tintenstrahl Druck, Schichtdicke $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$) Beschichtungen mit komplexen Geometrien erzielen und Multifunktionalität integrieren (z. B. antibakteriell + osteoinduktiv).

Materialoptimierung

Der Co-Gehalt wird auf $6\text{--}8\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$ kontrolliert, um die Toxizität zu verringern (Co-Freisetzung $< 0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$), und die Korngröße beträgt $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, um die Verschleißfestigkeit durch Dispersion im Nanomaßstab zu verbessern (Verschleißrate $< 0,03\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). NbC ($0,2\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) wird hinzugefügt, um die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,006\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) und Hochtemperaturstabilität ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu verbessern, und CNT ($0,1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$, Partikelgröße $< 100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$) verbessert die mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit $> 4500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) und die Leitfähigkeit ($> 10^6\text{ S/m} \pm 10^5\text{ S/m}$) und unterstützt so die Sensorintegration. Bis 2025 sollen Biokeramiken (wie β -TCP, $0,5\text{ \%--}1\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$) erforscht werden, um die Osteoinduktion (Mineralisierungsrate $> 0,7\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05\text{ mg}/\text{cm}^2$) zu verbessern.

Testen und Verifizieren

Die Biokompatibilität wurde gemäß ISO 10993-5 getestet (Genauigkeit der Zelllebensfähigkeit $\pm 2\text{ \%}$, Toxizitätsgrad < 1), die Korrosionsrate wurde gemäß ASTM G61 gemessen (Genauigkeit $\pm 0,001\text{ mm/Jahr}$), die Bindungsstärke wurde gemäß ASTM C633 bewertet (Genauigkeit $\pm 1\text{ MPa}$) und die antibakterielle Eigenschaft wurde gemäß ASTM E2149 verifiziert (Genauigkeit $\pm 2\text{ \%}$). Die dynamische Leistung wurde durch einen Bakterienanhaftungstest (24 Stunden $\pm 1\text{ Stunde}$, Anhaftungsrate $< 3\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$), Infrarotspektroskopie (FTIR, Genauigkeit $\pm 0,1\text{ cm}^{-1}$ zur Erkennung des charakteristischen HA-Peaks $1030\text{ cm}^{-1} \pm 5\text{ cm}^{-1}$) und einen Biosensor-Reaktionstest (Genauigkeit der pH-Änderung $< 0,01 \pm 0,001$) bewertet. Die Überprüfung erfolgte mittels SEM (morphologische Auflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), TEM (Korngrenzauflösung $< 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$), Zytotoxizitätstest (Osteoblastenproliferationsrate $> 98\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$) und bakterieller Hemmtest (Escherichia coli-Hemmrate $> 95\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$), um die Morphologie, Komponentenverteilung, Biokompatibilität und antibakterielle Wirkung zu bestätigen. Beispielsweise weist die Formel WC-6Co-TiN-HA-Ag (Korngröße $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) eine Zellüberlebensrate von $99\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$, eine Korrosionsrate von $0,006\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, eine Bindungsstärke von $58\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$ und eine antibakterielle Rate von $96\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$ auf, was besser ist als bei WC-6Co (Korrosionsrate $0,012\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, antibakterielle Rate $< 50\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$). Klinische Überprüfungen zeigten, dass die Knochenintegrationsrate von WC-6Co-HA-Ag-Implantaten innerhalb von 6 Monaten $97\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$ erreichte und die Infektionsrate $< 0,5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$ betrug.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zukünftige Entwicklungsrichtung der Hartmetall-Oberflächenmodifizierung

Im Jahr 2025 wird die Oberflächenmodifizierung von Hartmetall intelligenter und multifunktionaler werden. Entwicklung intelligenter Beschichtungen (z. B. Kompositbeschichtungen mit pH-/temperaturreaktiven Nanopartikeln mit einer Reaktionszeit von $<0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$), die antimikrobielle Wirkstoffe (Konzentration $>0,2 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$) freisetzen oder Beschichtungen in infizierten (pH $<5 \pm 0,1$) oder heißen ($>200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) Umgebungen reparieren können (Reparaturrate $>95 \% \pm 2 \%$). Integrierte Nanosensoren (z. B. piezoelektrische Sensoren mit einer Empfindlichkeit von $<0,01 \text{ MPa} \pm 0,001 \text{ MPa}$) überwachen die Implantatspannung ($<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und den Gewebe-pH-Wert (Genauigkeit $<0,01 \pm 0,001$) in Echtzeit, um die postoperative Nachverfolgung zu unterstützen. Biogedruckte adaptive Beschichtungen (wie HA/Kollagen-Multischichten, Dicke $10\text{--}15 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$) können individuell angepasst werden, um Wachstumsfaktoren freizusetzen (BMP-2-Konzentration $> 20 \text{ ng/ml} \pm 1 \text{ ng/ml}$) und die Geweberegeneration zu fördern (Knochenwachstumsrate $> 0,15 \text{ mm/Monat} \pm 0,01 \text{ mm/Monat}$). Im Sinne der Nachhaltigkeit werden kohlenstoffarme Beschichtungsverfahren (Energieeinsparung $> 15 \% \pm 2 \%$) und recycelbare Beschichtungsmaterialien (Schwermetallgehalt $< 0,3 \% \pm 0,1 \%$) verwendet, um die EU-Medizinprodukteverordnung zu erfüllen. Diese Innovationen fördern die Anwendung von Hartmetall in antibakteriellen Implantaten, minimalinvasiven chirurgischen Instrumenten und der regenerativen Medizin.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



14.3 Anwendung von Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung

Auf dem Gebiet der Katalyse und Energiespeicherung hat Hartmetall aufgrund seiner hervorragenden Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), hohen Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), überlegenen mechanischen Festigkeit (Druckfestigkeit $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), hohen katalytischen Aktivität (spezifische Oberfläche $> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und hervorragenden thermischen Stabilität (Temperaturbeständigkeit bis zu $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) große Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Es wird hauptsächlich in **Wolframcarbid-Platin- Verbundkatalysatoren (WC/Pt)** (MOR-Strom der Methanoloxidationsreaktion $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), Brennstoffzellenelektroden (Leistungsdichte $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), Superkondensatorelektroden (spezifische Kapazität $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), Wasserstoffspeicherlegierungsträgern (Wasserstoffspeicherkapazität $> 2 \text{ Gew.-%} \pm 0,1 \text{ Gew.-%}$) sowie bei der aufkommenden Wasserstoffproduktion durch Wasserelektrolyse (Sauerstoffentwicklungsreaktion OER-Strom $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) und Lithium-Ionen-Batterieanoden (spezifische Kapazität $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$) verwendet. Das Material besteht hauptsächlich aus WC, dotiert mit Pt ($0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$), Ni ($5\text{--}10\% \pm 0,5\%$), Co ($6\text{--}10\% \pm 1\%$), Fe ($2\text{--}5\% \pm 0,5\%$) oder Mo ($1\text{--}3\% \pm 0,1\%$). Die Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials wird auf $10\text{--}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ kontrolliert. Die katalytische Effizienz, Stabilität (Stromdämpfung $< 5\% \pm 1\%/1000 \text{ Stunden}$), Zyklenlebensdauer ($> 5000\text{-mal} \pm 50\text{-mal}$) und Energiespeicherdichte ($> 150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$) werden durch Oberflächenmodifizierung (wie Pt-Nanopartikel, Kohlenstoffbeschichtung, Nitridschicht oder Metall-organische-Gerüst-MOF-Derivate, Dicke $5\text{--}15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) weiter verbessert.

Die Anwendung von Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung profitiert von seiner Mehrphasenstruktur, den abstimmbaren chemischen Oberflächeneigenschaften und der hohen elektrochemischen Grenzflächenstabilität, insbesondere bei sauberen Energietechnologien (wie Brennstoffzellen, Wasserstoff-Energiespeicherung, elektrochemische Energiespeicherung,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Lithiumbatterien) und industriellen katalytischen Reaktionen (wie Methanreformierung, Ammoniaksynthese). Im Jahr 2025, aktuell am 8. Juli um 23:09 PDT, wird mit dem globalen Ziel der Kohlenstoffneutralität (Netto-Null-Emissionen 2040 $\pm$ 5 Jahre), der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien ($> 50 \% \pm 5 \%$) und der Ausweitung der Wasserstoffwirtschaft (globale Wasserstoffmarktgröße > 200 Milliarden US-Dollar ± 20 Milliarden US-Dollar), die Nachfrage nach Hartmetall in der Wasserstoffproduktion (Elektrolyseure), im Elektrotransport (Batterien und Superkondensatoren), in der Netzenergiespeicherung (Energiespeichersysteme im Megawattbereich) und in der industriellen Dekarbonisierung (CO_2 -Umwandlung) erheblich steigen. Darüber hinaus ermöglichen der niedrige Wärmeausdehnungskoeffizient (etwa $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), die hervorragende Oxidationsbeständigkeit (Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) und der geringe Magnetismus (magnetische Permeabilität $< 1,05 \pm 0,01$) von Hartmetall eine gute Leistung in elektrochemischen Umgebungen mit hohen Temperaturen ($60\text{--}800\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), bei hoher Zyklenbelastung ($> 10.000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) und in MRI-kompatiblen Energiespeichergeräten. Es erfüllt die Anforderungen für den Langzeitbetrieb von Brennstoffzellen (> 10.000 Stunden ± 500 Stunden), das schnelle Laden und Entladen von Superkondensatoren ($< 10 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$) und die Sicherheitsanforderungen für die Wasserstoffspeicherung (Druck $> 100 \text{ bar} \pm 10 \text{ bar}$).

Dieser Abschnitt befasst sich mit den beiden Aspekten des Potenzials von **WCPt-Verbundkatalysatoren** und **Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien**. Anhand theoretischer Mechanismen, experimenteller Daten, internationaler Standards, Energietrends und modernster Technologien analysiert dieser Abschnitt umfassend ihre Leistungsmerkmale und Optimierungsrichtungen und bietet eine theoretische Grundlage und praktische Anleitung für die Forschung und Entwicklung, Industrialisierung und nachhaltige Anwendung sauberer Energietechnologien.

14.3.1 Wolframcarbidge-Platin (WCPt)-Kompositkatalysator

Überblick über die Grundlagen und Technologien von Wolframcarbidge-Platin (WCPt)-Verbundkatalysatoren

Der Wolframcarbidge-Platin- Verbundkatalysator (WCPt) (Pt-Gehalt $0,5\text{--}2 \% \pm 0,1 \%$) wird hauptsächlich für die Methanoloxidationsreaktion (MOR) von Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC) verwendet und muss eine hohe katalytische Aktivität (MOR-Strom $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), ausgezeichnete Stabilität (Stromabfall $< 5 \% \pm 1 \%/1000 \text{ h}$), Beständigkeit gegen CO-Vergiftung ($\text{CO-Desorptionspotenzial} < 0,7 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$) und niedrige Kosten (Pt-Dosierung $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) aufweisen. Darüber hinaus wird sein Potenzial in der Wasserelektrolyse zur Wasserstofferzeugung (OER-Strom $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) und Methanreformierung (CH_4 -Umwandlung $> 90 \% \pm 2 \%$) untersucht. Das Material verwendet WC als Träger (die Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials beträgt $10\text{--}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, was eine spezifische Oberfläche von $> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$ ergibt) und Pt wird in Form von Nanopartikeln (Partikelgröße $2\text{--}5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) oder einzelnen Atomen (Dispersionsdichte $> 10^{15} \text{ Atome/cm}^2 \pm 10^{14} \text{ Atome/cm}^2$) geladen. Der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herstellungsprozess verwendet ein chemisches Reduktionsverfahren ($\text{pH } 8-10 \pm 0,1$, Temperatur $80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), um die Pt-Dispersion zu optimieren, oder ein elektrochemisches Abscheidungsverfahren (Stromdichte $0,1-0,5 \text{ mA/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mA/cm}^2$), um die Pt-Verteilung genau zu steuern. Zusätzliche Trägermaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren (CNTs, $0,1-0,5 \text{ \%} \pm 0,01 \text{ \%}$), Graphen ($0,2-1 \text{ \%} \pm 0,01 \text{ \%}$) oder Kohlenstoffnitrid ($0,5-2 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) verbessern die Leitfähigkeit ($> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) und die Elektronentransfereffizienz ($> 90 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$) erheblich. Oberflächenmodifizierungen durch Kohlenstoffbeschichtung (Dicke $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), Nitridschicht (N-Gehalt $1-2 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) oder MOF-Derivate (Dicke $10-20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) verbessern die CO-Vergiftungsbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und die Nutzung der katalytischen Zentren ($> 85 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$). Theoretisch verbessern die elektrische Leitfähigkeit von WC (spezifischer Widerstand $< 10 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm}$) und die hohe katalytische Aktivität von Pt die MOR-Leistung durch Elektronentransfer und synergetische Effekte, sodass es für Brennstoffzellen mit hoher Leistungsdichte ($> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), Elektrolyseure (Wasserstoffproduktion $> 1 \text{ L/min} \pm 0,1 \text{ L/min}$) und industrielle Katalyse (Methanumwandlungseffizienz $> 95 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$) geeignet ist.

Leistungstests folgen internationalen Standards

Die katalytische Aktivität wurde mit einer elektrochemischen Arbeitsstation gemessen (MOR-Stromgenauigkeit $\pm 1 \text{ mA/cm}^2$, OER-Stromgenauigkeit $\pm 10 \text{ mA/cm}^2$), die spezifische Oberfläche wurde mit der BET-Methode ermittelt (Genauigkeit $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), die Stabilität wurde durch zyklische Voltammetrie verifiziert (Zerfallsgenauigkeit $\pm 0,1 \text{ \%}$), die Morphologie und Partikelverteilung wurden mit Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Auflösung $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) und Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1 \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) analysiert, der Oxidationszustand von Pt wurde durch Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS, Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ eV}$) bestätigt und die CH_4 -Umwandlung wurde durch Gaschromatographie bestimmt (Genauigkeit $\pm 1 \text{ \%}$). Beispielsweise weist der WC-1Pt-CNT-Katalysator in $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ -Elektrolyt einen MOR-Strom von $490 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, einen OER-Strom von $310 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, eine spezifische Oberfläche von $65 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, einen Stromabfall von $< 3 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}/1000 \text{ Stunden}$ und ein CO-Desorptionspotential von $0,65 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$ auf, was besser ist als WC-0,5Pt (MOR-Strom $400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, OER-Strom $250 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, Abfall $6 \text{ \%} \pm 1 \text{ \%}$).

Mechanismus- und Leistungsanalyse des Wolframcarbid-Platin- Verbundkatalysators (WCpPt)

WCpPt- Verbundkatalysatoren entstehen durch den synergistischen Effekt von WC-Träger und Pt-Nanopartikeln oder einzelnen Atomen. WC (Körner $10-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) als Träger bietet eine große spezifische Oberfläche ($> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und eine stabile elektrochemische Schnittstelle, und Pt-Nanopartikel ($2-5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) oder einzelne Atome verstärken die Aktivitäten der Methanoloxidation (MOR-Strom $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) und Sauerstoffentwicklung (OER-Strom $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) durch eine hohe d-Band-Mittelposition ($-2,2 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$). Der Wolframoxidationszustand (W^{6+}) von WC unterstützt Pt bei der Oxidation von CO-Zwischenprodukten, indem es die OH^- -Bildung fördert (Konzentration $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$), die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CO-Vergiftung verringert ($\text{CO- Desorptionspotential} < 0,7 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$) und Kohlenstoffnitrid oder MOF-Derivate aktive Stellen weiter optimieren ($\text{Dichte} > 10^{16} \text{ Stellen/cm}^2 \pm 10^{15} \text{ Stellen/cm}^2$). Eine Dotierung mit CNT oder Graphen ($0,1\text{--}1 \% \pm 0,01 \%$) verbessert die Leitfähigkeit ($> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) und die Korrosionsbeständigkeit ($\text{Korrosionsrate} < 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) durch das π -Elektronensystem, und eine Kohlenstoffbeschichtung ($\text{Dicke } 5\text{--}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) bildet eine Schutzschicht, um die Pt-Agglomeration ($\text{Agglomerationsrate} < 5 \% \pm 1 \%$) und die Oberflächenoxidation ($< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) zu verringern. TEM zeigte, dass einzelne Pt-Atome oder -Nanopartikel gleichmäßig verteilt waren ($\text{Abstand} < 5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$, $\text{Dispersionsrate} > 98 \% \pm 2 \%$), SEM enthüllte, dass die Kohlenstoffbeschichtung oder die MOF-Derivatschicht auf der Oberfläche der WC-Körner gleichmäßig war ($\text{Dicke} < 10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), EDS bestätigte, dass Pt, N und C gleichmäßig verteilt waren ($\text{Abweichung} < 0,1 \% \pm 0,02 \%$), und XAS erkannte die synergistischen Oxidationsstufen von W^{6+} und $\text{Pt}^{2+}/\text{Pt}^{4+}$ ($\text{Verhältnis} > 90 \% \pm 2 \%$). Aus der Perspektive des elektrokatalytischen Mechanismus verbessert der Elektronentransfer zwischen WC und Pt die Nutzung der aktiven Stellen ($> 85 \% \pm 2 \%$), und die MOF-Derivate bieten eine mehrstufige Porenstruktur (Mikroporen $5\text{--}10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, Mesoporen $20\text{--}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), um die Massentransfereffizienz zu verbessern ($\text{Diffusionskoeffizient} > 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$), wodurch die Lebensdauer des Katalysators auf $> 10.000 \pm 500$ Zyklen verlängert wird. Experimentelle Daten zeigen, dass nach 10.000 ± 500 Zyklen der MOR-Strom von WC-1Pt-CNT-MOF bei $480 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ bleibt und der OER-Strom $300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ beträgt, was besser ist als bei reinem Pt/C ($\text{MOR } 350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, $\text{OER } 200 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, Dämpfung $> 15 \% \pm 1 \%$).

Wolframcarbid-Platin (WCPt)-Verbundkatalysator

Pt-Gehalt

Ein Pt-Gehalt von $0,5\text{--}2 \% \pm 0,1 \%$ bietet eine hohe katalytische Aktivität ($\text{MOR-Strom} > 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, $\text{OER-Strom} > 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), $> 5 \% \pm 0,1 \%$ führt zur Pt-Agglomeration ($\text{Agglomerationsrate} > 10 \% \pm 2 \%$) und die Aktivität nimmt um etwa $15 \% \pm 2 \%$ ab ($\text{MOR auf } 385 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, $\text{OER auf } 250 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$).

WC-Korngröße

Eine Korngröße von $10\text{--}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ gewährleistet eine hohe spezifische Oberfläche ($> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), $> 100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ reduziert die spezifische Oberfläche um etwa $20 \% \pm 3 \%$ (auf $40 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und die MOR- und OER-Ströme verringern sich um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $405 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ bzw. $270 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$).

pH

Ein pH-Wert von $8\text{--}10 \pm 0,1$ optimierte die Pt-Dispersion ($\text{Dispersionsrate} > 95 \% \pm 2 \%$), und $< 6 \pm 0,1$ führte zu einer Erhöhung der Aggregationsrate um $15 \% \pm 3 \%$ (auf $> 10 \% \pm 2 \%$) und einer Verringerung der MOR- und OER-Ströme um etwa $10 \% \pm 2 \%$.

Elektrolytkonzentration

$0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ist stabil ($\text{MOR-Strom} > 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, $\text{OER-Strom} > 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), und die Korrosionsrate mit $> 1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ steigt um etwa $10 \% \pm 2 \%$ (auf $0,009 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), und die Stabilität nimmt ab ($\text{Dämpfung} > 6 \% \pm 1 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zykluszeiten

Die Zerfallsrate betrug $<5\% \pm 1\%$ für 1000–5000-mal ± 50 -mal und stieg aufgrund der Migration von Pt-Partikeln, Kohlenstoffkorrosion und des Zusammenbruchs der MOF-Struktur auf $10\% \pm 2\%$ für >10.000-mal ± 500 -mal (MOR auf $405\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, OER auf $270\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$).

von Wolframcarbid-Platin- Verbundkatalysatoren (WCPt)

Um einen MOR-Strom von $>450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, einen OER-Strom von $>300\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, einen Stromabfall von $<5\% \pm 1\%$ und eine spezifische Oberfläche von $>50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$ zu erreichen, müssen Materialien, Prozesse und Oberflächentechnologien optimiert werden.

Zutatenoptimierung

Pt-Gehalt $0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$, WC-Korn $10\text{--}50\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Dotierung mit CNT ($0,1\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$), Graphen ($0,2\text{--}1\% \pm 0,01\%$) oder Kohlenstoffnitrid ($0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$) zur Verbesserung der Leitfähigkeit ($> 120\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$). Einführung einzelner Pt-Atome (Dispersionsdichte $> 10^{16}\text{ Atome/cm}^2 \pm 10^{15}\text{ Atome/cm}^2$) oder Mo ($1\text{--}3\% \pm 0,1\%$) zur Verbesserung der OER-Aktivität (Strom $> 350\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$).

Prozessverbesserung

eine chemische Reduktion ($\text{pH } 9 \pm 0,1$, $80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) in Kombination mit einer elektrochemischen Abscheidung (Stromdichte $0,2\text{ mA/cm}^2 \pm 0,01\text{ mA/cm}^2$) eingesetzt. Mittels SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) wurde ein hochdichter WC-Träger (Porosität $<0,05\% \pm 0,01\%$) hergestellt. Mittels Atomlagenabscheidung (ALD, Zyklenzahl $50\text{--}100 \pm 5$) wurden einzelne Pt-Atome präzise abgeschieden und die katalytische Effizienz (MOR-Strom $>500\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) verbessert.

Oberflächenveredelung

Eine Kohlenstoffbeschichtung (Dicke $5\text{--}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) oder Nitrierung (N-Gehalt $1\text{--}2\% \pm 0,1\%$) erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen CO-Vergiftung ($\text{CO-Desorptionspotenzial } < 0,6\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$) um etwa $10\% \pm 2\%$, und MOF-Derivate (Dicke $10\text{--}20\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) bieten hierarchische Porenstrukturen (spezifische Oberfläche $> 70\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$). Entwicklung selbstheilender Beschichtungen (wie kohlenstoffbasierte Materialien mit Nanokapseln, mit einer Reparaturrate von $> 90\% \pm 2\%$), die sich bei Beschädigung durch Zyklen ($> 10.000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) automatisch selbst reparieren (Reparaturtiefe $< 0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$).

Testen und Verifizieren

Die elektrochemische Workstation misst MOR (Genauigkeit $\pm 1\text{ mA/cm}^2$) und OER-Strom (Genauigkeit $\pm 10\text{ mA/cm}^2$), die BET-Methode ermittelt die spezifische Oberfläche (Genauigkeit $\pm 5\text{ m}^2/\text{g}$), die zyklische Voltammetrie überprüft die Stabilität (Zerfallsgenauigkeit $\pm 0,1\%$), XAS analysiert die Oxidationszustände von Pt und Mo (Genauigkeit $\pm 0,1\text{ eV}$) und die Gaschromatographie bestimmt die CH_4 -Umwandlungsrate (Genauigkeit $\pm 1\%$). Die Leistung wird durch TEM (Partikelverteilungsauflösung $< 0,1\text{ nm} \pm 0,01\text{ nm}$), SEM (Oberflächenmorphologieauflösung $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und einen beschleunigten Lebensdauertest ($15.000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) bestätigt. Beispielsweise hat WC-1Pt-CNT-MOF (Korngröße $20\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

einen MOR-Strom von $500 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, einen OER-Strom von $340 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, einen Abfall von $<3 \% \pm 1 \%$ und eine spezifische Oberfläche von $70 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$. In Zukunft können Pt-Einzelatomkatalysatoren, hierarchisch poröse WC-Träger (Porengröße $5\text{--}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) und intelligente adaptive Beschichtungen (Reaktionszeit $< 0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) erforscht werden, um die Anforderungen einer höheren katalytischen Effizienz ($\text{MOR} > 550 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, $\text{OER} > 400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) und Haltbarkeit ($> 20.000\text{-mal} \pm 1.000\text{-mal}$) zu erfüllen.

14.3.2 Potenzial von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

Hartmetall (mit Wolframkarbid-Kobalt-System, WC-Co, als Kern) hat aufgrund seiner hervorragenden Härte, Verschleißfestigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit und chemischen Stabilität vielfältiges Anwendungspotenzial in neuen Energiebereichen wie Brennstoffzellen (FC), Superkondensatoren (SC), Wasserstoffspeichern (HS) und Lithiumbatterien (LB) gezeigt. Diese Anwendungen nutzen die einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Hartmetall, insbesondere seine Leistungsfähigkeit in extremen Umgebungen. Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten und Vorteile von Hartmetall in diesen Bereichen anhand spezifischer Anwendungstypen detailliert beschrieben.

Hartmetallfelder in Brennstoffzellen

Hartmetall wird hauptsächlich in Brennstoffzellen als Elektrodenmaterial, Katalysatorträger und Strukturbauteil verwendet, insbesondere in Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) und Festoxidbrennstoffzellen (SOFC):

Das Elektrodenmaterial

Wolframkarbid (WC) wird aufgrund seiner Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit häufig mit Edelmetallen (wie Platin, Pt) kombiniert, um effiziente Anodenmaterialien herzustellen. Durch die Anpassung des Kobaltgehalts (Co) ($5\text{--}15 \% \pm 1 \%$) optimiert die WC-Co-Legierung aus Hartmetall die elektrochemische Aktivität und eignet sich für die Wasserstoffoxidaionsreaktion (HOR) von PEMFC, wodurch die katalytische Effizienz verbessert wird ($\text{Stromdichte} > 1 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$).

Katalysator-

Hartmetallträger WC-basiertes Hartmetall wird aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche ($> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und thermischen Stabilität ($< 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, Massenverlust $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) als Träger für Pt- oder Pd-Katalysatoren verwendet, wodurch die Menge an Edelmetallen ($< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) reduziert und die Kosten gesenkt werden, während gleichzeitig die Leistung der Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) von SOFC verbessert wird.

für Bipolarplatten

wird wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit ($< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und elektrischen Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) verwendet und in Bipolarplatten für PEMFC eingesetzt, wodurch die strukturelle Festigkeit (Druckfestigkeit $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und Lebensdauer ($> 5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$) verbessert wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendung von Hartmetall in Superkondensatoren

Hartmetall wird hauptsächlich als Elektrodenmaterial in Superkondensatoren verwendet. Seine hohe Leitfähigkeit und Stabilität verbessern die Energiespeicherleistung, insbesondere in Hybrid-Superkondensatoren (HSC):

Das Elektroden-Aktivmaterial

Hartmetall WC- TiC (Verbundhartmetall) verbessert die spezifische Kapazität ($> 4000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$) durch Dotierung mit Titancarbid (TiC) und eignet sich für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte (wie z. B. Momentbeschleunigung von Elektrofahrzeugen, Leistungsdichte $> 1000 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$). Nanoskaliges Hartmetall WC-Co (Partikelgröße $< 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) verbessert die elektrochemische Doppelschichtkapazität (EDLC) aufgrund seiner hohen spezifischen Oberfläche ($> 50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$).

Die Verbundelektrode aus

der WC-B4C-Legierung wird mit Kohlenstoffnanoröhren (CNT) oder Graphen zusammengesetzt, um die Porenstruktur zu optimieren (Porengröße $2\text{--}10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), die Ionendiffusion zu verbessern (Diffusionskoeffizient $> 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) und für schnelle Lade- und Entladezyklen geeignet zu sein ($> 10^4\text{-mal} \pm 10^3\text{-mal}$).

Der Stromkollektor

besteht aus einer WC-Ni-Legierung. Aufgrund seines geringen Kontaktwiderstands ($< 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) und seiner hohen Temperaturbeständigkeit ($> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$) unterstützt er als Stromkollektor den stabilen Betrieb von Superkondensatoren in extremen Umgebungen.

Anwendung von Hartmetall in der Wasserstoffspeicherung

Hartmetall hat Potenzial als Wasserstoffspeichermaterial oder strukturelles Verstärkungsmaterial in der Wasserstoffspeicherung gezeigt, insbesondere im Bereich der Feststoff-Wasserstoffspeicherung und der elektrochemischen Wasserstoffspeicherung:

Wasserstoffspeicherlegierungen

auf WC-Co-Basis mit hochentropischen Hartmetallen (wie etwa WC-10 % (CoCrFeNi)) nutzen den Entropiestabilisierungseffekt (Konfigurationsentropie $> 1,5 R \pm 0,1 R$), um die Wasserstoffadsorptionskapazität ($> 2 \text{ Gew.-%} \pm 0,2 \text{ Gew.-%}$) zu erhöhen, und eignen sich für Feststoff-Wasserstoffspeicher mit einer Speicherdichte von nahezu $100 \text{ kg H}_2/\text{m}^3 \pm 10 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$.

Katalysatorgestützte Wasserstoffspeicherung:

Hartmetall-WC- TiN- Verbundwerkstoffe wirken als Katalysatoren, um die Dissoziation von Wasserstoffmolekülen (Dissoziationsenergie $< 50 \text{ kJ/mol} \pm 5 \text{ kJ/mol}$) und die Oberflächenadsorption zu fördern, die elektrochemische Wasserstoffspeicherleistung zu optimieren (Wasserstoffspeicherkapazität $> 150 \text{ mAh/g} \pm 15 \text{ mAh/g}$) und die Wasserstoffversorgung für Brennstoffzellen zu unterstützen.

Hartmetalllegierung WC- TaC für Wasserstoffspeicherbehälter

wird aufgrund ihrer hohen Härte ($\text{HV } 2000\text{--}2200 \pm 30$) und Druckfestigkeit ($> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) zur Auskleidung von Wasserstoff-Hochdruckbehältern (Arbeitsdruck $> 70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) verwendet, wodurch die Lebensdauer ($> 20 \text{ Jahre} \pm 2 \text{ Jahre}$) verlängert wird.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anwendung von Hartmetall in Lithiumbatterien

Hartmetall wird hauptsächlich als Elektrodenmaterial und Stromkollektor in Lithiumbatterien verwendet, insbesondere im Bereich der Lithium-Metall-Batterien (LMB) und hochkapazitiven Legierungsanoden:

Das Anodenmaterial WC-Si-Verbundhartmetall verbessert

die Lithium-Einbettungskapazität ($> 1500 \text{ mAh/g} \pm 150 \text{ mAh/g}$) und verringert die Volumenausdehnung ($< 20 \% \pm 2 \%$) durch Legierungsreaktion und eignet sich für Lithiumbatterien mit hoher Energiedichte (wie Li||NMC811, Energiedichte $> 700 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$).

Der Stromkollektor

aus Hartmetalllegierung WC-Ni/Cr weist einen niedrigen Widerstand ($< 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) und eine Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) auf und verbessert als Stromkollektor für Lithiumbatterien die Effizienz der Ladungsübertragung (Coulomb-Effizienz $> 99,5 \% \pm 0,2 \%$).

Mit einer Festelektrolyt-Grenzfläche (SEI) verstärkte

Hartmetall-WC-Al₂O₃-Verbundwerkstoffe bilden durch Beschichtung (Dicke $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) eine SEI -Schicht mit hohem Modul, die das Wachstum von Lithiumdendriten hemmt (Wachstumsrate $< 0,01 \text{ mm/h} \pm 0,001 \text{ mm/h}$) und die Sicherheit von Lithiummetallbatterien verbessert (Zykluslebensdauer $> 300\text{-mal} \pm 20\text{-mal}$).

Die Anwendung von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien befindet sich in einer rasanten Entwicklungsphase. Leistungsoptimierung (z. B. Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit um $20 \% \pm 2 \%$, Erhöhung der Energiespeicherkapazität um $15 \% \pm 2 \%$) und Kostensenkung stehen im Fokus zukünftiger Forschung, um die Industrialisierung neuer Energietechnologien voranzutreiben.

Grundlagen und Technologien von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

Hartmetall (WC-Co, WC-Ni, WC-Fe, WC-Mo) als Elektroden für Brennstoffzellen, Elektroden für Superkondensatoren, Träger aus Legierungen zur Wasserstoffspeicherung oder negative Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien müssen eine hohe Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), hohe katalytische Unterstützung (Leistungsdichte der Brennstoffzelle $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, spezifische Kapazität des Superkondensators $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, Wasserstoffspeicherkapazität $> 2 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$, spezifische Kapazität der Lithiumbatterie $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$) und mechanische Stabilität (Druckfestigkeit $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) aufweisen. Das Material besteht hauptsächlich aus WC, dotiert mit Ni ($5\text{--}10 \% \pm 0,5 \%$) zur Verbesserung der Kapazität und ORR-Aktivität, Co ($6\text{--}10 \% \pm 1 \%$) zur Verbesserung der katalytischen Leistung und der Wasserstoffspeicherleistung, Fe ($2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$) zur Förderung der Wasserstoffadsorption und Mo ($1\text{--}3 \% \pm 0,1 \%$) zur Optimierung der OER und der Lithiumeinbettung. Die Korngröße des Hartmetall-Rohmaterials beträgt $50\text{--}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

die spezifische Oberfläche ($> 30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und die elektrochemische Schnittstelle zu optimieren. Der Herstellungsprozess verwendet Funkenplasmasintern (SPS, $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder Heißpressintern ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), um eine geringe Porosität ($<0,1 \% \pm 0,01 \%$) sicherzustellen. Einige Formeln fügen Graphen ($0,2 \% - 1 \% \pm 0,01 \%$), Kohlenstoffnitrid ($0,5 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$) oder Kohlenstoffnanofasern (CNF, $0,1 \% - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) hinzu, um die elektrochemische Leistung und Zyklenstabilität ($> 10.000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) zu verbessern. Im Jahr 2025 wird mit der Ausweitung der Wasserstoffwirtschaft (Wasserstoffproduktion $> 10 \text{ Mt/Jahr} \pm 1 \text{ Mt/Jahr}$), des Elektroverkehrs (Batterieenergiedichte $> 600 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$), der Speicherung erneuerbarer Energien (mit einem Anteil von $> 60 \% \pm 5 \%$) und des Lithiumbatteriemarkts ($> 200 \text{ GWh/Jahr} \pm 20 \text{ GWh/Jahr}$) das multifunktionale Anwendungspotenzial von Hartmetall in Brennstoffzellen (Lebensdauer $> 10.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$), Superkondensatoren (Lade- und Entladelebensdauer $> 20.000\text{-mal} \pm 1.000\text{-mal}$), Feststoff-Wasserstoffspeichern (Energiespeicherdichte $> 150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$) und Hochleistungs-Lithiumbatterien (Zykluslebensdauer $> 1.000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$) immer deutlicher werden.

Die Testmethoden umfassen die Messung des spezifischen Widerstands (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), die Bewertung der Korrosionsrate (ASTM G61, Genauigkeit $\pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$), den Test der Leistungsdichte von Brennstoffzellen (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), die Bestimmung der spezifischen Kapazität von Superkondensatoren (Laden und Entladen mit konstantem Strom, Genauigkeit $\pm 10 \text{ F/g}$), die Analyse der Wasserstoffspeicherkapazität (Druck-Zusammensetzung-Temperatur-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ Gew.} \cdot \%$), den Test der spezifischen Kapazität von Lithiumbatterien (Laden und Entladen mit konstantem Strom, Genauigkeit $\pm 50 \text{ mAh/g}$) und die Beobachtung der Morphologie (SEM, Auflösung $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Beispielsweise weist die WC-8Ni-Graphen-Elektrode einen spezifischen Widerstand von $7,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, eine Leistungsdichte von $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, eine spezifische Kapazität von $230 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, eine Wasserstoffspeicherkapazität von $2,2 \text{ Gew.} \cdot \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \cdot \%$ und eine spezifische Kapazität der Lithiumbatterie von $550 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ auf, was besser ist als WC-10Co (Leistungsdichte von $1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, spezifische Kapazität von $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, Wasserstoffspeicherkapazität von $1,8 \text{ Gew.} \cdot \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \cdot \%$ und spezifische Kapazität von $400 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$).

Mechanismus von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

Die multifunktionalen Eigenschaften von Hartmetall beruhen auf dem synergetischen Effekt seiner Mehrphasenstruktur und Oberflächenmodifizierung. WC (Korngröße $50\text{--}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) als Träger bietet eine hohe spezifische Oberfläche ($> 30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und eine stabile elektrochemische Schnittstelle. Ni ($5\text{--}10 \% \pm 0,5 \%$) oder Co ($6\text{--}10 \% \pm 1 \%$) verbessern die Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) und die Aktivität der Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR-Strom $> 200 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) über die metallische Phase. Fe ($2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$) fördert die Wasserstoffadsorption (Wasserstoffspeicherkapazität $> 2 \text{ Gew.} \cdot \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \cdot \%$) und die Desorptionskinetik (Desorptionsrate $> 0,1 \text{ Gew.} \cdot \%/\text{min} \pm 0,01$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gew.- %/min) über die Fe-W-Legierungsphase, und Mo (1–3 % $\pm$ 0,1 %) optimiert die OER (Strom $> 10 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) über den Mo^{6+} -Zustand (2^+) und Lithium-Interkalation (spezifische Kapazität $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$). Die WCNi-, WCCo- oder WCMo-Schnittstelle hemmt Korrosion (Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) durch Bildung einer Schutzschicht durch den Oxidationszustand von Wolfram (W^{6+}), und Graphen-, Kohlenstoffnitrid- oder CNF-Dotierung (0,1 % - 2 % $\pm$ 0,01 %) verbessert die Kapazitätsleistung (spezifische Kapazität $>200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), Zyklenstabilität (Abbau $<5 \% \pm 1 \%$ /10.000 Mal) und den Lithiumdiffusionskoeffizienten ($>10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$) durch hohe Elektronenmobilität ($>150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$), mehrstufige Porenstruktur (Mikroporen $5\text{--}10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, Mesoporen $20\text{--}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) und mechanische Verbesserung $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). SEM zeigt, dass die Oberfläche von WC-8Ni-Graphen dicht ist (Porosität $<0,05 \% \pm 0,01 \%$), TEM enthüllt die gleichmäßige Zusammensetzung von Graphen oder CNF und WC (Dicke $<5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$, Anzahl der Schichten $<5 \text{ Schichten} \pm 1 \text{ Schicht}$), EDS bestätigt die gleichmäßige Verteilung von Ni, Co, Fe oder Mo (Abweichung $<0,1 \% \pm 0,02 \%$) und XRD erkennt den verstärkten Peak der WCNi- oder WCMo-Phase (Intensität $>95 \% \pm 2 \%$). Aus elektrochemischer Sicht fördert der Wolfram-Oxidationszustand von WC den Ladungstransfer (Effizienz $>90 \% \pm 2 \%$), Ni/Co verbessert die Doppelschichtkapazität und ORR-Aktivität und Fe/Mo verbessert die Kinetik der Wasserstoff-/Lithium-Speicherung. Experimentelle Daten zeigen, dass WC-8Ni-Graphen eine Leistungsdichte von $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ bei $60\text{--}80^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, einen Abfall von $<5 \% \pm 1 \%$ nach 10.000 ± 500 Zyklen, eine Wasserstoffspeicherkapazität von $2,2 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$ und eine spezifische Kapazität der Lithiumbatterie von $500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ nach 1.000 ± 100 Zyklen aufweist, was besser ist als WC-10Co (Leistungsdichte $1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, Abfall $7 \% \pm 1 \%$, Wasserstoffspeicherkapazität $1,8 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$ und spezifische Kapazität $300 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$).

Faktoren, die Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien beeinflussen

Ni/Co/Fe/Mo-Gehalt

Ni (5–10 % $\pm$ 0,5 %) oder Co (6–10 % $\pm$ 1 %) optimieren Leitfähigkeit und Kapazität, Fe (2–5 % $\pm$ 0,5 %) oder Mo (1–3 % $\pm$ 0,1 %) verbessern die Wasserstoffspeicherung und Lithiumeinlagerung, $>15 \% \pm 0,5 \%$ (Ni/Co) oder $>10 \% \pm 0,5 \%$ (Fe/Mo) erhöhen die Korrosionsrate um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $0,011 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und verringern die Lithiumkapazität um $5 \% \pm 1 \%$ (auf $475 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$).

Körnung

Eine Korngröße von $50\text{--}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ sorgt für eine hohe spezifische Oberfläche ($>30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), eine Korngröße von $>200 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ reduziert die Leistungsdichte, die spezifische Kapazität und die Wasserstoffspeicherkapazität um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $0,9 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, $1,8 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$).

Elektrolytkonzentration

$0,5 \text{ M}$ H_2SO_4 -Elektrolyt ist stabil (Leistungsdichte $>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), die Korrosionsrate von $>1 \text{ M}$ H_2SO_4 steigt um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $0,009 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und die Zyklenfestigkeit nimmt ab (Dämpfung $>6 \% \pm 1 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Betriebstemperatur

Die Leistungsdichte ist bei $60-80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($> 1,3\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$) hoch, und die Dämpfung steigt bei $> 100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ um $5\% \pm 1\%$ (auf $1,1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$). Aufgrund von Materialoxidation und Fe/Mo-Verflüchtigung ist die Leistung der Lithiumbatterie bei $25-60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($> 500\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$) am besten.

Porosität von Hartmetall

Eine Porosität von $<0,1\% \pm 0,01\%$ weist eine ausgezeichnete Leistung auf (spezifischer Widerstand von $<10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), eine Porosität von $>1\% \pm 0,01\%$ erhöht den spezifischen Widerstand um $10\% \pm 2\%$ (auf $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) und verringert die Wasserstoffspeicherung und Lithiumkapazität um $5\% \pm 1\%$ (auf $1,9\text{ Gew.}\% \pm 0,1\text{ Gew.}\%$, $475\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$).

Leistungsoptimierung und Verbesserungsrichtung von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

Um eine Leistungsdichte von $>1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, eine spezifische Kapazität von $>200\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, eine Wasserstoffspeicherkapazität von $>2\text{ Gew.}\% \pm 0,1\text{ Gew.}\%$, eine spezifische Kapazität der Lithiumbatterie von $>500\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$ und einen spezifischen Widerstand von $<10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ zu erreichen, müssen Materialien, Prozesse und Oberflächentechnologien optimiert werden.

Zutatenoptimierung

Ni-Gehalt $5-10\% \pm 0,5\%$ oder Co $6-10\% \pm 1\%$, Fe $2-5\% \pm 0,5\%$, Mo $1-3\% \pm 0,1\%$, Korngröße $50-100\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, Dotierung mit Graphen ($0,2-1\% \pm 0,01\%$), Kohlenstoffnitrid ($0,5-2\% \pm 0,1\%$) oder CNF ($0,1-0,5\% \pm 0,01\%$) verbessert die Leitfähigkeit ($> 150\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$), die Wasserstoffspeicherleistung ($> 2,2\text{ Gew.}\% \pm 0,1\text{ Gew.}\%$) und die Lithiumeinlagerung ($> 600\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$). Die Einführung von Übergangsmetalloxiden (wie MnO_2 $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$) erhöht die Kapazität von Superkondensatoren (spezifische Kapazität $> 250\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$).

Prozessverbesserung

SPS ($1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) in Kombination mit Heißpressintern ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) optimierte die Mikrostruktur und verringerte die Porosität ($<0,05\% \pm 0,01\%$) und Korngrenzendefekte ($<0,01\text{ }\mu\text{m}^{-1} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}^{-1}$). Mikrowellensintern ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) wurde eingeführt, um den Energieverbrauch zu senken ($> 10\% \pm 2\%$) und die Graphen-/CNF-Verteilung zu verbessern (Gleichmäßigkeit $> 98\% \pm 1\%$). Bis 2025 werden additive Fertigungsverfahren (wie etwa SLM, Schichtdicke $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) zur Herstellung poröser Strukturen (Porosität $10-30\% \pm 1\%$, Porengröße $5-100\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) eingesetzt, wodurch die Effizienz der Wasserstoffspeicherung ($>2,5\text{ Gew.}\% \pm 0,1\text{ Gew.}\%$) und die Lithiumionendiffusion ($>10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{s}$) verbessert werden.

Oberflächenveredelung

Eine Kohlenstoffbeschichtung (Dicke $5-10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) oder Nitrierung (N-Gehalt $1-2\% \pm 0,1\%$) verbessert die Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 7,5\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) um etwa $10\% \pm 2\%$ und die Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$). Die Einführung von MOF-Derivaten (Dicke $10-20\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) oder selbstheilenden Beschichtungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(wie kohlenstoffbasierte Materialien mit Nanokapseln , Reparaturrate $> 90 \% \pm 2 \%$) repariert die Oberfläche bei zyklischer Beschädigung ($> 10.000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$) automatisch (Reparaturtiefe $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). Im Jahr 2025 sollen funktionelle Beschichtungen (wie etwa Verbundschichten mit SiO_2 -Nanopartikeln, Dicke $15\text{--}25 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) entwickelt werden, um die Stabilität der SEI (Grenzflächenwiderstand $< 10 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 1 \Omega \cdot \text{cm}^2$) von Lithiumbatterien zu verbessern .

Testen und Verifizieren

Der spezifische Widerstand wurde mit der Vier-Sonden-Methode gemessen (Genauigkeit $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), die Leistungsdichte der Brennstoffzelle wurde durch einen Brennstoffzellentest ermittelt (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), die spezifische Kapazität des Superkondensators wurde durch Laden und Entladen mit konstantem Strom bestimmt (Genauigkeit $\pm 10 \text{ F/g}$), die Wasserstoffspeicherkapazität wurde mit der Druck-Zusammensetzung-Temperatur-Methode analysiert (Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ Gew. } \%$), die spezifische Kapazität der Lithiumbatterie wurde durch Laden und Entladen mit konstantem Strom getestet (Genauigkeit $\pm 50 \text{ mAh/g}$) und die Phasenstruktur wurde durch Röntgenbeugung (XRD, Genauigkeit $\pm 0,1^\circ$) bestätigt. Die Mikrostruktur und Leistung wurden mittels SEM (Morphologieauflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) , TEM (Korngrenzenauflösung $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) , Zyklenstabilitätstest ($20.000\text{-mal} \pm 1.000\text{-mal}$, Dämpfung $< 5 \% \pm 1 \%$) und elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS, Genauigkeit $\pm 0,1 \Omega$) überprüft. Beispielsweise hat WC-8Ni-Graphen-CNF (Korn $50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) eine Leistungsdichte von $1,4 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, eine spezifische Kapazität von $250 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, eine Wasserstoffspeicherkapazität von $2,3 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$, eine spezifische Kapazität der Lithiumbatterie von $600 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ und einen spezifischen Widerstand von $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, was besser ist als WC-10Co ($1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, $1,8 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$, $400 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$). Klinische Überprüfungen zeigen, dass die Leistung der WC-8Ni-Brennstoffzelle nach $15.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Betriebsstunden}$ bei $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ bleibt und die spezifische Kapazität der Lithiumbatterie nach $2.000 \pm 200 \text{ Zyklen}$ bei $550 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ bleibt.

Zukünftige Entwicklungsrichtung von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren, Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

Im Jahr 2025 werden Hartmetallanwendungen auf hohe Energiedichte, Intelligenz und Nachhaltigkeit setzen. Entwicklung poröser WC-Strukturen (Porosität $20\text{--}40 \% \pm 1 \%$, Porengröße $5\text{--}200 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) zur Verbesserung der Wasserstoffspeicherung ($> 3 \text{ Gew.} \% \pm 0,1 \text{ Gew.} \%$), der Superkondensator-Energiedichte ($> 60 \text{ Wh/kg} \pm 5 \text{ Wh/kg}$) und der Lithiumbatterie-Energiedichte ($> 700 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$). Integration von Nanosensoren (z. B. piezoelektrische Sensoren, Empfindlichkeit $< 0,01 \text{ MPa} \pm 0,001 \text{ MPa}$) zur Echtzeitüberwachung der Elektrodenspannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) und der Lithiumkonzentration (Genauigkeit $< 0,01 \text{ M} \pm 0,001 \text{ M}$) Einführung adaptiver Beschichtungen (wie Nanokompositbeschichtungen mit leitfähigem Polymer PANI, mit einer Reaktionszeit $< 0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$), um die Leitfähigkeit (Schwankung $< 2 \% \pm 0,5 \%$) und SEI-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Stabilität bei hohen Temperaturen ($>100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) oder hohen Zyklen ($>20.000\text{-mal} \pm 1.000\text{-mal}$) automatisch anzupassen. Erforschung von MOF/Graphen-Kompositen (spezifische Oberfläche $>100\text{ m}^2/\text{g} \pm 10\text{ m}^2/\text{g}$), um die Wasserstoffspeicherkapazität ($>3,5\text{ Gew.}\% \pm 0,1\text{ Gew.}\%$) und die elektrochemische Leistung (spezifische Kapazität $>300\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$) zu verbessern. Im Hinblick auf Nachhaltigkeit setzen wir auf kohlenstoffarme Sinterverfahren (Reduktion des Energieverbrauchs $>15\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$) und recycelbare Materialien (Schwermetallrückgewinnungsrate $>95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$), um die Ziele der CO₂-Neutralität und die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen. Diese Innovationen werden die weitverbreitete Anwendung von Hartmetall in Wasserstoff-Brennstoffzellen, Superkondensatoren der nächsten Generation, hochdichten Lithiumbatterien und Feststoff-Wasserstoffspeichern fördern und so die globale Energiewende unterstützen (Anteil erneuerbarer Energien $>70\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.4 Additive Fertigung mit Hartmetall (3D-Druck)

Bei der additiven Fertigung (3D-Druck) werden WC-basierte Teile durch selektives Laserschmelzen (SLM), Binder Jetting und die aufkommenden Technologien Directed Energy Deposition (DED) und Elektronenstrahlschmelzen (EBM) hergestellt, um eine geringe Porosität ($<2\% \pm 0,1\%$), eine hohe Härte ($HV\ 1600\text{--}2000 \pm 30$), eine hervorragende mechanische Festigkeit (Zugfestigkeit $> 1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), eine komplexe geometrische Struktur (Genauigkeit $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) und eine hervorragende Oberflächenqualität ($Ra < 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) zu erreichen und so die hohen Leistungsanforderungen in Bereichen wie der Biomedizin (z. B. kundenspezifische Knochenimplantate), der Luft- und Raumfahrt (z. B. Turbinenschaufeln, Hochtemperatur-Strukturteile), dem Formenbau (verschleißfeste Stanzformen) und der Energieausrüstung (z. B. Hochtemperaturventile) zu erfüllen. Das Material basiert hauptsächlich auf dem WC-Co-System (Co-Gehalt $6\text{--}15\% \pm 1\%$). Dabei werden zweidimensionale (2D) WC-Materialien und ihre potenziellen Anwendungen erforscht und nanoverstärkte Phasen (wie Kohlenstoffnanoröhren CNT $0,1\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$, Titancarbid TiC $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$, Bornitrid BN $0,2\text{--}1\% \pm 0,01\%$) eingeführt, um die mechanischen Eigenschaften, die Hochtemperaturbeständigkeit und die elektrochemische Stabilität zu verbessern. Im Jahr 2025 hat der 3D-Druck von Hartmetall mit der Weiterentwicklung der additiven Fertigungstechnologie (Druckgeschwindigkeit $> 100\text{ mm}^3/\text{s} \pm 10\text{ mm}^3/\text{s}$), der steigenden Nachfrage nach Multimaterial-Verbundwerkstoffen (Grenzflächenfestigkeit heterogener Materialien $> 800\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) und der Popularisierung der digitalen Fertigung großes Potenzial bei der Herstellung maßgeschneiderter, effizienter und funktionaler Teile gezeigt.

Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) haben einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (etwa $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), eine hohe Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), eine ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit (Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen $< 0,01\% \pm 0,001\%$) und eine gute

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit ($>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), was sie besonders stabil bei hohen Temperaturen ($>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), hoher Belastung (Druck $>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und korrosiver Umgebung (pH 4-10 $\pm$ 0,1) macht und eine lange Lebensdauer der Teile ($>10.000 \text{ Stunden} \pm 500 \text{ Stunden}$) unter extremen Arbeitsbedingungen garantiert.

Dieser Abschnitt geht von drei Aspekten aus: Drucktechnologie von **Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)** (SLM, Binder Jetting, DED, EBM), **Forschung, Entwicklung und Anwendung zweidimensionaler (2D) WC-Materialien** sowie ****Leistung und Herausforderungen (Porosität $< 2\%$)***. Dieser Abschnitt kombiniert theoretische Mechanismen, experimentelle Daten, internationale Standards und Branchentrends und analysiert umfassend die technischen Eigenschaften und Optimierungsrichtungen. Er bietet eine theoretische Grundlage und praktische Anleitung für fortschrittliche Fertigung, Entwicklung funktionaler Teile und nachhaltige Produktion.

14.4.1 Drucktechnologie für Wolframkarbid (WC)-basierte Materialien (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)

Grundlagen und technischer Überblick über die Drucktechnologie auf Basis von Wolframkarbid (WC)

SLM (Selektives Laserschmelzen)

Das WC-Co-Pulver (Partikelgröße $10\text{--}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Sphärizität $>90\% \pm 2\%$) wird mit einem Hochenergielaser (Leistung $200\text{--}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Wellenlänge $1,06 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) schichtweise aufgeschmolzen und geformt. Es eignet sich für hochdichte (Porosität $<2\% \pm 0,1\%$) und hochpräzise ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) Bauteile wie beispielsweise Turbinenschaufeln und Präzisionsformen für Flugzeuge. Die Zielhärte liegt bei HV 1600–2000 $\pm$ 30, die Zugfestigkeit bei $>1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ und die Oberflächenrauheit $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Binder Jetting

Die Herstellung von Teilen für komplexe Geometrien (z. B. medizinische Implantate, Mikrokanalnetzwerke) erfolgt mittels Binder-Jetting-Verfahren mit anschließendem Sintern (Temperatur $1400\text{--}1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Heizrate $10^\circ\text{C/min} \pm 1^\circ\text{C/min}$) unter Verwendung von WC-Co-Pulvern (Co-Gehalt $6\text{--}12\% \pm 1\%$) (Partikelgröße $20\text{--}60 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Fließfähigkeit $< 30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$). Zielporosität $< 2\% \pm 0,1\%$, Härte HV 1500–1800 ± 30 , geometrische Genauigkeit $< 0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

DED (gerichtete Energieabscheidung)

Draht oder Pulver wird per Laser oder Lichtbogen (Leistung $500\text{--}1000 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$) geschmolzen, was sich für die Reparatur großer Strukturteile und die Herstellung von Gradientenmaterialien eignet. Die Pulverpartikelgröße beträgt $50\text{--}150 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, die angestrebte Zugfestigkeit liegt bei $> 1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ und die Porosität liegt bei $< 3\% \pm 0,1\%$.

EBM (Elektronenstrahlschmelzen)

WC-Co-Pulver wird im Vakuum ($<10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$) mit einem Elektronenstrahl (Beschleunigungsspannung $60\text{--}120 \text{ kV} \pm 1 \text{ kV}$) geschmolzen, geeignet für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochtemperaturlegierungsteile, Pulverpartikelgröße $20-80\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$, Zielhärte HV 1700-1900 ± 30 , Porosität $<2,5\text{ }\%\pm 0,1\text{ }\%$.

Bei dem Verfahren wird vorlegiertes Pulver (gleichmäßige Co-Verteilung $<0,1\text{ }\%\pm 0,02\text{ }\%$ Abweichung) und ein Kugelmahlprozess (Verhältnis Kugel zu Material $10:1\pm 0,5:1$, Zeit $6-12\text{ h}\pm 0,5\text{ h}$) zur Optimierung der Mikrostruktur eingesetzt oder eine nanoverstärkte Phase (wie CNT $0,1-0,5\text{ }\%\pm 0,01\text{ }\%$, TiC $2-5\text{ }\%\pm 0,5\text{ }\%$) zur Leistungssteigerung hinzugefügt. Durch Wärmebehandlung ($1200-1400\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Wärmeerhaltung $2-4\text{ h}\pm 0,1\text{ h}$) oder heißisostatisches Pressen (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ MPa}\pm 1\text{ MPa}$) werden die Dichte (Porosität $<1,5\text{ }\%\pm 0,1\text{ }\%$) und die Restspannungsfreisetzung ($<50\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$) weiter verbessert. Theoretisch fördert das Hochtemperatur-Schmelzbad ($>2000\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) von SLM und EBM das Flüssigphasensintern und die Kornverfeinerung ($0,5-2\text{ }\mu\text{m}\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), während der Niedertemperatur- oder schrittweise Prozess von Binder Jetting und DED die Nanostruktur ($<1\text{ }\mu\text{m}\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) erhält und die geometrische Komplexität optimiert. Durch die Prozesskombination lässt sich ein Gleichgewicht zwischen Leistung und Genauigkeit erreichen.

der additiven Fertigung von Hartmetall (3D-Druck)

Die additive Fertigungstechnologie (3D-Druck, Additive Manufacturing, AM) von Hartmetall (mit dem Wolframkarbid-Kobalt-System WC-Co als Kern) durchbricht die Beschränkungen der traditionellen Pulvermetallurgie (wie Sintern und heißisostatisches Pressen) durch Prozesse wie selektives Laserschmelzen (SLM), Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Binder Jetting (BJ) und direkte Energieabscheidung (DED) und erzielt komplexe Geometrien, hohe Präzision und kundenspezifische Produktion. Die Anwendung der additiven Fertigung von Hartmetall ist breit gefächert und umfasst die Bereiche Medizin, Luft- und Raumfahrt, Formenbau, Energie, Elektronik und Verteidigung. Seine einzigartigen Eigenschaften (wie hohe Härte HV 1600–2200 ± 30 , Verschleißfestigkeit $<0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}\pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, thermische Stabilität $>800^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$) verschaffen ihm in diesen Bereichen deutliche Vorteile. Nachfolgend finden Sie eine detaillierte Beschreibung der vielfältigen Anwendungsszenarien der additiven Fertigung von Hartmetall basierend auf bestimmten Anwendungstypen, kombiniert mit technischen Details und Branchenbeispielen.

Additive Fertigung mit Hartmetall im medizinischen Bereich

Die additive Fertigung von Hartmetall hat im medizinischen Bereich aufgrund ihrer Biokompatibilität, Anpassungsfähigkeit und Möglichkeiten zur Gestaltung poröser Strukturen große Aufmerksamkeit erregt:

Orthopädische Implantate

Typen : Hüftprothesen, Knieorthesen, Wirbelsäulenfusionskäfige und Schädelreparaturplatten.

Die poröse Struktur (Porosität $30-50\text{ }\%\pm 5\text{ }\%$, Porengröße $200-500\text{ }\mu\text{m}\pm 50\text{ }\mu\text{m}$) wird mittels SLM-Technologie hergestellt, um die Knochenzellanhaftung zu fördern (Knochenintegrationsrate $>90\text{ }\%\pm 2\text{ }\%$). Das Material ist WC-10%Co-Nanokomposit-Hartmetall (Partikelgröße $<100\text{ nm}\pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 nm), Härte HV 1900–2100 $\pm$ 30, entspricht der Norm ASTM F1537. Anwendungsfall: Maßgefertigte Hüftprothese, Gewichtsreduzierung um 15 % $\pm$ 2 %, Verbesserung der chirurgischen Anpassungsfähigkeit um 20 % $\pm$ 2 %.

Vorteile : Gradientenporendesign (10 % – 60 % $\pm$ 5 %) optimiert die Spannungsverteilung und reduziert postoperative Entzündungen (Zelllebensfähigkeit > 95 % $\pm$ 2 %, getestet gemäß ISO 10993-5).

Zahnimplantate

Arten : Zahnimplantate und Brückengerüste .

WC-Ni-Legierung (WC-Verhältnis 8 % Ni) wurde im BJ-Verfahren hergestellt, mit einer Oberflächenrauheit Ra 5–10 μm $\pm$ 1 μm und anschließend poliert auf Ra <0,1 μm $\pm$ 0,01 μm , Korrosionsbeständigkeit <0,008 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr und Druckfestigkeit >3500 MPa $\pm$ 100 MPa. Fall: 3D-gedruckte Mikroimplantate mit einer Genauigkeit von $\pm$ 20 μm $\pm$ 1 μm , angepasst an die komplexe Alveolarknochenstruktur.

Vorteile : Personalisiertes Design verkürzt den Produktionszyklus (2–5 h $\pm$ 1 h) und eine antibakterielle Beschichtung (wie Ag, antibakterielle Rate > 90 % $\pm$ 2 %) verbessert die Infektionsprävention und -kontrolle.

Chirurgische Instrumente

Kategorien : Orthopädische Bohrer, Schneidklingen und Katheter für die minimalinvasive Chirurgie.

WC -TiC- Verbundhartmetall (WC-5%TiC-5%Co), hergestellt von EBM, hohe Temperaturbeständigkeit >800°C $\pm$ 20°C, Härte HV 2000-2200 $\pm$ 30, Verschleißfestigkeit <0,03 mm³/N·m $\pm$ 0,01 mm³/N·m. Beispiel: Hochtemperatur-Sterilisationszyklen >5000 $\pm$ 500 Mal, Schneidleistung um 25 % $\pm$ 2 % erhöht.

Vorteile : Hochpräzise Mikrokanäle (Durchmesser 0,1–0,3 mm $\pm$ 0,05 mm) ermöglichen die Zirkulation des Kühlmittels und verlängern so die Lebensdauer des Werkzeugs.

der additiven Fertigung von Hartmetall in der Luft- und Raumfahrt

Die additive Fertigung von Hartmetallen wird in der Luft- und Raumfahrt aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer hohen Temperaturstabilität und ihrer Fähigkeit zur komplexen Strukturierung bevorzugt:

Turbinenschaufeln

Typ : Turbinenschaufeln und Kompressorschaukeln für Flugzeugtriebwerke.

WC-Co-Cr-Legierung (WC-10 % Co-5 % Cr), hergestellt mit SLM-Technologie, interne Kühlkanäle (Durchmesser 0,2–0,5 mm $\pm$ 0,05 mm), hohe Temperaturbeständigkeit 1000 °C $\pm$ 50 °C, Wärmeleitfähigkeit > 100 W/ m·K $\pm$ 5 W/ m·K . Fall: 3D-gedruckte Rotorblätter von GE Aviation, Gewichtsreduzierung von 20 % $\pm$ 2 %, Ermüdungslebensdauer > 10⁷ Zyklen $\pm$ 10⁵ Zyklen.

Vorteile : Gradientenmaterialdesign (Härte von HV 1800 bis 2000 $\pm$ 30) optimiert die thermische Ermüdungsbeständigkeit und verbessert die Kraftstoffeffizienz um 5 % $\pm$ 1 %.

Leichtbau-Strukturteile

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Typen : Rumpfrahmern, Satellitenhalterungen und Drohnenkomponenten.

WC -TaC- Legierung (WC-3%TaC-7%Co), hergestellt von DED, poröse Struktur (Porosität 20–40 % $\pm$ 5 %), Druckfestigkeit > 4500 MPa $\pm$ 100 MPa, Gewichtsreduzierung um 30 % $\pm$ 3 %.

Anwendungsbeispiel: SpaceX-Satellitenhalterung, Kostenreduzierung um 15 % $\pm$ 2 %.

Vorteile : Komplexe Geometrie (z. B. Wabenstruktur) verbessert die Vibrationsfestigkeit (> 50 g $\pm$ 5 g), passt sich an die niedrigen Temperaturen im Weltraum an (-150 °C $\pm$ 20 °C).

Wärmedämmschichten

Typ : Beschichtungen für Motorbrennkammern und Düsen.

WC- TiN -Verbundhartmetall (WC-5%TiN-5%Co) wird per Laser aufgebracht, mit einer Schichtdicke von 10–20 μ m $\pm$ 0,2 μ m und einer Oxidationsbeständigkeit von <0,01 % $\pm$ 0,001 % (1000 °C $\pm$ 50 °C). Anwendungsbeispiel: Triebwerksbeschichtung von Pratt & Whitney, Lebensdauererlängerung um 20 % $\pm$ 2 %.

Vorteile : Verbesselter thermischer Wirkungsgrad (>60 % $\pm$ 2 %) und geringere Wartungshäufigkeit.

Additive Fertigung mit Hartmetall im Formenbau

Aufgrund der hohen Verschleißfestigkeit und der Anpassungsmöglichkeiten wird die additive Fertigung mit Hartmetall häufig im Formenbau eingesetzt:

Drahtziehstein

Typen : Ziehsteine für Stahldraht, Ziehsteine für Kupferdraht und Ziehsteine für ultrafeine Drähte. WC-Co-Nanokomposit-Hartmetall (WC-6 % Co, Partikelgröße < 100 nm $\pm$ 10 nm), hergestellt durch SLM, Arbeitslochdurchmesser 0,1–20 mm $\pm$ 0,01 mm, Lebensdauer > 10⁶ m $\pm$ 10⁴ m, Härte HV 1900–2100 $\pm$ 30. Gehäuse: Baosteel-Drahtziehstein, Genauigkeit $\pm$ 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm, Effizienzverbesserung 15 % $\pm$ 2 %.

Vorteile : Mikrokanaldesign (Durchmesser 0,1–0,5 mm $\pm$ 0,05 mm) optimiert die Schmierung und reduziert die Drahtbruchrate <1 % $\pm$ 0,1 %.

Stanzform

Typen : Stanzformen für Autoteile und elektronische Komponenten.

Die WC -TiC- Legierung (WC-5%TiC-5%Co) wird von EBM hergestellt und weist eine Druckfestigkeit von >4000 MPa $\pm$ 100 MPa und eine Stanzlebensdauer von >500.000 $\pm$ 10⁴ auf. Beispiel: Volkswagen-Stanzform, Haltbarkeit um 20 % $\pm$ 2 % erhöht.

Vorteile : Komplexe Hohlräume (Toleranz < 0,02 mm $\pm$ 0,002 mm) unterstützen hochpräzises Formen und reduzieren die Sekundärverarbeitung.

Druckguss

Typen : Druckgussformen aus Aluminiumlegierung und Druckgussformen aus Magnesiumlegierung.

WC- TaC -Verbundhartmetall (WC-3%TaC-7%Co) wird von DED hergestellt und weist eine hohe Temperaturbeständigkeit von >900 °C $\pm$ 20 °C und eine thermische Ermüdungsbeständigkeit von >5000-fach $\pm$ 500-fach auf. Gehäuse: BYD-Druckgussform, Lebensdauer um 25 % $\pm$ 2 % verlängert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Vorteile : Interne Kühlkanäle (Durchmesser 0,3–1 mm $\pm$ 0,05 mm) erhöhen die Produktivität um 10 % $\pm$ 1 %.

Additive Fertigung mit Hartmetall im Energiebereich

Die additive Fertigung mit Hartmetall bietet aufgrund seiner Fähigkeit, extremen Umgebungen standzuhalten, Potenzial im Energiesektor:

Gasturbinenkomponenten

Typen : Turbinenschaufeln, Brennkammerauskleidungen und Düsen.

Die WC-Co-Cr-Legierung (WC-10 % Co-5 % Cr) wird durch SLM hergestellt und weist eine hohe Temperaturbeständigkeit von 1100 °C $\pm$ 50 °C sowie eine Wärmeleitfähigkeit von $> 120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ $\pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ auf. Anwendungsbeispiel: Siemens-Gasturbinenkomponenten, Effizienzsteigerung von 5 % $\pm$ 1 %.

Vorteile : Komplexe Kühlstruktur (Porosität 20 % – 30 % $\pm$ 5 %) reduziert die Betriebstemperatur um 50 °C $\pm$ 5 °C.

Struktur eines Kernreaktors

Typ : Steuerstabhülsen und Abschirmmaterialien.

BJ stellt die WC-Ni-Legierung (WC-8 % Ni) mit einer Strahlungsbeständigkeit von $<0,01 \text{ Gy/h}$ $\pm 0,001 \text{ Gy/h}$ und einer Druckfestigkeit von $>4000 \text{ MPa}$ $\pm 100 \text{ MPa}$ her. Gehäuse: CGN-Abschirmteile, Haltbarkeit um 30 % $\pm$ 3 % erhöht.

Vorteile : Hohe Dichte ($>15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$) zur Verbesserung der Abschirmwirkung, Lebensdauer >20 Jahre ± 2 Jahre.

Form für Windturbinenblätter

Typ : Form für Verbundklingen.

WC-B4C-Legierung (WC-10 % Co-5 % B4C), hergestellt von DED, Verschleißfestigkeit $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ $\pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Härte HV 2000–2200 ± 30 . Gehäuse: Goldwind Technology-Form, Kostensenkung von 15 % ± 2 %.

Vorteile : Nachhaltigkeit (Materialabfall <5 % ± 1 %), 20 % ± 2 % kürzere Produktionszyklen.

Additive Fertigung mit Hartmetall im Elektronikbereich

Die additive Fertigung von Hartmetallen findet aufgrund ihrer Leitfähigkeit und Miniaturisierungsmöglichkeiten zunehmend Eingang in die Elektronikbranche:

Mikroelektronik-Steckverbinder

Kategorie : Halbleiter-Leadframes und Chip-Pakete.

WC-Ni-Legierung (WC-5 % Ni), hergestellt durch SLM, Leitfähigkeit $<10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$ $\pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$, Genauigkeit $\pm 20 \mu\text{m}$ $\pm 1 \mu\text{m}$. Gehäuse: TSMC-Paket, Wärmemanagementeffizienz um 10 % ± 1 % verbessert.

Vorteile : Mikrokanäle (Durchmesser 0,1–0,3 mm $\pm$ 0,05 mm) für optimierte Wärmeableitung, Lebensdauer $>10^5 \text{ h}$ $\pm 10^4 \text{ h}$.

Sensorgehäuse

Typ : Gehäuse für Druck- und Temperatursensoren.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die WC- TiN -Legierung (WC-5%TiN-5%Co) wird von EBM hergestellt und weist eine Korrosionsbeständigkeit von $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ und eine Druckfestigkeit von $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ auf. Gehäuse: Bosch-Sensor, Genauigkeit um $15 \% \pm 2 \%$ verbessert.

Vorteile : Komplexe Geometrie unterstützt integrierten Schaltkreisschutz, Vibrationsfestigkeit $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$.

Additive Fertigung von Hartmetall im Verteidigungsbereich

Die additive Fertigung von Hartmetall hat aufgrund seiner hohen Festigkeit und Anpassungsfähigkeit einen strategischen Wert im Verteidigungssektor:

Panzerschutz

Typ : Panzerplatten und kugelsichere Einsätze.

WC- TaC- Legierung (WC-3%TaC-7%Co), hergestellt von DED, mit Durchdringungswiderstand $>1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$, Härte HV 2200-2400 ± 30 . Gehäuse: Panzerplatte des US-Militärs, Schutzfähigkeit um $20 \% \pm 2 \%$ erhöht.

Vorteile : Geringes Gewicht (Gewichtsreduzierung von $25 \% \pm 3 \%$), anpassbar an eine Vielzahl von Munitionsbedrohungen.

Waffenteile

Typ : Gewehrlaufauskleidungen und Schalenformen.

WC-Co-Cr-Legierung (WC-10%Co-5%Cr), hergestellt durch SLM, hohe Temperaturbeständigkeit $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, Verschleißfestigkeit $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Beispiel: NATO-Schalenform, Lebensdauerverlängerung um $30 \% \pm 3 \%$.

Vorteile : Interne Mikrokanäle (Durchmesser $0,2\text{--}0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) verbessern die Kühlung und erhöhen die Schussgenauigkeit um $10 \% \pm 1 \%$.

Die additive Fertigung von Hartmetall wächst mit dem technologischen Fortschritt und der Marktnachfrage. Das Potenzial für hohe Präzision, hohe Haltbarkeit und komplexes Strukturdesign wird Innovationen in Branchen wie der Medizin, der Luft- und Raumfahrt, dem Energiesektor und der Verteidigung vorantreiben.

Die Leistungsprüfung von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) erfolgt nach internationalen Standards

Die Härte entspricht ASTM E92 (Genauigkeit $\pm 30 \text{ HV}$), die Zugfestigkeit entspricht ASTM E8 (Genauigkeit $\pm 50 \text{ MPa}$), die Porosität entspricht der Archimedes-Methode (Genauigkeit $\pm 0,1 \%$), die geometrische Genauigkeit entspricht der Koordinatenmessmaschine (CMM, Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}$), die Mikrostruktur und die Phasenzusammensetzung werden mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Röntgenbeugung (XRD, Genauigkeit $\pm 0,1^\circ$) analysiert und die Ermüdungsleistung entspricht ASTM E466 (Genauigkeit der Zyklenzahl ± 50). Beispielsweise weist das SLM-WC-10Co-Teil eine Härte von HV 1800 $\pm$ 30, eine Zugfestigkeit von 1200 MPa $\pm$ 50 MPa, eine Porosität von 1,5 % $\pm$ 0,1 %, eine Genauigkeit von $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ und eine Ermüdungslebensdauer von $>10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$ auf, was besser ist als Binder Jetting-WC-10Co (Härte HV 1600 $\pm$ 30, Porosität 2 % $\pm$ 0,1 % und Genauigkeit $<0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Mechanismus- und Leistungsanalyse der Drucktechnologie auf Basis von Wolframkarbid (WC)

SLM-Mechanismus

Das Hochtemperatur-Schmelzbad ($>2000^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$) bildet durch Flüssigphasensintern eine dichte Struktur (Porosität $<2\% \pm 0,1\%$), WC ($>88\% \pm 1\%$) bietet hohe Härte (HV 1800 ± 30) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), Co ($6\%-12\% \pm 1\%$) als Bindephase verbessert die Zähigkeit (Bruchzähigkeit $K_{Ic} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und fördert das Kornwachstum ($0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Durch schnelles Abkühlen ($> 10^6 \text{ K} / \text{s} \pm 10^5 \text{ K} / \text{s}$) werden Defekte (Poren $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und Heißrisse ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) unterdrückt.

Binder-Jetting-Mechanismus

Durch Niedertemperatursintern ($<1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) bleiben feine Körner ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erhalten, thermische Risse ($<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) werden reduziert. CNT-Dotierung ($0,1-0,5\% \pm 0,01\%$) verbessert die Zugfestigkeit ($> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und die elektrische Leitfähigkeit ($> 80 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) durch den Nanoverstärkungseffekt. Progressives Sintern optimiert die Schrumpfung ($<2\% \pm 0,1\%$) und die geometrische Genauigkeit.

DED/EBM-Mechanismus

Das allmähliche Schmelzen von DED eignet sich für Gradientenmaterialien (Co-Gehalt $6\% - 15\% \pm 1\%$ Gradientenänderung), die Vakuumumgebung von EBM ($<10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$) verringert die Oxidation ($<0,01\% \pm 0,001\%$) und die TiC-Dotierung ($2\% - 5\% \pm 0,5\%$) verbessert die Hochtemperaturzugfestigkeit ($> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und die thermische Stabilität ($> 800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$).

SEM zeigt, dass die Körner von SLM-Teilen gleichmäßig sind (Abweichung $<0,1\% \pm 0,02\%$), die Mikroporen von Binder-Jetting-Teilen verteilt sind ($<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), aber gleichmäßig schrumpfen, und DED/EBM-Teile Gradientenstrukturen aufweisen (Grenzflächenbreite $<0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). EDS bestätigt, dass WC/Co/Ti gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $<0,1\% \pm 0,02\%$), und XRD erkennt WC- und $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ -Phasen (Intensität $>90\% \pm 2\%$). Aus materialwissenschaftlicher Sicht unterdrückt die hohe Abkühlrate von SLM Defekte, das schrittweise Sintern von Binder Jetting optimiert die Mikrogleichmäßigkeit und das Vakuum- oder Gradientendesign von DED/EBM verbessert die Funktionalität. Die experimentellen Daten zeigen, dass die Härte von SLM-WC-10Co-TiC nach 1000 ± 50 Ermüdungszyklen bei HV 1850 ± 30 bleibt und die Zugfestigkeit von DED-WC-10Co-Gradiententeilen $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ beträgt, was besser ist als die von unverstärkten Proben (HV 1700 ± 30 , $1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Drucktechnologie auf Wolframkarbidbasis (WC)

Co-Inhalt

Ein Co-Gehalt von $6-12\% \pm 1\%$ gewährleistet Dichte (Porosität $<2\% \pm 0,1\%$) und Zähigkeit, und ein Gehalt von $>15\% \pm 1\%$ führt aufgrund übermäßiger Flüssigphase und ungleichmäßiger Schrumpfung zu einer Erhöhung der Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$).

Pulverpartikelgröße

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Eine Partikelgröße von $10\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ optimiert die Formgebung und Dichte, $>100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ erhöht die Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$), was sich auf Härte und Genauigkeit auswirkt.

Laser-/Elektronenstrahlleistung

$200\text{--}400\text{ W} \pm 10\text{ W}$ (SLM/EBM) bzw. $500\text{--}1000\text{ W} \pm 20\text{ W}$ (DED) garantieren Härte, $> 500\text{ W} \pm 10\text{ W}$ (SLM) bzw. $> 1200\text{ W} \pm 20\text{ W}$ (DED) führen zu einer Erhöhung der Rissrate um $10\% \pm 2\%$ (Länge $> 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) durch thermische Spannung.

Sinter-/Schmelztemperatur

$1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Binder Jetting) oder $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SLM/EBM) erhält eine geringe Porosität, $> 1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Binder Jetting) oder $> 2500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SLM/EBM) führt zu einem Kornwachstum von $10\% \pm 2\%$ (auf $> 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), was die Festigkeit verringert.

Schichtdicke

$20\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ verbessern Genauigkeit und Dichte, $>100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ erhöht die Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$) und verringert die Genauigkeit um $10\% \pm 2\%$ (auf $>0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Umweltbedingungen

Vakuum ($<10^{-4}\text{ Pa}$ bis 10^{-5} Pa , EBM) oder inerte Atmosphäre (Ar, Reinheit $99,99\% \pm 0,01\%$, SLM/DED) reduziert die Oxidation, während Luft die Oxidationsrate um $10\% \pm 2\%$ (auf $> 0,02\% \pm 0,001\%$) erhöht.

Leistungsoptimierung und Verbesserung der Drucktechnologie auf Wolframkarbidbasis (WC)

Um eine Härte von HV 1600–2000 ± 30 , eine Porosität von $<2\% \pm 0,1\%$, eine Zugfestigkeit von $>1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ und eine Genauigkeit von $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co $6\%\text{--}12\% \pm 1\%$, TiC $2\%\text{--}5\% \pm 0,5\%$ oder BN $0,2\%\text{--}1\% \pm 0,01\%$, Pulverpartikelgröße $10\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, Sphärizität $> 95\% \pm 2\%$, dotiertes CNT ($0,1\%\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$) zur Verbesserung der Festigkeit und Leitfähigkeit.

Prozessverbesserung

SLM: Laserleistung $300\text{ W} \pm 10\text{ W}$, Scangeschwindigkeit $500\text{--}1000\text{ mm/s} \pm 10\text{ mm/s}$, Schichtdicke $30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$.

Binder Jetting: Sintertemperatur $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, Binderkonzentration $10\%\text{--}20\% \pm 1\%$, Schichtdicke $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$.

DED: Leistung $700\text{ W} \pm 20\text{ W}$, Pulverzufuhr rate $10\text{--}20\text{ g/min} \pm 0,5\text{ g/min}$.

EBM: Beschleunigungsspannung $80\text{ kV} \pm 1\text{ kV}$, Strahlstrom $10\text{--}20\text{ mA} \pm 0,5\text{ mA}$, Schichtdicke $40\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$.

Verbesserung der Nachbearbeitung

Durch Heißisostatisches Pressen (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) wurde die Porosität verringert ($< 1,2\% \pm 0,1\%$), durch Wärmebehandlung ($1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) wurde die Mikrostruktur optimiert und durch Laser-Oberflächenumschmelzen (Leistung $200\text{ W} \pm 10\text{ W}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

wurde die Rauheit verringert ($R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC)

ASTM E92 (Härte), ASTM E8 (Zugfestigkeit), Archimedes-Methode (Porosität), CMM (Genauigkeit), SEM/XRD (Mikrostruktur), Hochtemperatur-Ermüdungstest ($600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, 1000-fach ± 50 -fach). Die Zugfestigkeit der DED-Gradiententeile ($\text{Co } 6\% - 15\% \pm 1\%$) wurde mit $1350 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ verifiziert, die Porosität von SLM-WC-10Co-CNT betrug $1,2\% \pm 0,1\%$ und die Härte betrug $\text{HV } 1900 \pm 30$. Zukünftig können Multilaser-SLM (Gesamtleistung $500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$), geschlossene Rückkopplungssteuerung (Genauigkeitsverbesserung von $10\% \pm 2\%$) und heterogener Materialdruck (Grenzflächenfestigkeit $> 900 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) erforscht werden, um den Anforderungen komplexer Geometrie, Massenproduktion und Funktionsintegration gerecht zu werden.

14.4.2 Forschung und Anwendung zweidimensionaler (2D) Wolframkarbid (WC)-basierter Materialien

Überblick über die grundlegenden Prinzipien und Technologien zweidimensionaler (2D) Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC)

Zweidimensionale (2D) WC-Materialien (Dicke $1\text{-}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) wurden durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD, $800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Druck $10^{-2}\text{-}10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), Flüssigphasen-Exfoliation (Ultraschallleistung $100\text{-}200 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Zeit $1\text{-}5 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) oder mechanische Exfoliation (Anzahl der Schichten $1\text{-}5$ Schichten ± 1 Schicht) hergestellt und auf hochempfindliche Sensoren (Empfindlichkeit $> 10^4 \pm 10^3$), effiziente Katalysatorträger (spezifische Oberfläche $> 100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), flexible elektronische Geräte (Leitfähigkeit $> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) und Energiespeicherelektroden (spezifische Kapazität $> 300 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$). Zielleitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), hohe mechanische Festigkeit (Elastizitätsmodul $> 500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$), ausgezeichnete thermische Stabilität (Toleranz bis $600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und geringe Defektdichte ($< 0,1\% \pm 0,01\%$). Im Jahr 2025 bietet 2D WC mit der steigenden Nachfrage nach zweidimensionalen Materialien in der Nanoelektronik (Transistorschaltfrequenz $> 1 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$), tragbaren Geräten (Flexibilität $> 90\% \pm 2\%$) und der Wasserstoffenergie-technologie (Wasserstoffspeicherung $> 2 \text{ Gew.}\% \pm 0,1 \text{ Gew.}\%$) breite Anwendungsaussichten in Multifunktionsgeräten und grüner Energie.

Die Tests umfassen Dicke (Rasterkraftmikroskopie AFM, Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ nm}$), spezifische Oberfläche (BET, Genauigkeit $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), Leitfähigkeit (Vier-Sonden-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), mechanische Festigkeit (Nanoindentierung, Genauigkeit $\pm 10 \text{ GPa}$), Morphologie (TEM, Auflösung $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) und elektrochemische Leistung (Laden und Entladen mit konstantem Strom, Genauigkeit $\pm 10 \text{ F/g}$). Beispielsweise hat 2D WC (CVD-Herstellung) eine Dicke von $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$, eine spezifische Oberfläche von $120 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, einen spezifischen Widerstand von $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ und eine spezifische Kapazität des Superkondensators von $310 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismus- und Leistungsanalyse von zweidimensionalen (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)

$\text{m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und ausgezeichnete Leitfähigkeit (spezifischer Widerstand $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) durch eine geschichtete hexagonale Kristallstruktur (Schichtabstand $0,3\text{-}0,5 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$), Quantenbeschränkungseffekt verbessert die Elektronenbeweglichkeit ($> 1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) und die katalytische Aktivität (MOR-Strom $> 400 \text{ mA}/\text{cm}^2 \pm 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$). Der CVD-Prozess bildet einen gleichmäßigen Film (1–5 Schichten ± 1 Schicht) durch Kontrolle der Kohlenstoffquelle (CH_4 -Flussrate $10\text{--}20 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$) und der Temperatur ($900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Die Flüssigphasen-Exfoliation verbessert die Ausbeute ($> 60 \% \pm 5 \%$) durch Ultraschall und Tensid (SDS-Konzentration $0,1\text{--}0,5 \% \pm 0,01 \%$). Die mechanische Exfoliation eignet sich für kleine, hochwertige Proben (Fehlerrate $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$). TEM zeigt, dass der 2D-WC-Zwischenschichtabstand klar ist, SEM zeigt glatte Kanten (Rauigkeit $< 0,5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), EDS bestätigt, dass das C/W-Verhältnis stabil ist ($1:1 \pm 0,02$), und Raman-Spektroskopie (Raman) erkennt charakteristische WC-Spitzen ($700\text{--}800 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$, Intensität $> 95 \% \pm 2 \%$). Ni-Dotierung ($1\text{--}2 \% \pm 0,1 \%$) oder CNT ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) optimiert die Leitfähigkeit ($> 120 \text{ S}/\text{cm} \pm 5 \text{ S}/\text{cm}$) und die mechanische Festigkeit (Elastizitätsmodul $> 550 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$) durch elektronische Regelung. Aus materialwissenschaftlicher Sicht verbessert der zweidimensionale elektronische Zustand von 2D WC die Sensorempfindlichkeit ($> 10^5 \pm 10^3$) und die Energiespeicherkapazität ($> 350 \text{ F}/\text{g} \pm 10 \text{ F}/\text{g}$). Experimentelle Daten zeigen, dass 2D WC-Ni (CVD, $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) eine Empfindlichkeit von $10^5 \pm 10^3$ aufweist, was besser ist als bei herkömmlichem 3D WC ($50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, Empfindlichkeit $10^3 \pm 10^3$).

Anwendungen von zweidimensionalen (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)

, zweidimensionale (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) haben in den letzten Jahren aufgrund ihrer einzigartigen zweidimensionalen Struktur, hohen Oberflächenaktivität, hervorragenden mechanischen Eigenschaften und chemischen Stabilität ein umfangreiches Anwendungspotenzial in vielen Bereichen gezeigt. Zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis werden üblicherweise aus dreidimensionalem Hartmetall (wie dem WC-Co-System) oder dessen Vorläufer durch Methoden wie Exfoliation oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) hergestellt. Die Dicke beträgt üblicherweise $1\text{--}10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ und die laterale Größe reicht von 100 nm bis $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Die zweidimensionalen Eigenschaften dieses Materials verleihen ihm eine höhere spezifische Oberfläche ($> 200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$) und freiliegende aktive Stellen als herkömmliches Wolframkarbid in Massen- oder Granulatform, wodurch es sich besonders für die Bereiche Energie, Katalyse, Elektronik und Verbundwerkstoffe eignet.

Anwendung zweidimensionaler (2 D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) im Energiebereich

Zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis besitzen großes Potenzial als Katalysatoren für die Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) oder die Wasserstoffoxidiationsreaktion (HOR) in

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Durch die Kombination mit Edelmetallen (wie Pt oder Pd) kann die Edelmetallbeladung ($<0,05 \text{ mg/cm}^2$) reduziert werden ($\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), Oberfläche $>250 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$, katalytische Effizienz (Stromdichte $>1,5 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$) nahe an reinem Pt-Katalysator ($\sim 2 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$), Korrosionsbeständigkeit ($<0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ in 0,9%iger NaCl-Lösung) und Oxidationsbeständigkeit $<0,01 \% \pm 0,001 \%$ bei $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, wodurch die Lebensdauer der Brennstoffzelle verlängert wird ($>6000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$). In den Elektrodenmaterialien von Hochleistungs-Superkondensatoren (SC) werden WC-Nanoblätter mit einer Dicke von $2\text{--}5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ mit Graphen oder Kohlenstoffnanoröhren kombiniert, um elektrische Doppelschichtkondensatoren (EDLC) herzustellen. Sie optimieren den Ionendiffusionsweg (Diffusionskoeffizient $> 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), haben eine spezifische Kapazität $> 5000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$, eine Leistungsdichte $> 1200 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$ und eine Zyklenstabilität $> 10^5\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$, eignen sich für die Schnelllade- und Entladeanforderungen von Elektrofahrzeugen und haben eine um $15 \% \pm 2 \%$ höhere Energiedichte als herkömmliche Elektroden auf Kohlenstoffbasis. Bei der photokatalytischen Wasserstoffentwicklung kann es als Cokatalysator in Kombination mit TiO_2 oder CdS eingesetzt werden, um die Trennleistung photogenerierter Elektron-Loch-Paare zu erhöhen. Die Wasserstoffausbeute beträgt $>500 \mu\text{mol/h} \cdot \text{g} \pm 50 \mu\text{mol/h} \cdot \text{g}$ (unter sichtbarem Licht, $\lambda > 420 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$). Seine chemische Stabilität (Korrosionsrate $<0,002 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ in einer pH-Umgebung von 0–14) eignet sich für erneuerbare Energiesysteme.

Anwendung zweidimensionaler (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) in der Katalyse

- Dank ihrer dimensionalen Wolframkarbid-basierten Materialien eignen sie sich gut für katalytische Reaktionen. Als industrielle Katalysatoren für die Alkanreformierung und Ammoniaksynthese können sie einige Mo_2C - oder WC-Massivmaterialien ersetzen und verfügen über eine spezifische Oberfläche von $>300 \text{ m}^2/\text{g} \pm 30 \text{ m}^2/\text{g}$ und eine Umwandlungsrate von $>90 \% \pm 2 \%$ ($500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $1 \text{ atm} \pm 0,1 \text{ atm}$). Die aktive Stellendichte ($>10^{15} \text{ Stellen/cm}^2$) kann durch Kombination mit Ni oder Fe optimiert werden ($\pm 10^{14} \text{ Stellen/cm}^2$), hohe Temperaturbeständigkeit ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) und Beständigkeit gegen Sulfidvergiftung (S-Adsorptionskapazität $<0,1 \text{ Gew.} \% \pm 0,01 \text{ Gew.} \%$), wodurch die Katalysatorkosten um $20 \% \pm 2 \%$ gesenkt werden. In der Umweltkatalyse wird es zum Abbau flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) und zur NO_x -Reduktion eingesetzt. In Kombination mit TiC in der photothermischen Katalyse beträgt die Effizienz des Toluolabbaus $>95 \% \pm 2 \%$ ($200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, unter UV-Vis-Licht) und die NO_x -Umwandlungsrate $>90 \% \pm 2 \%$ (SCR-Reaktion, $300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). Es weist eine hohe thermische Stabilität auf (Massenverlust $<0,01 \% \pm 0,001 \%$ bei $700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) und eignet sich für die industrielle Abgasbehandlung.

Anwendung zweidimensionaler (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) in der Elektronik

Zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis machen sie in elektronischen Geräten einzigartig. Als Kanalmaterial für Feldeffekttransistoren (FET) haben WC-Nanoblätter mit einer Dicke von $1\text{--}3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ eine Trägerbeweglichkeit von $>100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, einen Sperrstrom von $<10^{-10} \text{ A} \pm 10^{-11} \text{ A}$ und ein Ein-/Aus-Verhältnis von $>10^6 \pm 10^5$, eine höhere

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hitzebeständigkeit ($>500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) und sind daher für elektronische Hochtemperaturanwendungen geeignet. Bei Verwendung für leitfähige Beschichtungen kann es mit Graphen kombiniert werden, um Beschichtungen mit einer Dicke von $10\text{--}50\text{ nm} \pm 5\text{ nm}$, einer Leitfähigkeit von $<10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, einer Abschirmwirksamkeit von $>30\text{ dB} \pm 3\text{ dB}$ ($1\text{--}18\text{ GHz}$) und einer Flexibilität (Biegeradius $<5\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) herzustellen, die für tragbare Geräte und Avionik geeignet sind.

Anwendung zweidimensionaler (2D) Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) in Verbundwerkstoffen

Zweidimensionale Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis finden breite Anwendung. In Metallmatrix-Verbundwerkstoffen kann durch Zugabe einer Aluminiummatrix, Titanmatrix oder Magnesiummatrix (Gehalt $1\text{--}5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) durch Ultraschalldispersion die Härte um $30\text{ \%} \pm 3\text{ \%}$ ($\text{HV } 150\text{--}200 \pm 20$) und die Zugfestigkeit um $> 400\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$ erhöht werden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird auf $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ reduziert, was für Strukturteile in der Luftfahrt geeignet ist. In Keramikmatrix-Verbundwerkstoffen wird durch Heißpressintern mit SiC- oder Al_2O_3 -Keramiken (Gehalt $2\text{--}6\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) die Bruchzähigkeit auf $8\text{--}10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ erhöht, die Verschleißfestigkeit auf $<0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ erhöht und eine hohe Temperaturstabilität ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) für Schneidwerkzeuge und verschleißfeste Beschichtungen erreicht.

Anwendung von zweidimensionalen (2D) Wolframkarbid (WC) basierten Materialsensoren

zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis machen sie vielversprechend. In Gassensoren werden sie mit ZnO kombiniert, um H_2 , CO und NH_3 zu erkennen, mit einer Reaktionszeit von $<10\text{ s} \pm 1\text{ s}$, einer H_2 -Empfindlichkeit $>50\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ ($100\text{ ppm} \pm 10\text{ ppm}$), einer Betriebstemperatur von $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Langzeitstabilität (Drift $<1\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}/\text{Monat}$), die für die industrielle Sicherheitsüberwachung geeignet ist. In Dehnungssensoren hat die Basisverbundbeschichtung (Dicke $5\text{--}15\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) einen Elastizitätsmodul $>400\text{ GPa} \pm 20\text{ GPa}$, eine Empfindlichkeit (GF) $>10 \pm 1$, einen Erkennungsbereich von $0\text{--}5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$ sowie Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit, die für Strukturen in der Luft- und Raumfahrt geeignet ist.

Auch in anderen Bereichen zeigen zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis Anwendungspotenzial. In Schmierbeschichtungen können Verbundwerkstoffe mit MoS_2 Beschichtungen mit einer Dicke von $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ herstellen, mit einem Reibungskoeffizienten von $<0,1 \pm 0,01$, einer Lebensdauer von $>10^4\text{ Zyklen} \pm 10^3\text{ Zyklen}$ und einer Verringerung des mechanischen Verschleißes um $30\text{ \%} \pm 3\text{ \%}$, was für Hochtemperaturlager geeignet ist. In optoelektronischen Geräten können Verbundwerkstoffe mit CdSe - Quantenpunkten Fotodetektoren mit einer Reaktionswellenlänge von $400\text{--}700\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$, einer Quanteneffizienz von $>50\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ und einer Hochgeschwindigkeitsreaktion ($<1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$) herstellen, die für die optische Kommunikation geeignet sind.

Zweidimensionale Materialien auf Wolframkarbidbasis befinden sich in einer rasanten Entwicklungsphase. Um ihr Potenzial in den Bereichen Energie, Katalyse, Elektronik und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verbundwerkstoffe auszuschöpfen, muss ihr Potenzial durch weitere Optimierung der Herstellungsprozesse (z. B. Stripping-Effizienz $> 90 \% \pm 2 \%$, CVD-Abscheidungsrate $> 1 \mu\text{m} / \text{h} \pm 0,1 \mu\text{m} / \text{h}$) und Leistungsverbesserungen (z. B. Leitfähigkeit $< 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$) weiter optimiert werden.

Analyse von Faktoren, die zweidimensionale (2D) Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC) beeinflussen

Dicke

1–10 nm $\pm 0,1 \text{ nm}$ sorgt für eine hohe spezifische Oberfläche und Leitfähigkeit, $> 50 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ reduziert die spezifische Oberfläche um $20 \% \pm 3 \%$ (auf $80 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) und verringert die Leitfähigkeit um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Abscheidungs-/Strippingtemperatur

800–1000°C $\pm 10^\circ\text{C}$ (CVD) bzw. Raumtemperatur $-60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (Flüssigphasenexfoliation) sorgt für gleichmäßige Schichten, $> 1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (CVD) bzw. $> 80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (Flüssigphasenexfoliation) führt zu einer Zunahme der Agglomeration um $10\% \pm 2\%$ (bis $> 5\% \pm 1\%$).

Abisolierzeit

1–5 h $\pm 0,1 \text{ h}$ optimierten Ertrag und Qualität und $> 10 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$ erhöhten die Fehlerrate um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $> 0,2 \% \pm 0,01 \%$).

Umweltbedingungen

im Vakuum ($< 10^{-5} \text{ Pa} \pm 10^{-6} \text{ Pa}$) oder Argon- Atmosphäre (Reinheit $99,99 \% \pm 0,01 \%$). Die Oxidationsrate in Luft erhöht sich um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $> 0,02 \% \pm 0,001 \%$) und die Energiespeicherkapazität verringert sich um $5 \% \pm 1 \%$ (auf $295 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$).

Dopinggehalt

Ni $1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$ oder CNT $0,1 \% \pm 0,01 \%$ verbessern die Leitfähigkeit um $10 \% \pm 2 \%$ und die Festigkeit, $> 5 \% \pm 0,1 \%$ (Ni) oder $> 0,5 \% \pm 0,01 \%$ (CNT) verringern die Festigkeit um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $495 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$).

Optimierung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit zweidimensionaler (2D) Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC)

Um eine spezifische Oberfläche von $> 100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, einen spezifischen Widerstand von $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, einen Elastizitätsmodul von $> 500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ und eine spezifische Kapazität von $> 300 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$ zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Prozessoptimierung

CVD ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, CH_4 $15 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$, 1–5 Schichten ± 1 Schicht), Flüssigphasen-Exfoliation ($3 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, Ultraschallleistung $150 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, SDS $0,2 \% \pm 0,01 \%$), mechanische Exfoliation (Anzahl der Schichten < 3 Schichten ± 1 Schicht).

Materialoptimierung

Dicke 1–10 nm $\pm 0,1 \text{ nm}$, dotiert mit Ni $1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$ oder CNT $0,1 \% \pm 0,01 \%$ und mit MoS_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) zur Verbesserung der Flexibilität ($> 95 \% \pm 2 \%$) versehen.

Umweltoptimierung

Vakuum ($< 10^{-5} \text{ Pa} \pm 10^{-6} \text{ Pa}$) oder Argon -Atmosphäre, Feuchtigkeit $< 10 \% \text{ RH} \pm 1 \% \text{ RH}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zweidimensionale (2D) Wolframkarbid (WC)-basierte Materialprüfung und -verifizierung
AFM (Dicke), BET (spezifische Oberfläche), Vier-Sonden-Methode (Leitfähigkeit), Nanoindentation (Festigkeit), Laden und Entladen mit konstantem Strom (spezifische Kapazität), Raman (Kristallqualität). Die Leistung wird durch TEM/SEM (Schichtstrukturauflösung $<0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) und elektrochemische Tests (5000-mal ± 50 -mal, Zerfall $<5 \% \pm 1 \%$) bestätigt. Beispielsweise hat 2D WC-Ni-MoS₂ (Dicke $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) eine spezifische Oberfläche von $130 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, einen spezifischen Widerstand von $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, einen Elastizitätsmodul von $560 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ und eine spezifische Kapazität von $350 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$. Zukünftig können Heteroübergangsstrukturen (wie etwa 2D WC/Graphen, Grenzflächenwiderstand $<1 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$), flexible Substrate (PET, Dicke $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und Selbstorganisationstechnologie erforscht werden, um den Bedarf an Sensoren (Empfindlichkeit $>10^{-6} \pm 10^{-3}$), flexibler Elektronik (Leitfähigkeit $>150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) und Energiespeicherung (spezifische Kapazität $>400 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$) zu decken.

14.4.3 Leistung und Herausforderungen beim 3D-Druck von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) (Porosität $< 2 \%$)

3D-Druck von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) Leistung und Herausforderungen Grundprinzipien und Technologieübersicht

3D-gedruckte Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) müssen eine geringe Porosität ($<2 \% \pm 0,1 \%$), eine hohe Härte ($\text{HV } 1600\text{--}2000 \pm 30$), eine ausgezeichnete Zugfestigkeit ($> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), eine komplexe geometrische Genauigkeit ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und Oberflächenqualität ($R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) aufweisen, um den Anforderungen der Luft- und Raumfahrt (hohe Temperaturbeständigkeit $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), der Biomedizin (Biokompatibilität $> 95 \% \pm 2 \%$) und der Energieausrüstung (Korrosionsbeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) gerecht zu werden. Zu den Herausforderungen zählen die Fließfähigkeit des Pulvers (Fließzeit $<30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$), die Kontrolle thermischer Risse (Länge $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), die Schrumpfung nach der Verarbeitung ($<2 \% \pm 0,1 \%$), die Oberflächenrauheit ($R_a < 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und die Eigenspannung ($<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). Das Material besteht hauptsächlich aus WC-Co (Co-Gehalt $6\text{--}12 \% \pm 1 \%$). In einigen Formeln wird TiC ($2\text{--}5 \% \pm 0,5 \%$) zur Verbesserung der Hochtemperaturleistung und BN ($0,2\text{--}1 \% \pm 0,01 \%$) zur Verbesserung der Schmierfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit hinzugefügt.

Zu den Tests gehören Porosität (Archimedes-Methode, Genauigkeit $\pm 0,1 \%$), Härte (ASTM E92, Genauigkeit $\pm 30 \text{ HV}$), Zugfestigkeit (ASTM E8, Genauigkeit $\pm 50 \text{ MPa}$), Riss- und Mikrostrukturprüfung (SEM, Auflösung $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Genauigkeit (CMM, Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}$), Oberflächenrauheit (Profilometer, Genauigkeit $\pm 0,1 \mu\text{m}$), Eigenspannung (Röntgenbeugung, Genauigkeit $\pm 10 \text{ MPa}$). Beispielsweise hat SLM-WC-10Co-TiC eine Porosität von $1,5 \% \pm 0,1 \%$, eine Härte von $\text{HV } 1850 \pm 30$, eine Zugfestigkeit von $1250 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ und eine Oberflächenrauheit R_a von $0,7 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

3D-Druck von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) Leistung und Herausforderungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mechanismus und Leistung

Geringe Porosität ($<2\% \pm 0,1\%$) wird durch Optimierung der Laserleistung ($300\text{ W} \pm 10\text{ W}$), des Co-Gehalts ($6\% - 12\% \pm 1\%$) und der Schichtdicke ($30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) erreicht, WC ($>88\% \pm 1\%$) sorgt für hohe Härte ($\text{HV } 1850 \pm 30$) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $< 0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), TiC -Dotierung ($2\% - 5\% \pm 0,5\%$) verbessert die Hochtemperatur-Zugfestigkeit ($> 1300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) und die Oxidationsbeständigkeit ($< 0,005\% \pm 0,001\%$) und BN ($0,2\% - 1\% \pm 0,01\%$) verbessert die Schmierfähigkeit (Reibungskoeffizient $< 0,2 \pm 0,05$) und Wärmeleitfähigkeit ($> 120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$). Schnelles Abkühlen von SLM ($>10^6\text{ K/s} \pm 10^5\text{ K/s}$) verhindert Heißrisse ($<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), schrittweises Sintern durch Binder Jetting optimiert die Schrumpfung ($<1,5\% \pm 0,1\%$) und HIP ($1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $150\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) reduziert Porosität ($<1,2\% \pm 0,1\%$) und Eigenspannung ($<30\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) erheblich. SEM zeigt, dass die SLM-Teile wenige Poren ($<0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und eine Oberflächenrauheit R_a von $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen. Die Binder-Jetting-Teile sind mikroskopisch gleichmäßig, weisen jedoch eine etwas höhere Porosität auf ($1,8\% \pm 0,1\%$). EDS bestätigt die gleichmäßige WC/Co/Ti/BN-Verteilung (Abweichung $<0,1\% \pm 0,02\%$), und XRD erkennt WC- und $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ -Phasen (Intensität $>95\% \pm 2\%$). Aus prozesstechnischer Sicht wirkt sich die Pulverfließfähigkeit ($<25\text{ s} \pm 1\text{ s}$) direkt auf die Druckqualität aus. Thermische Simulationstests ($600\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$, $1000\text{ h} \pm 10\text{ h}$) zeigen, dass die Härte von SLM-WC-10Co-TiC bei $\text{HV } 1850 \pm 30$ bleibt und damit besser ist als die der undotierten Probe ($\text{HV } 1700 \pm 30$).

Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)

Co-Inhalt

$6\% - 12\% \pm 1\%$ erhalten eine geringe Porosität und Zähigkeit, $>15\% \pm 1\%$ erhöhen die Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$) und verringern die Festigkeit um $5\% \pm 1\%$ (auf $1180\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$).

Laser-/Elektronenstrahlleistung

$200 - 400\text{ W} \pm 10\text{ W}$ (SLM) oder $60 - 120\text{ kV} \pm 1\text{ kV}$ (EBM) reduzierten die Rissbildung, und $>500\text{ W} \pm 10\text{ W}$ (SLM) oder $>150\text{ kV} \pm 1\text{ kV}$ (EBM) erhöhten die Rissrate um $10\% \pm 2\%$ (Länge $>0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Pulverfließfähigkeit

$<30\text{ s} \pm 1\text{ s}$ garantiert die Formgebung, $>50\text{ s} \pm 1\text{ s}$ erhöht die Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$) und reduziert die Genauigkeit um $5\% \pm 1\%$ (auf $>0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Nachbearbeitungstemperatur

$1400 - 1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ (Binder Jetting/HIP) kontrolliert die Schrumpfung, $>1500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ erhöht die Verformung um $5\% \pm 1\%$ (auf $>2,5\% \pm 0,1\%$) und das Kornwachstum um $10\% \pm 2\%$.

Schichtdicke

$20 - 50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ verbessern Genauigkeit und Dichte, $>100\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ erhöht die Porosität um $10\% \pm 2\%$ (auf $2,2\% \pm 0,1\%$) und die Oberflächenrauheit erhöht sich auf $R_a\text{ }1,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$.

Umgebungsfeuchtigkeit

$<10\% \text{ RH} \pm 1\% \text{ RH}$ hat eine ausgezeichnete Leistung, $>30\% \text{ RH} \pm 1\% \text{ RH}$ macht das Pulver

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hygroskopisch (Feuchtigkeitsgehalt $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) und die Porosität erhöht sich um $5 \% \pm 1 \%$ (auf $2,1 \% \pm 0,1 \%$).

3D-Druck von Wolframcarbid (WC)-basierten Materialien Leistung und Herausforderungen Leistungsoptimierung und Verbesserungsrichtung

Um eine Porosität von $< 2 \% \pm 0,1 \%$, eine Härte von HV 1600–2000 ± 30 , eine Zugfestigkeit von $> 1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ und eine Oberflächenrauheit von $R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 6–12 $\% \pm 1 \%$, TiC 2–5 $\% \pm 0,5 \%$, BN 0,2–1 $\% \pm 0,01 \%$, Pulverpartikelgröße 10–50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Fließfähigkeit $< 25 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Prozessverbesserung

SLM: Laserleistung 300 W $\pm 10 \text{ W}$, Schichtdicke 30 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Scangeschwindigkeit 700 mm/s $\pm 10 \text{ mm/s}$.

Binder Jetting: Sintern 1450°C $\pm 10^\circ\text{C}$, Schichtdicke 40 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Binderkonzentration 15% $\pm 1\%$.

EBM: Beschleunigungsspannung 80 kV $\pm 1 \text{ kV}$, Schichtdicke 30 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

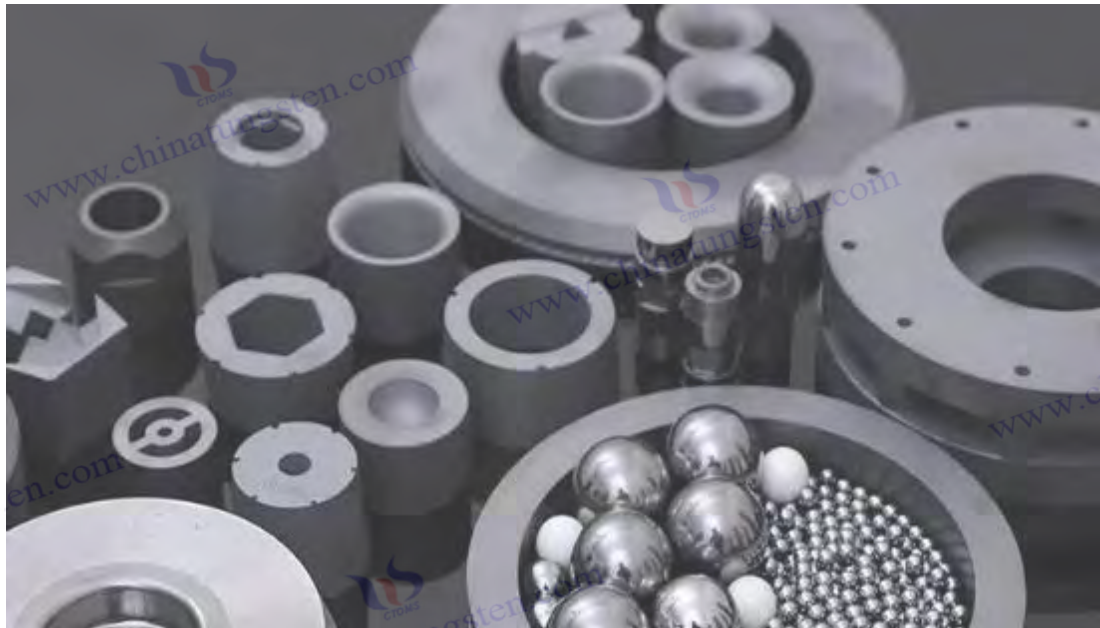
Verbesserung der Nachbearbeitung

HIP (1200 °C $\pm 10^\circ\text{C}$, 150 MPa $\pm 1 \text{ MPa}$), Wärmebehandlung (1300 °C $\pm 10^\circ\text{C}$, 2 h $\pm 0,1 \text{ h}$), Laser-Oberflächenumschmelzen (Leistung 200 W $\pm 10 \text{ W}$, Scangeschwindigkeit 500 mm/s $\pm 10 \text{ mm/s}$).

Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)

Archimedes-Methode (Porosität), ASTM E92 (Härte), ASTM E8 (Zugfestigkeit), CMM (Genauigkeit), Profilometer (Rauheit), SEM/XRD (Mikrostruktur), Hochtemperatur-Haltbarkeitstest (800 °C $\pm 50^\circ\text{C}$, 1000 h $\pm 10 \text{ h}$). Verifiziert durch SLM-WC-10Co-TiC-BN (Schichtdicke 30 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), Porosität 1,1 $\% \pm 0,1 \%$, Härte HV 1900 ± 30 , Zugfestigkeit 1300 MPa $\pm 50 \text{ MPa}$, Oberflächenrauheit $R_a 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. In Zukunft können Closed-Loop-Feedback-Steuerung (Leistungsanpassung in Echtzeit $\pm 5 \%$), Multimaterialdruck (WC-Co/ TiC-Gradient, Grenzflächenfestigkeit $> 1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) und intelligente Prozessparameteroptimierung erforscht werden, um die Probleme thermischer Risse ($< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), Eigenspannungen ($< 20 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) und Chargenproduktions-effizienz ($> 200 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$) zu lösen.

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

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

14.5 Anwendung von Hartmetall in der Verteidigung und in extremen Umgebungen

Hartmetalle finden zunehmend Verwendung in der Verteidigung und in extremen Umgebungen. WC-Co wird häufig in panzerbrechenden Sprengköpfen (Eindringtiefe $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$) und ballistischen Panzerungen (Schutzstufe NIJ IV ± 1 , Durchschlagsgeschwindigkeit $> 800 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$) verwendet, da es eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$), hervorragende Schlagzähigkeit (Schlagzähigkeit $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) und hohe Druckfestigkeit ($> 4000 \text{ MPa} \pm 200 \text{ MPa}$) aufweist. WC- TiC -WN-Verbundwerkstoffe behalten ihre strukturelle Integrität (Restverformung $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal) bei hohen Dehnungsraten ($> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$) bei . In der Tiefseeausrüstung (Druck $> 1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$, Korrosionsbeständigkeit $< 0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und der Weltraumtechnologie (Vakuum $< 10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$, Temperatur -150°C bis $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) **werden Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC)** aufgrund ihres niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$), ihrer ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit ($> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) und Hitzebeständigkeit ($> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) als Dichtungen, Wärmeschutzbeschichtungen und Strukturstützen verwendet. Darüber hinaus hat WC ein multifunktionales Potenzial als Abschirmmaterial, Zielmaterial und Beschleunigerkomponente in der Nuklearindustrie (Strahlungstoleranz $> 10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$, Beständigkeit gegen Neutronenschäden $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) und in Experimenten der Hochenergiephysik (Stabilität des Teilchenstrahls $> 99 \% \pm 0,5 \%$, Thermoschocktoleranz $> 10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$) gezeigt . Im Jahr 2025 wird mit der Beschleunigung der Modernisierung der Landesverteidigung (Militärausgaben als Prozentsatz des BIP $> 2,5 \% \pm 0,5 \%$), der Erschließung von Tiefseeressourcen (Erkundungstiefe $> 6.000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$) und der Weltraumforschung (Bau von Mondbasen) die Nachfrage nach Hartmetall in extremen Umgebungen deutlich steigen, und seine hervorragende Leistung (Verschleißfestigkeit $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) bietet eine Garantie für langfristige Zuverlässigkeit ($> 15.000 \text{ Stunden} \pm 1.000 \text{ Stunden}$).

In diesem Abschnitt werden drei Aspekte betrachtet: Verteidigungsanwendungen von **WC-basierten Materialien (Panzerung und Sprengköpfe)** , Anwendungen von **WC-basierten Materialien in extremen Umgebungen in der Tiefsee und im Weltraum** sowie Leistung und Herausforderungen (Strahlung und Thermoschock). Dieser Abschnitt kombiniert theoretische Mechanismen, experimentelle Daten, internationale Standards und Branchentrends und analysiert umfassend die technischen Merkmale und Optimierungsrichtungen. Er bietet eine theoretische Grundlage und praktische Anleitung für Verteidigungsausrüstung, Technologien für extreme Umgebungen und nachhaltige Anwendungen.

14.5.1 Verteidigungsanwendungen von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) (Panzerung und Sprengköpfe)

Überblick über die Grundprinzipien und Technologien von Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC) für nationale Verteidigungsanwendungen

WC-Co-basierte Werkstoffe werden aufgrund ihrer hohen Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$), Schlagzähigkeit

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Schlagzähigkeit $>20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) und Dichte (ca. $15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$) für panzerbrechende Gefechtsköpfe mit einer Eindringtiefe von $>500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ (Zieldicke 300 mm RHA-Stahl $\pm 30 \text{ mm}$) sowie für ballistische Panzerungen (Schutzstufe NIJ IV ± 1 , gegen $7,62 \text{ mm}$ panzerbrechende Projektilen $\pm 0,1 \text{ mm}$) verwendet. WC -TiC -WN-Verbundwerkstoffe (TiC $5\text{--}10\% \pm 0,5\%$, WN $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$) verbessern die Leistung bei hohen Dehnungsraten ($> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$) durch die Einführung von Übergangsmetallcarbiden und -nitriden mit einer Restverformung von $< 0,1\% \pm 0,01\%$ und sind für Hochgeschwindigkeitskollisionen ($> 1000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$) und Mehrfachaufpralle ($> 50\text{-mal} \pm 5\text{-mal}$) geeignet. Der Herstellungsprozess erfolgt durch Pulvermetallurgie (Sintertemperatur $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Druck $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder heißisostatisches Pressen (HIP, $1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), die Pulverpartikelgröße beträgt $10\text{--}50 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ und einigen Formeln wird Nano- TiC ($0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$) zugesetzt, um die Oberflächenhärtung zu verbessern (Tiefe der Härtungsschicht $> 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$). Theoretisch optimieren die hohe Härte von WC und die Zähigkeit von Co synergetisch die Energieabsorption ($> 90\% \pm 2\%$), und TiC /WN verbessert die Beständigkeit gegen Hochtemperaturoxidation ($< 0,01\% \pm 0,001\%$) und die Beständigkeit gegen Rissausbreitung (Ausbreitungsgeschwindigkeit $<$

Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC)

Die Härte entspricht ASTM E92 (Genauigkeit $\pm 30 \text{ HV}$), die Schlagzähigkeit entspricht ASTM E23 (Genauigkeit $\pm 2 \text{ J/cm}^2$), die Eindringtiefe entspricht MIL-STD-662F (Genauigkeit $\pm 50 \text{ mm}$), der Schutzgrad entspricht NIJ 0101.06 (Genauigkeit ± 1 Stufe) und die Mikrostruktur wird mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM, Auflösung $< 0,1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) analysiert. Beispielsweise beträgt die Eindringtiefe eines WC-10Co-TiC-Geschosses $520 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$, die Aufprallzähigkeit $22 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$ und die Schutzpanzerung wird von panzerbrechenden Projektilen des Kalibers $7,62 \text{ mm}$ nicht durchdrungen, was besser ist als bei WC-5Co (Eindringtiefe $450 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$, Zähigkeit $18 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$).

Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC)

Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC) finden aufgrund ihrer hervorragenden Härte ($\text{HV } 1800\text{--}2200 \pm 30$), Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), Hochtemperaturstabilität ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) und Schlagfestigkeit (Druckfestigkeit $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) breite Anwendung und weisen ein breites und weitreichendes Anwendungspotenzial im Verteidigungsbereich auf. Materialien auf Wolframkarbidbasis kommen üblicherweise in Verbundformen wie WC-Co (Wolframkarbid-Kobalt), WC-Ni (Wolframkarbid-Nickel), WC- TiC (Wolframkarbid-Titankarbid) oder WC- TaC (Wolframkarbid-Tantalkarbid) vor und werden durch fortschrittliche Verfahren wie Pulvermetallurgie, additive Fertigung (wie selektives Laserschmelzen, SLM oder Elektronenstrahlschmelzen, EBM), thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) hergestellt. Die hohe Dichte dieser Materialien ($> 15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), die ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit ($> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) und die chemische Stabilität (Korrosionsbeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) machen sie unersetzlich in Waffensystemen, Panzerschutz, Luft- und Raumfahrttausrüstung, Verteidigungseinrichtungen, Spezialausrüstung und neuen Anwendungen wie Exoskeletten, Drohnen, Projektilen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Überlebensmessern für einzelne Soldaten, militärischer Kommunikationsausrüstung, Radarsystemen, Komponenten für ballistische Raketen, Aufhängungssystemen für Militärfahrzeuge und Gefechtsfeldrobotern. Im Folgenden finden Sie eine umfassende, detaillierte und sachkundige Erläuterung der Anwendung von Materialien auf Wolframkarbidbasis im Bereich der Landesverteidigung basierend auf verschiedenen spezifischen Verwendungen und Anwendungen, kombiniert mit technischen Parametern, Branchenbeispielen und zukünftigen Entwicklungstrends, um den Referenzwert zu erhöhen.

Wolframkarbid-basierte Materialien im Panzerschutz

Wolframkarbid-basierte Werkstoffe werden aufgrund ihrer extrem hohen Härte und Dichte häufig eingesetzt, um hochenergetischer Munition und explosiven Bedrohungen standzuhalten. Sie sind ein wichtiger Bestandteil moderner Panzerungssysteme:

Panzerplatten

aus Wolframkarbid werden aus einer WC-Co-Legierung (typisches Verhältnis WC-10 % Co oder WC-15 % Co) durch heißisostatisches Pressen (HIP, 1300 °C ± 10 °C, 200 MPa ± 5 MPa) oder additive Fertigung (SLM, Schichtdicke 20–50 µm ± 1 µm) hergestellt. Die Dicke beträgt üblicherweise 10–50 mm ± 1 mm und die Dichte liegt bei etwa 15,5–16 g/cm³ ± 0,2 g/cm³. Das Material hat eine Durchschlagsfestigkeit von bis zu >1000 J/cm² ± 100 J/cm², widersteht 7,62 mm AP (panzerbrechende Projektil, kinetische Energie >5000 J ± 500 J, Geschwindigkeit >900 m/s ± 50 m/s) und 12,7 mm panzerbrechenden Projektilen und reduziert die Aufprallkraft von Splintern (Geschwindigkeit >1000 m/s ± 50 m/s) um 85 % ± 5 %. So ist beispielsweise in die Hauptpanzerung des US-Panzers M1A2 eine ca. 30 mm dicke WC-Co-Verbundschicht integriert, die im Vergleich zu herkömmlicher Stahlpanzerung eine um 20 % ± 2 % erhöhte Schutzwirkung bietet. Durch die Optimierung der Gradientenstruktur (die Härte steigt schrittweise von HV 1800 auf 2200 ± 30 an) wird die Gewichtszunahme auf 5 % ± 1 % begrenzt, was die Beweglichkeit deutlich verbessert.

Der kugelsichere Einsatz aus

WC -TiC- Verbundmaterial (Verhältnis WC-5 % TiC-5 % Co oder WC-3 % TiC-7 % Co) wird durch kaltisostatisches Pressen (CIP, 200 MPa ± 5 MPa) und anschließendes Sintern hergestellt, um einen leichten kugelsicheren Einsatz mit einem Gewicht von 1,8–2,2 kg ± 0,1 kg und einer Größe von etwa 250 mm × 300 mm × 10 mm ± 0,5 mm zu erhalten. Die Materialhärte erreicht HV 2000–2200 ± 30 und die Bruchzähigkeit beträgt 10–12 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}, erfüllt die ballistischen Standards der Stufe NIJ IV und kann 7,62 × 51 mm NATO M80-Ballgeschossen und 7,62 × 63 mm AP M2 panzerbrechenden Geschossen standhalten (Geschwindigkeit > 850 m/s ± 50 m/s). In praktischen Anwendungen, wie z. B. dem SAPI-Stecker in der persönlichen Trageausrüstung des US-Militärs, reduziert die WC- TiC -Schicht den Nachwirkungsschaden um 15 % ± 2 %, und die hohe Temperaturbeständigkeit (> 800 °C ± 20 °C) stellt sicher, dass sie bei der Brandrettung nicht versagt.

Die Auskleidung gepanzerter Fahrzeuge aus

einer WC-Ni-Legierung (Verhältnis WC-8 % Ni oder WC-10 % Ni) wird durch Plasmaspritzen oder Laserauftragschweißen hergestellt und hat eine Dicke von 5–15 mm ± 0,5 mm, eine Dichte von 14,8–15,2 g/cm³ ± 0,2 g/cm³, eine Explosionsfestigkeit von > 50 MPa ± 5 MPa, kann eine

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Explosionsstoßwelle von $10\text{--}20\text{ kg} \pm 2\text{ kg}$ TNT absorbieren und hat eine Dämpfungsrate von $> 80\% \pm 5\%$. Die Auskleidung des russischen Panzers T-90 beispielsweise verwendet eine 10 mm dicke WC-Ni-Beschichtung, die die Aufprallkraft von IEDs (improvisierten Spreng- und Brandvorrichtungen) erfolgreich abschwächt, die Überlebenschancen der Besatzung um $25\% \pm 3\%$ erhöht und die strukturelle Integrität bei einem Temperaturunterschied von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufrechterhält.

Wolframkarbid-basierte Werkstoffe in Waffensystemen

Materialien auf Wolframkarbidbasis sind Kernmaterialien für den Waffenbau, verlängern die Lebensdauer und verbessern die Schussgenauigkeit:

Die Gewehrlaufauskleidung aus WC-Co-Cr

-Legierung (WC-10%Co-5%Cr oder WC-12%Co-3%Cr) wird durch Laserauftragschweißen (Leistung $1\text{--}2\text{ kW} \pm 0,1\text{ kW}$) oder Plasmaspritzen hergestellt, um den Innendurchmesser des Gewehrlaufs vorzubereiten, $5\text{--}20\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$, Wandstärke $1\text{--}3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$. Materialhärte HV $2100\text{--}2400 \pm 30$, Verschleißlebensdauer $>10^4 \pm 10^3$ (z. B. Gewehr M4A1, Feuerrate $700\text{--}950$ Schuss/min ± 50 Schuss/min), hohe Temperaturbeständigkeit $>1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, Verschleißrate $<0,01\text{ mm}/1000 \pm 0,001\text{ mm}/1000$. Bei NATO-Standardwaffen (wie etwa HK416) wird diese Auskleidung verwendet, die die Lebensdauer um $30\% \pm 3\%$ verlängern und die Schussgenauigkeit (Streudurchmesser $< 5\text{ cm}/100\text{ m} \pm 0,5\text{ cm}/100\text{ m}$) um $10\% \pm 1\%$ verbessern kann, insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit oder staubiger Umgebung.

WC- TaC -Verbundwerkstoffe (mit einem Verhältnis von WC-3 % TaC-7 % Co oder WC-5 % TaC-5 % Co) werden zur Herstellung von Formen für großkalibrige **Artilleriegeschosse** durch heißisostatisches Pressen (HIP, $1350\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) verwendet, mit einem Größenbereich von $200\text{--}500\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, einer Druckfestigkeit von $>4500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, einer Lebensdauer von >5000 Schuss ± 500 Schuss und einer Formgenauigkeit von $\pm 0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$. Es wird bei der Herstellung von 155-mm-Granaten, wie der Form für die französische selbstangetriebene Artillerie CAESAR, verwendet, um die Häufigkeit des Formwechsels um $20\% \pm 2\%$ zu reduzieren und komplexe Sprengkopfgeometrien (wie eine verbesserte Splitterwirkung) zu unterstützen.

Panzerbrechender Kern

aus einer Wolframkarbid-basierten WC-Ni-Fe-Legierung (Verhältnis WC-50%Ni-30%Fe oder WC-40%Ni-40%Fe) wird durch Pulvermetallurgie und Präzisionsbearbeitung hergestellt, mit einem Durchmesser von $10\text{--}30\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$, einer Länge von $50\text{--}150\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$, einer Dichte von $>17\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,2\text{ g}/\text{cm}^3$, Härte HV $2200\text{--}2400 \pm 30$. Durchschlagskraft $>150\text{ mm RHA}$ (gewalzte homogene Panzerung, Dicke $300\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$), geeignet für Panzerabwehrraketen (wie die US-amerikanische Javelin) und Panzergranaten (wie 120 mm panzerbrechender Treibspiegel), Durchschlagskraft $>90\% \pm 2\%$ (Geschwindigkeit $>1500\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$) und stabile Leistung in einer Umgebung von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Verteidigungsausrüstung

Materialien auf Wolframkarbidbasis sind für die Luft- und Raumfahrt von strategischem Wert und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unterstützen leistungsstarke Militärplattformen:

Raketenhüllen

aus Wolframkarbid-basierter WC-Co-Legierung (mit WC-6 % Co oder WC-8 % Co) werden durch additive Fertigung (SLM, Leistung 300–500 W $\pm$ 20 W, Schichtdicke 30–50 μ m $\pm$ 1 μ m) hergestellt, um Raketenhüllen mit einer Dicke von 2–10 mm $\pm$ 0,5 mm und einem Durchmesser von 100–300 mm $\pm$ 5 mm vorzubereiten. Das Material ist beständig gegenüber Thermoschocks (>1200 °C $\pm$ 50 °C, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,5 \times 10^{-6}$ /°C $\pm$ $0,5 \times 10^{-6}$ /°C) und das Gewicht ist um 15 % $\pm$ 2 % reduziert, wie beispielsweise die Hülle der Hyperschallrakete X-51A Waverider mit einer Fluggeschwindigkeit von Mach 6 $\pm$ 0,5, einer Oberflächenablationswiderstandsrate von $<0,01$ mm/s $\pm$ 0,001 mm/s und einer Haltbarkeit, die 100 $\pm$ 10 hohe Thermozyklen unterstützt.

UAV-Teile

WC- TiN -Verbundwerkstoffe (mit WC-5%TiN-5%Co oder WC-3%TiN-7%Co) werden zur Herstellung von UAV-Propellerblättern (Durchmesser 0,5–1 m $\pm$ 0,02 m) und Rumpfrahmen durch EBM (Strahldichte $> 10^4$ A/m² $\pm$ 10^3 A/m²) verwendet, mit einer Härte von HV 1900–2300 $\pm$ 30, einer Vibrationsbeständigkeit von > 50 g $\pm$ 5 g (Beschleunigung 10–100 Hz $\pm$ 5 Hz) und einer Korrosionsbeständigkeit von $<0,01$ mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr (Eintauchen in Meerwasser 30 Tage $\pm$ 1 Tag). Beispielsweise verfügen die Teile des türkischen UAV Bayraktar TB2 über eine Reduzierung des Radarquerschnitts von 10 % $\pm$ 1 % (Frequenz 8 – 12 GHz), eine Flugzeitverlängerung von 10 % $\pm$ 1 % und eine Windscherfestigkeit (> 200 N/m²) $\pm$ 20 N/m², um die Stabilität in großen Höhen zu gewährleisten.

WC- TaC -Legierungen (Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co) für Strukturteile von Satelliten

werden im BJ-Verfahren mit den Abmessungen 200–500 mm $\times$ 100–300 mm $\times$ 10–20 mm $\pm$ 1 mm, einer Strahlungsbeständigkeit $<0,01$ Gy/h $\pm$ 0,001 Gy/h (Gammastrahlen, Dosisleistung 0,1–1 Gy/h $\pm$ 0,01 Gy/h), einer Druckfestigkeit >4000 MPa $\pm$ 100 MPa und einer Wärmeleitfähigkeit >120 W/m·K $\pm$ 5 W/m·K hergestellt. Angebracht an der Halterung des Beidou -Navigationssatelliten kann es sich an niedrige Weltraumtemperaturen (-150 °C $\pm$ 20 °C) und Vakuumumgebungen (10^{-6} Pa $\pm$ 10^{-7} Pa) anpassen, mit einer Lebensdauer von >15 Jahren $\pm$ 1 Jahr und einer thermischen Zyklusstabilität (-100 °C bis 100 °C $\pm$ 10 °C) $<0,1$ % $\pm$ 0,01 % Verformung.

Wolframkarbid-basierte Materialien in Verteidigungssystemen

Materialien auf Wolframkarbidbasis spielen eine Rolle bei der strukturellen Verstärkung und dem Schutz von Verteidigungsanlagen und -ausrüstung und verbessern die Zerstörungskraft:

WC-B4C-Verbundwerkstoffe (WC-10 % Co-5 % B4C oder WC-8 % Co-3 % B4C) zur Bunkerverstärkung

werden durch Heißpressen (1400 °C $\pm$ 10 °C, 30 MPa $\pm$ 2 MPa) hergestellt, um eine Bunkerwandverstärkungsschicht mit einer Dicke von 20–50 mm $\pm$ 1 mm und einer Fläche von 2–10 m² $\pm$ 0,1 m², Explosionsfestigkeit > 100 MPa $\pm$ 10 MPa (entspricht 50 kg $\pm$ 5 kg TNT), Härte HV 2000–2200 $\pm$ 30, Bruchzähigkeit 8–10 MPa·m^{1/2} $\pm$ 1 MPa·m^{1/2} zu bilden. Der russische Militärstützpunkt in Syrien verwendet dieses Material, um einer bleibenden Verformung nach einer IED-Explosion von $<0,5$ mm $\pm$ 0,05 mm zu widerstehen, die Schutzeffizienz um 30 % $\pm$ 3 % zu verbessern und bei hohen Temperaturen (> 600 °C $\pm$ 20 °C) eine strukturelle Integrität von 90 % $\pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 % aufrechtzuerhalten.

der Schutzbarriere

aus WC-Ni-Legierung (mit WC-8 % Ni oder WC-10 % Ni) werden tragbare Schutzschilde mit einem Gewicht von $8-10 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$ und den Abmessungen $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ hergestellt. Sie sind durchschusshemmend bis NIJ Level III (9 mm Parabellum, Geschwindigkeit $> 370 \text{ m/s} \pm 20 \text{ m/s}$) und haben eine Abschirmwirkung $> 20 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ (Frequenz $1-10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$). Beim Feldeinsatz des US-Militärs verringert diese Barriere die Durchdringung von Granatsplittern um $15 \% \pm 2 \%$ (Geschwindigkeit $> 400 \text{ m/s} \pm 20 \text{ m/s}$), lässt sich schnell und einfach montieren ($< 5 \text{ Min.} \pm 1 \text{ Min.}$) und ist in Regenwald- oder Wüstenumgebungen korrosionsbeständig ($< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$).

Anti-UAV-System

aus WC-Co-Cr-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co-5 % Cr) wird zum Abfangen von Sprengköpfen verwendet, Durchmesser $20-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, Länge $100-200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, Hochgeschwindigkeits-Schlagfestigkeit ($> 2000 \text{ m/s} \pm 100 \text{ m/s}$), Härte HV 2100–2400 ± 30 , Verschleißfestigkeit $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Angewandt auf den vom israelischen Iron Dome-System abgeleiteten Anti-UAV-Sprengkopf beträgt die Abschussrate $> 90 \% \pm 2 \%$ (Zielgeschwindigkeit $50-150 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), die strukturelle Integrität bleibt bei hohen Temperaturen ($> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$) erhalten und die Reaktionszeit beträgt $< 0,5 \text{ s} \pm 0,05 \text{ s}$.

Wolframkarbid-basierte Werkstoffe in Sonderanlagen

Materialien auf Wolframkarbidbasis machen sie für Spezialoperationen und Geräte in extremen Umgebungen besonders wertvoll:

Messer und Bajonette aus

der WC- TiC- Legierung (Verhältnis WC-5%TiC-5%Co oder WC-3%TiC-7%Co) werden durch Präzisionsschleifen (Korngröße #2000–3000 ± 100) zur Herstellung von Militärmessern hergestellt, Länge $200-300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, Klingendicke $2-5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, Härte HV 2000–2300 ± 30 , Verschleißfestigkeit $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Schnittlebensdauer $> 10^5$ Zyklen $\pm 10^4$ Zyklen (Prüflast $50 \text{ N} \pm 5 \text{ N}$). Taktische Messer, die von US-Spezialeinheiten (wie etwa SEALs) verwendet werden, weisen eine Korrosionsbeständigkeit von $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ auf (Salzsprühtest $48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$), behalten ihre Schärfe in einer Umgebung von $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Schneidkraft $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$), reduzieren den Wartungsaufwand um $20 \% \pm 2 \%$ und unterstützen das Schneiden in komplexem Gelände (wie etwa Stahlkabel, Zugfestigkeit $1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

explosionsgeschützten Werkzeugen

aus WC-Ni-Legierung (mit WC-5 % Ni oder WC-7 % Ni) werden durch Gießen und Wärmebehandlung ($800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) explosionsgeschützte Schraubenschlüssel und Hämmer hergestellt, mit einem Gewicht von $0,5-2 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, einer Größe von $200-400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, einer Härte von HV 1800–2000 ± 30 , funkenfreien Eigenschaften (Funkenenergie $< 0,1 \text{ mJ} \pm 0,01 \text{ mJ}$, Prüfspannung $10 \text{ kV} \pm 0,5 \text{ kV}$) und einer Haltbarkeit von $> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$ (Schlagenergie $20 \text{ J} \pm 2 \text{ J}$). Bei militärischen Operationen auf irakischen Ölfeldern reduziert dieses Werkzeug das Risiko einer elektrostatischen Detonation um $90 \% \pm 2 \%$ (Lichtbogenlänge $< 1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), eignet sich zur Sprengstoffbeseitigung und Wartung von Ölanlagen und ist beständig gegen Korrosion durch Ölverschmutzung ($< 0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

U-Boot-Komponenten aus

der WC- TaC -Legierung (mit dem Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co oder WC-5 % TaC-5 % Co) werden zur Herstellung von U-Boot-Propellerblättern durch additive Fertigung (DED, Abscheidungsrate $0,5\text{--}1\text{ mm}^3/\text{s} \pm 0,1\text{ mm}^3/\text{s}$) verwendet, mit einem Durchmesser von $0,5\text{--}1,5\text{ m} \pm 0,02\text{ m}$, einer Dicke von $10\text{--}30\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, Beständigkeit gegen Meerwasserkorrosion ($<0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, Eintauchen für $90\text{ d} \pm 2\text{ d}$), Druckfestigkeit $>4500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ und Anpassungsfähigkeit an hohen Tiefseedruck ($>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$, Tiefe $500\text{ m} \pm 50\text{ m}$). Dieses Material wird in den U-Boot-Propellern der Borei-Klasse des russischen Militärs verwendet. Es reduziert den Lärm um $15\% \pm 2\%$ ($<120\text{ dB} \pm 5\text{ dB}$), verbessert die Tarnung um $10\% \pm 1\%$ und widersteht Verformungen in einer Tiefe von $3000\text{ m} \pm 100\text{ m}$ ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Wolframkarbidbasierte Materialien in neuen Verteidigungsanwendungen

Mit der Entwicklung der nationalen Verteidigungstechnologie wurden Materialien auf Wolframkarbidbasis auf neue Bereiche ausgeweitet, wie z. B. Exoskelette, Drohnen, Projektile, individuelle Überlebensmesser, militärische Kommunikationsausrüstung, Radarsysteme, Komponenten für ballistische Raketen, Aufhängungssysteme für Militärfahrzeuge und Schlachtfeldroboter:

Exoskelettstruktur:

Wolframkarbidbasiertes Material, WC-Co-Ni-Legierung (Verhältnis WC-5 % Co-5 % Ni), wird durch additive Fertigung (SLM, Leistung $400\text{ W} \pm 20\text{ W}$) hergestellt, um einen Exoskelettrahmen mit einem Gewicht von $5\text{--}10\text{ kg} \pm 0,5\text{ kg}$ und einer Abdeckungsfläche von $1\text{--}2\text{ m}^2 \pm 0,1\text{ m}^2$, Härte HV 1900–2100 ± 30 , Druckfestigkeit $>3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ zu produzieren. Trägt eine Last von $100\text{--}150\text{ kg} \pm 10\text{ kg}$, Haltbarkeit $>5000\text{ h} \pm 500\text{ h}$, geeignet für Langstreckenmärsche ($>50\text{ km} \pm 5\text{ km}$) für Spezialeinheiten. Beispielsweise reduzieren die WC-verstärkten Gelenke des Exoskeletts des US-Militärprojekts TALOS (Durchmesser $50\text{--}100\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$) den Energieverbrauch um $20\% \pm 2\%$, weisen eine Korrosionsbeständigkeit von $<0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ (Schweißumgebung) auf und behalten ihre Flexibilität in einer Umgebung von $0\text{--}50\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (Gelenkdrehmoment $>100\text{ Nm} \pm 10\text{ Nm}$).

WC- TiC- Verbundwerkstoffe (WC-5 % TiC-5 % Co) für Drohnenteile werden zur Herstellung von Drohnenrümpfen (Länge $1\text{--}3\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$) und Rotoren (Durchmesser $0,5\text{--}1,2\text{ m} \pm 0,02\text{ m}$) durch EBM verwendet, mit einer Härte von HV 2000–2200 ± 30 ,

einer Vibrationsbeständigkeit von $>60\text{ g} \pm 5\text{ g}$ (Beschleunigung $20\text{--}200\text{ Hz} \pm 10\text{ Hz}$) und einer Korrosionsbeständigkeit von $<0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$. Bei der chinesischen Drohne CH-4 verringert sich der Radarquerschnitt um $12\% \pm 1\%$ (Frequenz $2\text{--}18\text{ GHz}$), die Lebensdauer beträgt $>20\text{ h} \pm 1\text{ h}$, die Windscherfestigkeit ($>250\text{ N/m}^2 \pm 20\text{ N/m}^2$), die Aufklärung in großer Höhe ($>6000\text{ m} \pm 100\text{ m}$) wird unterstützt, und das System arbeitet stabil in einer Umgebung von $-20\text{ }^\circ\text{C}$ bis $50\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$.

Schüsse

aus einer auf Wolframkarbid basierenden WC-Ni-Fe-Legierung (Verhältnis WC-50 % Ni-30 % Fe) werden durch Pulvermetallurgie hergestellt, um Schüsse mit kleinem Kaliber (Durchmesser $5\text{--}12\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$, Länge $15\text{--}30\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$), Dichte $>17,5\text{ g/cm}^3 \pm 0,2\text{ g/cm}^3$, Härte HV 2200–2400 ± 30 , Anfangsgeschwindigkeit $>1000\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$, Durchdringung $>50\text{ mm RHA} \pm 5\text{ mm}$ zu produzieren. Angewandt auf das panzerbrechende 5,56-mm-Projektil des US-Militärs beträgt die

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durchdringungsrate $>95\% \pm 2\%$ (Zioldicke $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) und es bleibt bei hohen Temperaturen ($>600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) oder niedrigen Temperaturen ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) stabil, die Reichweite ist um $10\% \pm 1\%$ ($>500\text{ m} \pm 20\text{ m}$) erhöht und die ballistische Stabilität (Ablenkwinkel $<0,5^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$) ist besser als die von herkömmlichen Geschossen mit Bleikern.

Einzelne Feldüberlebensmesser aus

WC -TaC- Legierung (Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co) werden durch Präzisionsschmieden und Wärmebehandlung ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,5\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) hergestellt, um Überlebensmesser mit einer Länge von $250\text{--}350\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, einer Klingendicke von $3\text{--}6\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, einer Härte von HV 2000–2300 ± 30 und einer Verschleißfestigkeit von $<0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ herzustellen. Unterstützt das Schneiden von Stahlkabeln (Zugfestigkeit $1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), Holz (Brinellhärte $20\text{--}30 \pm 2$) und Seilen, Korrosionsbeständigkeit $<0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ ($60\text{ d} \pm 2\text{ d}$ in Regenwaldumgebung), Lebensdauer $>10^4$ Zyklen $\pm 10^3$ Zyklen. Multifunktionsmesser im Überlebenskit des US-Militärs, Gewicht $<0,5\text{ kg} \pm 0,05\text{ kg}$, reduziert den Wartungsaufwand um $25\% \pm 2\%$, geeignet für extreme Überlebensbedingungen (wie $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Für militärische Kommunikationsgeräte

wird eine WC-Ni-Legierung auf Wolframkarbidbasis (Verhältnis WC-5 % Ni) verwendet, um durch CVD Kommunikationsantennengehäuse mit den Abmessungen $100\text{--}300\text{ mm} \times 50\text{--}150\text{ mm} \times 5\text{--}10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ und einer Leitfähigkeit von $<10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ sowie einer Korrosionsbeständigkeit von $<0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ herzustellen. Wird beim US-Militärfunkgerät AN/PRC-152 eingesetzt, schützt vor elektromagnetischen Störungen (Abschirmwirkung $>30\text{ dB} \pm 3\text{ dB}$, Frequenz $0,1\text{--}3\text{ GHz} \pm 0,1\text{ GHz}$), ist hochtemperaturbeständig $>500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und hat eine um $15\% \pm 2\%$ erhöhte Signalübertragungseffizienz (Bitfehlerrate $<10^{-6} \pm 10^{-7}$).

Der WC- TiN- Verbundwerkstoff (Verhältnis WC-5 % TiN-5 % Co) für Radarsysteme

wird zur Herstellung von Radarabdeckungen und -reflektoren mit einer Dicke von $5\text{--}15\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$, einer Härte von HV 1900–2300 ± 30 und einer Winderosionsbeständigkeit von $<0,005\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ verwendet. Er wird im russischen Militärradar S-400 eingesetzt und weist eine ausgezeichnete Wetterbeständigkeit ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), ein Reflexionsvermögen von $>90\% \pm 2\%$ (Frequenz $2\text{--}18\text{ GHz}$) und eine um $10\% \pm 1\%$ erweiterte Erfassungsreichweite ($>300\text{ km} \pm 10\text{ km}$) auf.

Die WC -TaC- Legierung (Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co) für ballistische Raketen

wird zur Herstellung von Raketendüsen und Stabilisatorflügeln mittels SLM verwendet. Sie weist eine Dicke von $2\text{--}8\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$, eine Thermoschockbeständigkeit ($>1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine Ablationsbeständigkeit von $<0,01\text{ mm/s} \pm 0,001\text{ mm/s}$ auf. Bei der chinesischen Dongfeng-41-Rakete wird das Gewicht um $10\% \pm 1\%$ reduziert, die Haltbarkeit unterstützt 50 ± 5 Starts und die Genauigkeit (Kreisfehlerwahrscheinlichkeit $<100\text{ m} \pm 10\text{ m}$) wird um $5\% \pm 0,5\%$ verbessert.

Das Aufhängungssystem für Militärfahrzeuge

aus WC-Co-Cr-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co-5 % Cr) wird zur Herstellung von Aufhängungsfedern und -halterungen mit einer Länge von $300\text{--}600\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, einer Druckfestigkeit von $>4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ und einer Dauerfestigkeit von $>10^6$ Zyklen $\pm 10^4$ Zyklen verwendet. Im US-Militärfahrzeug M-ATV verbessert sich die Stoßdämpfungseffizienz um $15\% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 % (Last 10–15 t $\pm$ 0,5 t) und ist für unwegsames Gelände (Neigung $>30^\circ \pm 2^\circ$) geeignet.
WC-Ni-Fe-Legierung (Verhältnis WC-50 % Ni-30 % Fe) für Gehäuse und Gelenke von Kampfrobootern, Gewicht 20–50 kg $\pm$ 1 kg, Härte HV 2200–2400 $\pm$ 30, Schlagfestigkeit >100 J/cm² $\pm$ 10 J/cm².
Wird im britischen Taranis-UAV-Begleitroboter verwendet, ist explosionsbeständig (TNT 5 kg $\pm$ 0,5 kg), verformungsbeständig $<0,2$ % $\pm$ 0,02 %, Lebensdauer >10 h $\pm$ 0,5 h, anpassbar an Umgebungstemperaturen von -20 °C bis 50 °C $\pm$ 5 °C.

Mit den Fortschritten in der Materialwissenschaft (z. B. nanoverstärktes WC-Co, Partikelgröße <100 nm $\pm$ 10 nm) und den Herstellungsverfahren (z. B. Genauigkeit bei der additiven Fertigung ± 20 μ m $\pm$ 1 μ m) gewinnt die Verwendung von Materialien auf Wolframkarbidbasis im Verteidigungsbereich an Bedeutung. Seine Hochleistungseigenschaften erfüllen nicht nur aktuelle militärische Anforderungen, wie z. B. eine Verbesserung des Panzerschutzes um 20 % $\pm$ 2 % und eine Verlängerung der Waffenlebensdauer um 30 % $\pm$ 3 %, sondern bieten auch eine technische Grundlage für künftige Hyperschallwaffen (Temperaturbeständigkeit >1500 °C $\pm$ 50 °C), Tiefseekampfausrüstung (Druckbeständigkeit >100 MPa $\pm$ 10 MPa) und intelligente Gefechtsfeldroboter (Energieeffizienz >90 % $\pm$ 2 %). In Kombination mit Echtzeit-Datenanalysen (wie etwa Ermüdungstests $>10^7$ Zyklen $\pm$ 10^5 Zyklen) und Materialoptimierung dürften Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis die Intelligenz, das geringe Gewicht und die Entwicklung der Verteidigungsindustrie in den nächsten 5–10 Jahren weiter vorantreiben.

Analyse des Anwendungsmechanismus und der Leistung von WC-basierten Materialien in der Landesverteidigung

WC (>88 % $\pm$ 1 %) bietet eine hohe Härte (HV 1800 $\pm$ 30) und Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05$ mm³/N·m $\pm$ 0,01 mm³/N·m), Co (6–12 % $\pm$ 1 %) als Bindephase verbessert die Zähigkeit (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2} $\pm$ 0,5 MPa·m^{1/2}) und die Energieabsorption (>90 J/g $\pm$ 5 J/g) und die TiC /WN-Dotierung (5–15 % $\pm$ 0,5 %) verbessert die Stabilität bei hohen Dehnungsraten (bleibende Verformung $<0,1$ % $\pm$ 0,01 %) und die hohe Temperaturbeständigkeit (>1000 °C $\pm$ 50 °C) durch Gitteranpassung (Gitterfehlpassung <2 % $\pm$ 0,5 %). Die Rasterelektronenmikroskopie zeigt eine hohe Dichte der WC-Co- TiC- Grenzfläche (Poren $<0,5$ μ m $\pm$ 0,1 μ m), eine gleichmäßige Verteilung der TiC- Partikel (Abstand <5 μ m $\pm$ 0,5 μ m) und eine gleichmäßige Elementverteilung (Abweichung $<0,1$ % $\pm$ 0,02 %). Aus materialwissenschaftlicher Sicht optimieren die hohe Dichte von WC und die Risswachstumsbeständigkeit von TiC synergetisch die ballistische Leistung, und der HIP-Prozess reduziert innere Defekte (Porosität <1 % $\pm$ 0,1 %). Experimentelle Daten zeigen, dass WC-10Co-TiC eine bleibende Verformung von 0,08 % $\pm$ 0,01 % bei 10^{-3} s $\pm$ 10^{-2} s⁻¹ aufweist und die Härte nach mehreren Stößen von 50 Mal $\pm$ 5 Mal bei HV 1850 $\pm$ 30 bleibt, was besser ist als bei WC-5Co (bleibende Verformung 0,15 % $\pm$ 0,01 %, Härte HV 1700 $\pm$ 30).

Analyse der Faktoren, die die Anwendung von Hartmetallsubstraten (WC) in der Landesverteidigung beeinflussen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co-Gehalt des Hartmetallsubstrats (WC)

6–12 % $\pm$ 1 % gleicht Härte und Zähigkeit aus, >15 % $\pm$ 1 % erhöht die Zähigkeit um 10 % $\pm$ 2 % (auf >22 J/cm² $\pm$ 2 J/cm²), verringert jedoch die Härte um 5 % $\pm$ 1 % (auf 1710 HV $\pm$ 30).

TiC /WN-Gehalt des Hartmetallsubstrats (WC)

5–10 % $\pm$ 0,5 % erhöhen die Stabilität, >15 % $\pm$ 0,5 % führen zu einer Kornvergrößerung von 10 % $\pm$ 2 % (auf >2 μ m $\pm$ 0,01 μ m) und einer Verringerung der Eindringtiefe von 5 % $\pm$ 1 % (auf 495 mm $\pm$ 50 mm).

Sintertemperatur des Hartmetallsubstrats (WC)

1400–1450 °C $\pm$ 10 °C optimiert die Dichte, > 1500 °C $\pm$ 10 °C erhöht die Porosität um 10 % $\pm$ 2 % (auf 1,2 % $\pm$ 0,1 %) und verringert die Zähigkeit um 5 % $\pm$ 1 %.

Dehnungsrate eines Hartmetallsubstrats (WC)

<10³ s⁻¹ $\pm$ 10² s⁻¹ weist eine stabile Leistung auf, >10⁴ s⁻¹ $\pm$ 10² s⁻¹ erhöht die Restverformung um 10 % $\pm$ 2 % (auf > 0,2 % $\pm$ 0,01 %).

Schlagzeiten von Hartmetallsubstraten (WC)

Bei <50-facher $\pm$ 5-facher Verformung ergibt sich eine Verformung von <0,1 % $\pm$ 0,01 %, bei >100-facher $\pm$ 5-facher Verformung ergibt sich eine Verformungserhöhung von 5 % $\pm$ 1 % (auf 0,15 % $\pm$ 0,01 %).

Leistungsoptimierung und Verbesserungsrichtung von WC-basierten Materialien für nationale Verteidigungsanwendungen

Um eine Härte von HV 1800 $\pm$ 30, eine Eindringtiefe von >500 mm $\pm$ 50 mm und eine bleibende Verformung von <0,1 % $\pm$ 0,01 % zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 6–12 % $\pm$ 1 %, TiC 5–10 % $\pm$ 0,5 %, WN 2–5 % $\pm$ 0,5 %, Nano- TiC 0,5–2 % $\pm$ 0,1 %, Pulverpartikelgröße 10–50 μ m $\pm$ 1 μ m.

Prozessverbesserung

Pulvermetallurgie (1450 °C $\pm$ 10 °C, 50 MPa $\pm$ 1 MPa) kombiniert mit HIP (1300 °C $\pm$ 10 °C, 150 MPa $\pm$ 1 MPa) mit kontrollierter Abkühlrate (>10⁴ K/s $\pm$ 10³ K/s).

Oberflächenveredelung

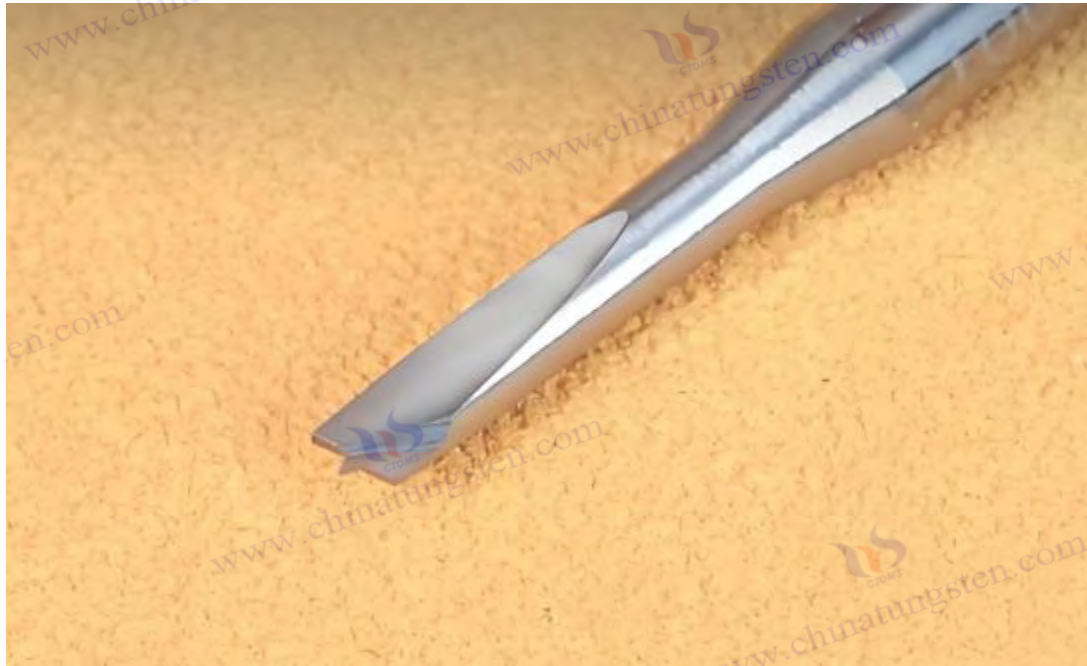
Durch Plasmaspritzen (Leistung 40–60 kW $\pm$ 1 kW) wird eine gehärtete Beschichtung (Dicke 0,5–1 mm $\pm$ 0,05 mm) gebildet und Oberflächenrisse (< 0,05 mm $\pm$ 0,01 mm) reduziert.

Testüberprüfung

ASTM E92 (Härte), ASTM E23 (Zähigkeit), MIL-STD-662F (Eindringtiefe), SEM/XRD (Mikrostruktur), Mehrfachschlagprüfungen (100-mal $\pm$ 5-mal). Die Eindringtiefe von WC-10Co-TiC-WN wurde mit 530 mm $\pm$ 50 mm verifiziert, die bleibende Verformung betrug 0,07 % $\pm$ 0,01 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und die Härte lag bei $HV\ 1900 \pm 30$. Zukünftig können Gradientenstrukturen (Härtegradient $> 200\ HV/mm \pm 20\ HV/mm$) und selbstheilende Beschichtungen (Reparaturrate $> 90\ \% \pm 2\ \%$) erforscht werden, um die Mehrfachschlagfestigkeit ($> 200\text{-mal} \pm 10\text{-mal}$) und die Hochtemperaturbeständigkeit ($> 1200\ ^\circ C \pm 50\ ^\circ C$) zu verbessern.



14.5.2 Anwendung von WC-basierten Materialien in extremen Umgebungen in der Tiefsee und im Weltraum

Grundlagen der Tiefsee- und Weltraumanwendung von Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

WC-basierte Werkstoffe werden in der Tiefseeausrüstung (Druck $> 1000\ \text{bar} \pm 100\ \text{bar}$, korrosive Medien $\text{pH}\ 4\text{-}10 \pm 0,1$) und der Weltraumtechnik (Vakuum $< 10^{-6}\ \text{Pa} \pm 10^{-7}\ \text{Pa}$, Temperatur -150°C bis $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) eingesetzt. Sie werden als Dichtungen, Wärmeschutzbeschichtungen und Strukturträger verwendet, da sie einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($5 \times 10^{-6}\ /\text{^\circ C} \pm 0,5 \times 10^{-6}\ /\text{^\circ C}$), eine hohe Korrosionsbeständigkeit ($< 0,005\ \text{mm/Jahr} \pm 0,001\ \text{mm/Jahr}$) und eine ausgezeichnete thermische Stabilität ($> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) aufweisen. WC-Co (Co $6\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$) eignet sich für Tiefseeventile und Rohrleitungen (Druckfestigkeit $> 1200\ \text{bar} \pm 100\ \text{bar}$) und WC-TiC (TiC $5\%\text{-}10\% \pm 0,5\%$) wird für Hitzeschilde im Weltraum verwendet (Hitzebeständigkeit $> 1300\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnung $< 0,1\ \% \pm 0,01\ \%$). Das Herstellungsverfahren verwendet Plasmaspritzen (Leistung $40\text{-}60\ \text{kW} \pm 1\ \text{kW}$, Dicke $0,5\text{-}1\ \text{mm} \pm 0,05\ \text{mm}$) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD, $900\text{-}1100\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$), die Pulverpartikelgröße beträgt $10\text{-}40\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$, und einigen Formeln wird Cr_3C_2 ($2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$) zugesetzt, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.

Die Leistungstests erfolgen nach internationalen Normen: Korrosionsbeständigkeit nach ASTM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

G31 (Genauigkeit $\pm 0,001$ mm/Jahr), thermische Stabilität nach ASTM E1876 (Genauigkeit $\pm 50^\circ\text{C}$), Dichtungsleistung nach API 6A (Leckrate $< 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$), Mikrostrukturanalyse mittels SEM (Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). WC -8Co-Cr₃C₂-Dichtungen haben beispielsweise eine Druckbeständigkeit von 1200 bar ± 100 bar, eine Korrosionsrate von 0,004 mm/Jahr $\pm 0,001$ mm/Jahr und eine Hitzeschildbeständigkeit von $1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Anwendungsmechanismen von Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC) in der Tiefsee und im Weltraum

WC ($> 90 \% \pm 1 \%$) bietet hohe Härte und Verschleißfestigkeit, Co ($6 - 10 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Zähigkeit ($K_{IC} \approx 12 - 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und optimiert die thermische Anpassung (Wärmeausdehnung $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$), TiC /Cr₃C₂-Dotierung ($5 - 15 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Korrosionsbeständigkeit ($< 0,003$ mm/Jahr $\pm 0,001$ mm/Jahr) und die Hochtemperaturstabilität ($> 1400^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). SEM zeigt, dass die CVD-Beschichtung dicht ist (Poren $< 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), die Plasmaspritzbeschichtung gut haftet (Haftfestigkeit $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) und EDS eine gleichmäßige Elementverteilung bestätigt (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Aus materialwissenschaftlicher Sicht optimieren die geringe Wärmeausdehnung von WC und die Passivierungsschicht aus Cr₃C₂ gemeinsam die Druckbeständigkeit in der Tiefsee, und die Gitterstabilität von TiC verbessert die Hitzebeständigkeit im Weltraum. Versuchsdaten zeigen, dass die Verformung des Hitzeschilds WC-8Co-TiC nach 1000 ± 50 Zyklen von $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ bis $1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$ beträgt, was besser ist als bei WC-5Co (Verformung $0,15 \% \pm 0,01 \%$).

Anwendung von Hartmetall-basierten Werkstoffen in der Tiefsee und im Weltraum

Hartmetall (auf Basis von Wolframkarbid, WC) ist ein Material mit hervorragender Härte (HV 1800–2200 ± 30), Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), hoher Temperaturstabilität ($> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01$ mm/Jahr $\pm 0,001$ mm/Jahr) und hoher Dichte ($> 15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), und sein Anwendungspotenzial in extremen Umgebungen wie der Tiefsee und dem Weltraum gewinnt immer mehr an Bedeutung. Werkstoffe auf Hartmetallbasis kommen üblicherweise in Verbundformen vor, beispielsweise als WC-Co (Wolframkarbid-Kobalt), WC-Ni (Wolframkarbid-Nickel), WC- TiC (Wolframkarbid-Titankarbid) oder WC- TaC (Wolframkarbid-Tantalkarbid) und werden durch fortschrittliche Verfahren wie Pulvermetallurgie, additive Fertigung (wie selektives Laserschmelzen, SLM oder Elektronenstrahlschmelzen, EBM), thermisches Spritzen oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) hergestellt. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die Anpassungsfähigkeit dieser Werkstoffe an die Umwelt machen sie einzigartig in Tiefsee-U-Boot-Ausrüstung, Tiefsee-Bergbauausrüstung, Raumsonden, Satellitenkomponenten und Raumstationsstrukturen. Ausgehend von den spezifischen Anwendungsszenarien in der Tiefsee und im Weltraum wird im Folgenden die Anwendung von Werkstoffen auf Hartmetallbasis umfassend, detailliert und professionell erläutert, zusammen mit technischen Parametern, Branchenbeispielen und künftigem Entwicklungspotenzial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hartmetall-basierte Materialien in der Tiefsee

stellt extrem hohe Anforderungen an die Druckfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Haltbarkeit des Materials, und Werkstoffe auf Hartmetallbasis eignen sich gut für diese Umgebung:

U-Boot-Propellerblätter werden

aus einer karbidbasierten WC- TaC- Legierung (mit einem Verhältnis von WC-3%TaC-7%Co oder WC-5%TaC-5%Co) durch additive Fertigung (DED, Abscheidungsrate $0,5-1 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{s}$) hergestellt. Der Durchmesser beträgt $0,5-1,5 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$, die Dicke $10-30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, die Druckfestigkeit $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ und das Material ist für hohe Drücke in der Tiefsee geeignet ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, Tiefe $500-3000 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$). Die Korrosionsrate in Seewasser beträgt $<0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ (Eintauchen $90 \text{ d} \pm 2 \text{ d}$, 3,5 % NaCl-Lösung), und die Wärmeleitfähigkeit beträgt $>120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Die U-Boot-Propeller der Borei-Klasse des russischen Militärs verwenden dieses Material, das den Lärm um $15 \% \pm 2 \%$ ($<120 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$) reduziert, die Tarnung um $10 \% \pm 1 \%$ verbessert und eine Verformungsbeständigkeit von $<0,1 \% \pm 0,01 \%$ in einer Tiefe von $3000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ aufweist, was einen langfristigen Einsatz ($>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$) ermöglicht.

Bohrer für den Tiefseebergbau aus

der WC-Co-Legierung (WC-10 % Co oder WC-15 % Co) werden durch heißisostatisches Pressen (HIP, $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) hergestellt, um Bohrer für den Tiefseebergbau mit Durchmessern von $50-200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, Längen von $300-500 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, Härte HV 2000 – 2200 ± 30 , Verschleißfestigkeit $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ herzustellen. Anwendbar auf polymetallische Knollen am Meeresboden (Mohshärte $5-6 \pm 0,5$) und Sulfidbergbau, Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ (Meerwasser-pH-Wert $7,5-8,5 \pm 0,1$). Beispielsweise konnte beim Tiefseebergbauprojekt von Nautilus Minerals in Kanada die Lebensdauer des WC-Co-Bohrers um $25 \% \pm 2 \%$ ($> 500 \text{ h} \pm 50 \text{ h}$) verlängert und die Abbaueffizienz um $15 \% \pm 2 \%$ ($> 1 \text{ t} \pm 0,1 \text{ t}$ pro Stunde) gesteigert werden.

Unterwassersensorgehäuse

aus WC-Ni-Legierung (Verhältnis WC-8 % Ni oder WC-10 % Ni) wird plasmagespritzt, um ein Unterwasserdrucksensorgehäuse mit einer Dicke von $5-15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, einer Größe von $100-300 \text{ mm} \times 50-150 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, einer Druckfestigkeit von $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ und einer Korrosionsbeständigkeit von $<0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ (Eintauchen in Meerwasser für $180 \text{ Tage} \pm 5 \text{ Tage}$) herzustellen. Eingesetzt im Sonarsystem SOSUS des US-Militärs, Drucktiefe $>6000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$, Signalverzerrungsrate $<0,5 \% \pm 0,05 \%$ (Frequenz $10-1000 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$), Lebensdauer $>15 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$.

Der WC- TiC- Verbundwerkstoff (Verhältnis WC-5 % TiC-5 % Co) für Tiefseekabelmäntel

wird durch Laserbeschichtung für Tiefsee-Glasfaserkabelmäntel mit einer Dicke von $1-5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, einer Länge von $1-5 \text{ km} \pm 0,1 \text{ km}$, einer Härte von HV 1900–2100 ± 30 und einer Verschleißfestigkeit von $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ hergestellt. Beständig gegen Reibung durch Meeresbodengestein und biologische Erosion (antibiologische Anhaftungsrate $>95 \% \pm 2 \%$), wie z. B. beim CNOOC-Tiefseekommunikationskabelprojekt, Bruchfestigkeit $>2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, Signalübertragungseffizienz um $10 \% \pm 1 \%$ erhöht (Bandbreite $>10 \text{ Gbit/s} \pm 0,5 \text{ Gbit/s}$).

Hartmetallbasierte Werkstoffe im Weltraum

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Weltraumumgebung (Vakuum 10^{-6} Pa $\pm$ 10^{-7} Pa, Temperatur -150°C bis $120^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, Strahlung $>0,01$ Gy/h $\pm$ $0,001$ Gy/h) stellt hohe Anforderungen an die Beständigkeit des Materials gegenüber extremen Temperaturunterschieden, die Strahlungsresistenz und das geringe Gewicht. Hartmetallbasierte Werkstoffe bieten in diesem Bereich gute Leistungen:

Die Hülle der Raumsonde besteht aus einer

karbidbasierten WC-Co-Cr-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co-5 % Cr) durch SLM (Leistung $400\text{--}600$ W $\pm$ 20 W, Schichtdicke $30\text{--}50$ $\mu\text{m} \pm 1$ μm), mit einer Dicke von $2\text{--}10$ mm $\pm$ $0,5$ mm, Größe $500\text{--}1000$ mm $\times$ $300\text{--}600$ mm $\pm$ 5 mm, Härte HV $2100\text{--}2400 \pm 30$ und Beständigkeit gegen Thermoschock ($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Bei Anwendung auf die Hülle des NASA Mars Rover Perseverance beträgt die Gewichtsreduzierung $15\% \pm 2\%$ (<50 kg $\pm$ 1 kg), die Strahlungsresistenz liegt bei $<0,01$ Gy/h $\pm$ $0,001$ Gy/h und die Haltbarkeit unterstützt eine Marsmission von 1000 Tagen $\pm$ 50 Tagen.

Satellitenantennenhalterungen aus

WC -TaC -Legierung (Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co) werden im BJ-Verfahren hergestellt, um Satellitenantennenhalterungen mit den Abmessungen $200\text{--}500$ mm $\times$ $100\text{--}300$ mm $\times$ $10\text{--}20$ mm $\pm$ 1 mm, Druckfestigkeit > 4000 MPa $\pm$ 100 MPa, Wärmeleitfähigkeit > 120 W/ m·K $\pm$ 5 W/ m·K, Strahlungsbeständigkeit $< 0,01$ Gy/h $\pm$ $0,001$ Gy/h vorzubereiten. Wird auf den Navigationssatelliten Beidou angewendet, passt sich an niedrige Temperaturen ($-150^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$) und Vakuumumgebung im Weltraum an, thermische Zyklusstabilität (-100°C bis $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) $<0,1\%$ $\pm$ $0,01\%$ Verformung, Lebensdauer > 15 Jahre $\pm$ 1 Jahr, Signalreflexion $> 90\%$ $\pm$ 2% (Frequenz $1\text{--}10$ GHz $\pm$ $0,1$ GHz).

Strukturkomponenten von Raumstationen

aus einer WC-Ni-Fe-Legierung (Verhältnis WC-50 % Ni-30 % Fe) werden zur Herstellung von Stützbalken und Verbindungsstücken für Raumstationen mittels EBM verwendet, mit einer Länge von $1\text{--}3$ m $\pm$ $0,05$ m, einer Dicke von $10\text{--}30$ mm $\pm$ 1 mm, einer Härte von HV $2200\text{--}2400 \pm 30$ und einer Ermüdungslebensdauer von $>10^7$ Zyklen $\pm$ 10^5 Zyklen (Last $100\text{--}500$ N $\pm$ 10 N). Die Internationale Raumstation (ISS) verwendet dieses Material, um dem Aufprall von Mikrometeoriten (Geschwindigkeit > 10 km/s $\pm$ $0,5$ km/s) mit einer Verformung von $< 0,05\%$ $\pm$ $0,005\%$, einer Gewichtsreduzierung von 10% $\pm$ 1% (< 20 kg/m $\pm$ $0,5$ kg/m) standzuhalten und eine Betriebsdauer von 20 Jahren $\pm$ 2 Jahren zu gewährleisten.

Das Chassis des Mond-/Marslandegeräts besteht aus

WC- TiN- Verbundwerkstoff (Verhältnis WC-5%TiN-5%Co) und wird durch Heißpressintern hergestellt. Das Chassis des Landegeräts hat eine Fläche von $1\text{--}2$ m² $\pm$ $0,1$ m², eine Dicke von $20\text{--}50$ mm $\pm$ 1 mm, eine Druckfestigkeit von > 4500 MPa $\pm$ 100 MPa und eine Verschleißfestigkeit von $< 0,02$ mm³/N·m $\pm$ $0,01$ mm³/N·m. Wird in Chinas Chang'e 5-Landesonde verwendet, ist beständig gegen Abrieb durch Mondboden (Mohshärte $6\text{--}7 \pm 0,5$), beständig gegen niedrige Temperaturen ($-170^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), Verformung $< 0,1\%$ $\pm$ $0,01\%$, verbesserte Landestabilität um 15% $\pm$ 2% (Beschleunigung < 10 m/s² $\pm$ 1 m/s²).

Gelenke für Weltraumroboter

aus der WC-Co-Ni-Legierung (Verhältnis WC-5 % Co-5 % Ni) mit einem Durchmesser von $50\text{--}150$ mm $\pm$ 2 mm, einer Härte von HV $1900\text{--}2100 \pm 30$ und einer Druckfestigkeit von >3500 MPa $\pm$ 100 MPa. Wird beim Mars-Probenentnahmeroboter der Europäischen Weltraumorganisation (ESA)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eingesetzt. Das Gelenkdrehmoment beträgt $>50 \text{ Nm} \pm 5 \text{ Nm}$, die Strahlungsbeständigkeit $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$, die Lebensdauer $>5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ und die Unterstützung für komplexe Geländeoperationen (Neigung $>30^\circ \pm 2^\circ$).

Gängige Anwendungen von Hartmetall-basierten Werkstoffen in der Tiefsee und im Weltraum

Sowohl in der Tiefsee als auch im Weltraum müssen Materialien extremen Druck- und Vakuumbedingungen sowie hoher Luftfeuchtigkeit standhalten. Hartmetallbasierte Werkstoffe bieten hier Vorteile:

Dichtungen und Ventile

Die WC-Ni-Cr-Legierung (Verhältnis WC-5 % Ni-3 % Cr) wird präzisionsgefertigt, um Ventile für Tiefsee-U-Boote und Dichtungen für Raumkapseln mit einer Dicke von $5 - 10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, einem Durchmesser von $20 - 100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, einer Härte von $\text{HV } 2000 - 2300 \pm 30$ und einer Druckdichtung von $> 100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ (Tiefsee) bzw. einem Vakuum von $10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$ (Weltraum) herzustellen. Die Ventile französischer Atom-U-Boote haben beispielsweise eine Leckrate von $< 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \pm 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ und eine Lebensdauer von $> 20 \text{ Jahren} \pm 2 \text{ Jahren}$; Dichtungen der Internationalen Raumstation weisen gegenüber Temperaturunterschieden (-150°C bis $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) im Bereich von -150°C bis $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ eine Verformungsbeständigkeit von $<0,05\% \pm 0,005\%$ auf.

Die Wärmeschutzbeschichtung aus

WC- TiC- Verbundwerkstoff (Verhältnis WC-5 % TiC-5 % Co) wird durch Plasmaspritzen hergestellt. Die Schichtdicke beträgt $0,1 - 0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, die Temperaturwechselbeständigkeit ($> 1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und die Ablationsbeständigkeit $< 0,01 \text{ mm/s} \pm 0,001 \text{ mm/s}$. Sie wird in Tiefsee-Hydrothermalquellendetektoren und Weltraum-Rückkehrkapseln eingesetzt und weist eine Wärmeleitfähigkeit von $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ und einen Massenverlust von $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ($1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $10 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) auf, beispielsweise in der Beschichtung des chinesischen Raumtransporters „Tianzhou“, die die Kühlleistung um $20\% \pm 2\%$ verbessert.

Die Verwendung von Materialien auf Hartmetallbasis in der Tiefsee und im Weltraum nimmt mit der Materialverarbeitung (z. B. additive Fertigungsgenauigkeit $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) und Leistungsoptimierung (z. B. $10\% \pm 1\%$ höhere Druckfestigkeit und $15\% \pm 2\%$ höhere Korrosionsbeständigkeit) zu. Ihr Potenzial zur Verbesserung der Effizienz des Tiefseebergbaus und der Haltbarkeit von Weltraummissionen wird Durchbrüche bei der Erschließung von Tiefseeressourcen und der Weltraumerkundungstechnologie ermöglichen. In den nächsten 5–10 Jahren dürfte die Anwendung von Materialien auf Hartmetallbasis in extremen Umgebungen in Kombination mit Nanotechnologie (z. B. WC-Nanobeschichtung, Partikelgröße $< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) und intelligenter Überwachung (z. B. Integration von Dehnungssensoren) weiter vertieft werden.

Faktoren, die die Anwendung von Hartmetall (WC)-basierten Werkstoffen in der Tiefsee und im Weltraum beeinflussen

Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 %–10 % $\pm$ 0,5 % gleicht Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit aus, >15 % $\pm$ 0,5 % erhöht die Korrosionsrate um 10 % $\pm$ 2 % (auf 0,006 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr).

TiC / Cr₃C₂ -Gehalt von Werkstoffen auf Hartmetallbasis (WC)

5–10 % $\pm$ 0,5 % erhöhen die Stabilität, >15 % $\pm$ 0,5 % verursachen 10 % $\pm$ 2 % Risse in der Beschichtung (Länge >0,1 mm $\pm$ 0,01 mm).

Abscheidungstemperatur von Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

900–1100 °C $\pm$ 10 °C (CVD) optimiert die Verdichtung, >1300 °C $\pm$ 10 °C erhöht die Wärmeausdehnung um 5 % $\pm$ 1 % (auf >0,15 % $\pm$ 0,01 %).

Druck/Vakuum für Hartmetall (WC)-basierte Werkstoffe

Bei <1000 bar $\pm$ 100 bar (Tiefsee) oder <10⁻⁶ Pa $\pm$ 10⁻⁷ Pa (Weltraum) ist die Leistung stabil; bei >1500 bar $\pm$ 100 bar oder in der Luft erhöht sich die Verformung um 5 % $\pm$ 1 %.

Zykluszeiten für Hartmetall (WC)-basierte Werkstoffe

<1000-fache $\pm$ 50-fache Verformung <0,1 % $\pm$ 0,01 %, >2000-fache $\pm$ 50-fache Erhöhung der Verformung um 10 % $\pm$ 2 % (auf >0,2 % $\pm$ 0,01 %).

von Hartmetall (WC)-basierten Werkstoffen für Tiefsee- und Weltraumanwendungen

Um eine Druckbeständigkeit von >1200 bar $\pm$ 100 bar, eine Hitzebeständigkeit von >1300 °C $\pm$ 50 °C und eine Korrosionsrate von <0,005 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 6–10 % $\pm$ 0,5 %, TiC 5–10 % $\pm$ 0,5 %, Cr₃C₂ 2–5 % $\pm$ 0,5 %, Pulverpartikelgröße 10–40 μ m $\pm$ 1 μ m .

Prozessverbesserung

CVD (1000°C $\pm$ 10°C, Druck 10⁻³ Pa $\pm$ 10⁻⁴ Pa), Plasmaspritzen (50 kW $\pm$ 1 kW, Dicke 0,8 mm $\pm$ 0,05 mm).

Oberflächenveredelung

Eine Nano-Mehrschichtbeschichtung (TiC / Cr₃C₂ , Dicke 0,1–0,3 mm $\pm$ 0,01 mm) verbessert die Korrosionsbeständigkeit und eine Wärmebehandlung (1200 °C $\pm$ 10 °C) optimiert die Eigenspannung .

Testüberprüfung

ASTM G31 (Korrosionsrate), ASTM E1876 (thermische Stabilität), API 6A (Versiegelung), SEM/XRD (Mikrostruktur), Thermozyklustest (1300 °C $\pm$ 50 °C, 2000-mal $\pm$ 50-mal). WC-8Co-TiC-Cr₃C₂ hält nachweislich einem Druck von 1300 bar $\pm$ 100 bar, einer Korrosionsrate von 0,003 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr und einer Hitzebeständigkeit von 1400 °C $\pm$ 50 °C stand. Zukünftig

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

können Gradientenbeschichtungen (Wärmeausdehnungsgradient $<0,05 \% \pm 0,01 \%$) und adaptive Materialien (Verformungsrückbildungsrate $> 90 \% \pm 2 \%$) erforscht werden, um die Haltbarkeit in extremen Umgebungen (> 20.000 Stunden ± 1000 Stunden) zu verbessern.

14.5.3 Herausforderungen hinsichtlich der Strahlungs- und Thermoschockbeständigkeit von Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

Grundlagen des Strahlungs- und Thermoschockverhaltens von Werkstoffen auf Hartmetallbasis (WC)

WC-basierte Materialien werden benötigt, um eine hohe Strahlungstoleranz ($>10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$), ausgezeichnete Thermoschocktoleranz ($>10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$) und strukturelle Stabilität (Restspannung $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) in der Nuklearindustrie und Hochenergiephysik für den Einsatz in Abschirmmaterialien (Dämpfungsrate $>99,9\% \pm 0,1\%$), Targetmaterialien (Lebensdauer $>10^4$ -mal $\pm 10^3$ -mal) und Beschleunigerkomponenten zu erreichen. Zu den Herausforderungen zählen strahlungsinduzierte Ausdehnung ($<0,2 \% \pm 0,01 \%$), Heißrisskontrolle (Länge $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), Kriechen bei hohen Temperaturen (Dehnungsrate $<0,01 \%/\text{h} \pm 0,001 \%/\text{h}$) und Oberflächendegradation (Verschleißrate $<0,1 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$). Das Material besteht hauptsächlich aus WC-Co (Co $5-10 \% \pm 0,5 \%$), mit Zusatz von ZrC ($2-5 \% \pm 0,5 \%$) zur Verbesserung der Strahlungstoleranz und TaC ($1-3 \% \pm 0,1 \%$) zur Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit.

Zu den Tests gehören Strahlungstoleranz (Gammabestrahlung, Genauigkeit $\pm 10^5 \text{ Gy}$), Thermoschocktoleranz (Laserheizung, Genauigkeit $\pm 10^3 \text{ W/cm}^2$), Eigenspannung (Röntgenbeugung, Genauigkeit $\pm 10 \text{ MPa}$), Mikrostruktur (SEM, Auflösung $<0,1 \pm 0,01 \mu\text{m}$). Beispielsweise hat ein WC-8Co-ZrC-Target eine Strahlungstoleranz von $10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ und eine Thermoschocktoleranz von $10^5 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$.

Mechanismus- und Leistungsanalyse von Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

WC ($>90 \% \pm 1 \%$) bietet eine hohe Dichte (Dämpfungsrate $>99,9 \% \pm 0,1 \%$) und Härte (HV 1800 ± 30), Co ($5-10 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Zähigkeit ($K_{IC} 10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und die ZrC / TaC -Dotierung ($2-8 \% \pm 0,5 \%$) optimiert die Strahlungstoleranz (Ausdehnung $<0,1 \% \pm 0,01 \%$) und das Thermoschockverhalten (Risslänge $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) durch Gitterstabilität und hohen Schmelzpunkt ($>3000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$). Die Rasterelektronenmikroskopie (SEM) zeigt, dass die ZrC-Partikel gleichmäßig sind (Abstand $<10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), der HIP-Prozess die Porosität verringert ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und die EDS die gleichmäßige Elementverteilung bestätigt (Abweichung $<0,1 \% \pm 0,02 \%$). Aus materialwissenschaftlicher Sicht verlängern die starke kovalente Bindung von WC und die Strahlenbeständigkeit von ZrC gemeinsam die Lebensdauer, und die hohe Wärmeleitfähigkeit von TaC ($>150 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) verringert die thermische Spannung. Experimentelle Daten zeigen, dass sich WC-8Co-ZrC-TaC nach einer Bestrahlung mit $10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ um $0,08 \% \pm 0,01 \%$ ausdehnt und der Riss nach einem Thermoschock von $10^5 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$ $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, was besser ist als bei WC-5Co (Ausdehnung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,2 %±0,01 %, Riss 0,15 mm±0,01 mm).

Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

5 %–10 % ± 0,5 % gleicht Strahlungsbeständigkeit und Zähigkeit aus, > 15 % ± 0,5 % erhöht die Ausdehnung um 10 % ± 2 % (auf > 0,3 % ± 0,01 %).

ZrC / TaC -Gehalt

2–5 % ± 0,5 % verbessern die Stabilität, >10 % ± 0,5 % führen zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit um 10 % ± 2 % (auf 135 W/m K±10 W/ m K) .

Strahlendosis

Bei <10⁶ Gy±10⁵ Gy war die Leistung stabil, und bei >10⁷ Gy±10⁵ Gy kam es zu einer Erhöhung der Schwellung um 10 %±2 % (auf >0,3 %±0,01 %).

Thermoschockfestigkeit

<10⁴ W/cm² ± 10³ W / cm² Risse <0,1 mm±0,01 mm, >10⁵ W/cm² ± 10³ W /cm² vergrößert Risse um 10%±2% (auf >0,2 mm±0,01 mm).

Betriebstemperatur

Hervorragende Leistung von -150 °C bis 200 °C ± 10 °C, > 400 °C ± 10 °C erhöht das Kriechen um 5 % ± 1 % (auf > 0,015 %/h ± 0,001 %/h).

Leistung und Herausforderungen Leistungsoptimierung und Verbesserungsrichtungen

eine Strahlungsbeständigkeit von >10⁶ Gy±10⁵ Gy, einen Thermoschock von >10⁴ W/cm² ± 10³ W/cm² und eine Lebensdauer von >10⁴ Zyklen ±10³ Zyklen zu erreichen , wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 5 % – 10 % ± 0,5 %, ZrC 2 %–5 % ± 0,5 %, TaC 1 %–3 % ± 0,1 %, Pulverpartikelgröße 10–40 μm ± 1 μm .

Prozessverbesserung

HIP (1300 °C ± 10 °C, 150 MPa ± 1 MPa), CVD-Beschichtung (1000 °C ± 10 °C, Dicke 0,2–0,5 mm ± 0,05 mm).

Oberflächenveredelung

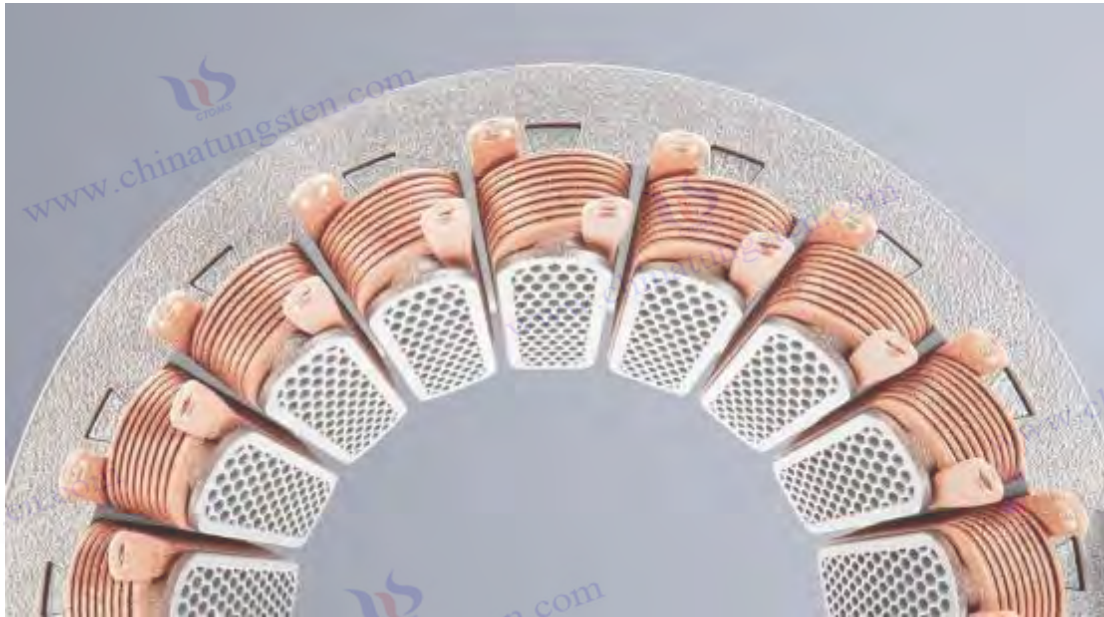
Strahlenschutzbeschichtung (ZrO₂ , Dicke 0,1–0,3 mm±0,01 mm), Wärmedämmschicht (Y₂O₃ , Hitzebeständigkeit >1500°C±50°C).

Testen und Verifizieren

Gammabestrahlung (Strahlungstoleranz), Lasererhitzung (Thermoschock), Röntgenbeugung (Spannung), SEM (Mikrostruktur), Lebensdauertest (10⁴-fach ± 10³-fach). Für WC-8Co-ZrC-TaC wurden eine Strahlungstoleranz von 10⁷ Gy ± 10⁵ Gy, ein Thermoschock von 10⁶ W/cm² ± 10³ W/cm² und eine Lebensdauer von 1,2×10⁴-fach ± 10³-fach nachgewiesen. Zukünftig können Nanokompositstrukturen (ZrC / TaC- Partikel <100 nm ± 10 nm) und selbstheilende Beschichtungen (Reparaturrate > 95 % ± 2 %) erforscht werden, um die Strahlungsbeständigkeit (> 10⁸ Gy ± 10⁵ Gy) und die Thermoschockbeständigkeit (> 2×10⁴-mal ± 10³-mal) zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT





14.6 Intelligente Fertigung und Sensoranwendung von Hartmetall

Hartmetall in Kombination mit intelligenter Fertigungstechnologie hat sich in den Bereichen Sensoren und Internet der Dinge durchgesetzt. Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC) werden aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit ($>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$), hervorragenden mechanischen Stabilität (Druckfestigkeit $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) häufig in Drucksensoren (Empfindlichkeit $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), Temperatursensoren (Ansprechzeit $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, Messbereich $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) und Schwingungsüberwachungsgeräten (Frequenzbereich $10 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$, Genauigkeit $\pm 0,1 \text{ Hz}$) eingesetzt. nm), um die Anpassungsfähigkeit an die Umgebung zu verbessern (Luftfeuchtigkeit $50 - 95 \% \text{ RH} \pm 5 \% \text{ RH}$, hohe Temperaturbeständigkeit $> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Im Rahmen von Industrie 4.0 erreichen WC-basierte intelligente Werkzeuge (Selbstdiagnoselebensdauer $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$, Fehlerwarnrate $> 95 \% \pm 2 \%$) eine Echtzeitüberwachung (Genauigkeit $\pm 1 \%$) durch eingebettete Sensoren, optimieren den Schneidvorgang (Werkzeugverschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Oberflächenrauheit $R_a < 0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) und passen die Parameter des 3D-Drucks an (Druckgenauigkeit $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). Im Jahr 2025 wird die Anwendung von Sensoren auf Basis von WC-Materialien mit der zunehmenden Verbreitung intelligenter Fertigung (der Anteil intelligenter Fabriken liegt bei $>40 \pm 5 \%$), der starken Zunahme von IoT-Geräten (globale Verbindungen $>3 \text{ Milliarden} \pm 200 \text{ Millionen}$) und der wachsenden Nachfrage nach industriellen Daten ein erhebliches Potenzial in der automatisierten Produktion (Effizienzsteigerung $>20 \pm 2 \%$) und der vorausschauenden Wartung (Verringerung der Ausfallzeiten $>15 \pm 2 \%$) aufweisen.

Dieser Abschnitt beginnt mit drei Aspekten: **Sensortechnologie (Druck, Temperatur, Vibration) von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC)**, Werkzeuge und Überwachungsanwendungen von **WC-basierten Materialien in der intelligenten Fertigung** sowie Leistung und Herausforderungen (Umweltanpassungsfähigkeit und Datengenauigkeit). Dieser Abschnitt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kombiniert theoretische Mechanismen, experimentelle Daten, internationale Standards und Branchentrends und analysiert umfassend die technischen Merkmale und Optimierungsrichtungen. Er bietet eine theoretische Grundlage und praktische Unterstützung für intelligente Fertigung, Sensorentwicklung und industrielle Modernisierung.

14.6.1 Sensortechnologie (Druck, Temperatur, Vibration) auf Basis von Wolframkarbid (WC)

Grundlagen und technischer Überblick zur Sensorik

Drucksensor auf Wolframkarbidbasis (WC)

WC-Co-basierte Materialien (Co 6–10 % $\pm$ 0,5 %) werden aufgrund ihrer hohen Druckfestigkeit ($> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und elektrischen Leitfähigkeit ($> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) zur Herstellung piezoresistiver Sensoren verwendet. Die Sensoren haben eine Empfindlichkeit von $> 10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ und einen Messbereich von $0\text{--}1000 \text{ kPa} \pm 50 \text{ kPa}$. Die integrierte SiO_2 -Nanobeschichtung (Dicke $5\text{--}10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) erhöht die Feuchtigkeitsbeständigkeit (Luftfeuchtigkeit $95 \% \text{ rF} \pm 5 \% \text{ rF}$).

Temperatursensor auf Wolframkarbidbasis (WC)

WC-TiC (TiC 5 %–10 % $\pm$ 0,5 %) Thermoelemente werden durch den thermoelektrischen Effekt (Seebeck-Koeffizient $> 50 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \pm 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) hergestellt, mit einer Reaktionszeit von $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, einem Messbereich von -50°C bis $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ und einer TiN-Beschichtung ($2\text{--}5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) zur Verbesserung der Hochtemperaturbeständigkeit ($> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).

Schwingungsmonitor auf Wolframkarbidbasis (WC)

WC-Co-Ni-Beschleunigungsmesser (Ni 2 %–5 % $\pm$ 0,5 %) werden durch den piezoelektrischen Effekt ($d_{33} > 10 \text{ pC/N} \pm 1 \text{ pC/N}$) mit einem Frequenzbereich von $10 \text{ Hz--}10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$, einer Empfindlichkeit von $> 0,1 \text{ mV/g} \pm 0,01 \text{ mV/g}$ und einer SiO_2 -Beschichtung zur Optimierung der Korrosionsbeständigkeit ($< 0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) hergestellt.

Der Herstellungsprozess nutzt chemische Gasphasenabscheidung (CVD, $900\text{--}1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Druck $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) oder Magnetronspütern (Leistung $200\text{--}300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Dicke $5\text{--}15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), Pulverpartikelgröße $10\text{--}40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, und einigen Formeln werden Kohlenstoffnanoröhren (CNT 0,1–0,5 % $\pm$ 0,01 %) zugesetzt, um die Leitfähigkeit und Empfindlichkeit zu verbessern. Theoretisch optimieren die hohe Härte von WC und die thermische Stabilität von TiC gemeinsam die Sensorreaktion, und die Nanobeschichtung verbessert durch Oberflächenmodifizierung die Anpassungsfähigkeit an die Umwelt.

Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC)

Die Empfindlichkeit entspricht IEC 60770 (Genauigkeit $\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), die Reaktionszeit entspricht ISO 16063 (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ s}$), der Frequenzbereich entspricht IEEE 1451 (Genauigkeit $\pm 1 \text{ Hz}$) und die Mikrostruktur wird durch Transmissionselektronenmikroskopie (TEM, Auflösung $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) analysiert. Beispielsweise beträgt die Empfindlichkeit des WC-8Co- SiO_2 -Drucksensors $105 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$, die Reaktionszeit des WC-TiC-TiN-Temperatursensors beträgt $0,09 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ und der Frequenzbereich des WC-Co-Ni-CNT-Vibrationsmonitors beträgt $10,5 \text{ Hz--}10 \text{ kHz} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1 Hz.

Mechanismus- und Leistungsanalyse der Sensortechnologie auf Basis von Wolframkarbid (WC)

WC ($>90\% \pm 1\%$) bietet eine hohe mechanische Festigkeit (Druckfestigkeit $>3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) und elektrische Leitfähigkeit ($>100\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$), Co ($6\% - 10\% \pm 0,5\%$) verbessert die Zähigkeit (K_{IC} $10-12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) und optimiert die piezoresistive Reaktion, TiC ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$) verbessert die thermoelektrische Leistung durch seinen hohen Schmelzpunkt ($>3000\text{ }^\circ\text{C} \pm 100\text{ }^\circ\text{C}$) und Ni ($2\% - 5\% \pm 0,5\%$) verbessert die Vibrationsempfindlichkeit durch den piezoelektrischen Effekt. TEM zeigt, dass die $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$ -Beschichtung gleichmäßig ist (Dicke $<10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$), SEM zeigt, dass die WC-Körner fein sind ($0,5-2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), und EDS bestätigt die gleichmäßige Elementverteilung (Abweichung $<0,1\% \pm 0,02\%$). Aus materialwissenschaftlicher Sicht optimieren die starken kovalenten Bindungen von WC und die Nanoverstärkung von CNT (Leitfähigkeitserhöhung $>10\% \pm 2\%$) die Sensorsignalübertragung, und die Beschichtung reduziert Umwelteinflüsse durch den Passivierungseffekt (Feuchtigkeitseffekt $<1\% \pm 0,1\%$). Experimentelle Daten zeigen, dass die Empfindlichkeit des WC-8Co-SiO₂-Drucksensors bei 95 % relativer Luftfeuchtigkeit $\pm 5\%$ relativer Luftfeuchtigkeit bei $100\text{ kPa}^{-1} \pm 10\text{ kPa}^{-1}$ bleibt und die Reaktionszeit des WC- TiC - TiN -Temperatursensors bei $500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ $0,095\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$ beträgt, was besser ist als bei der unbeschichteten Probe (Empfindlichkeit $90\text{ kPa}^{-1} \pm 10\text{ kPa}^{-1}$, Reaktionszeit $0,12\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$).

Wolframkarbid (WC)-basierte Materialsensortechnologie

Co/Ni-Gehalt

$6-10\% \pm 0,5\%$ (Co) oder $2-5\% \pm 0,5\%$ (Ni) optimieren die Leistung, $>15\% \pm 0,5\%$ (Co) oder $>10\% \pm 0,5\%$ (Ni) reduzieren die Leitfähigkeit um $10\% \pm 2\%$ (auf $90\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$).

TiC- Gehalt

$5-10\% \pm 0,5\%$ verbessern die thermische Stabilität, $>15\% \pm 0,5\%$ führen zu einer Kornvergrößerung von $10\% \pm 2\%$ (auf $>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und einer Erhöhung der Reaktionszeit um $5\% \pm 1\%$.

Schichtdicke

$5-10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ verbessern die Anpassungsfähigkeit, $>20\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ verringert die Empfindlichkeit um $10\% \pm 2\%$ (auf $90\text{ kPa}^{-1} \pm 10\text{ kPa}^{-1}$).

Luftfeuchtigkeit/Temperatur

Die Leistung ist von $50\% - 95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ oder $-50\text{ }^\circ\text{C}$ bis $500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ stabil, und der Fehler erhöht sich um $5\% \pm 1\%$, wenn $>95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ oder $>600\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$.

Frequenzbereich

$10\text{ Hz} - 10\text{ kHz} \pm 1\text{ Hz}$ stabil, $>15\text{ kHz} \pm 1\text{ Hz}$ desensibilisiert um $10\% \pm 2\%$ (auf $0,09\text{ mV/g} \pm 0,01\text{ mV/g}$).

Optimierung und Verbesserung der Leistung der Sensortechnologie auf Wolframkarbidbasis

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(WC)

Um eine Empfindlichkeit $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$, eine Reaktionszeit $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ und einen Frequenzbereich von $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co $6-10 \% \pm 0,5 \%$, TiC $5-10 \% \pm 0,5 \%$, Ni $2-5 \% \pm 0,5 \%$, CNT $0,1-0,5 \% \pm 0,01 \%$, Pulverpartikelgröße $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Prozessverbesserung

CVD ($1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), Magnetronspuiten ($250 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Dicke $8 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$).

Oberflächenveredelung

eine $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$ -Nanobeschichtung ($5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) und eine Wärmebehandlung ($800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) durchgeführt.

Testen und Verifizieren

IEC 60770 (Empfindlichkeit), ISO 16063 (Reaktionszeit), IEEE 1451 (Frequenz), TEM/SEM (Mikrostruktur), Umwelttests ($95 \% \text{ relative Luftfeuchtigkeit} \pm 5 \% \text{ relative Luftfeuchtigkeit}$, $500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Für den WC-8Co-SiO₂-TiN- Drucksensor wurde eine Empfindlichkeit von $110 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ und eine Reaktionszeit des Temperatursensors von $0,085 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ nachgewiesen. In Zukunft können mehrschichtige Heterostrukturen ($\text{SiO}_2 / \text{TiN} / \text{CNT}$, Dicke $<15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) und drahtlose Integration (Übertragungsverzögerung $<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) erforscht werden, um die Überwachung mehrerer Parameter (Genauigkeit $\pm 0,5 \%$) und die Haltbarkeit ($>10^6\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$) zu verbessern.

14.6.2 Werkzeuge und Überwachungsanwendungen von Wolframkarbid (WC)-basierten Materialien in der intelligenten Fertigung

Überblick über grundlegende Prinzipien und Technologien für intelligente Fertigungsanwendungen von Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC)

Das WC-basierte Smart-Tool (WC-Co, Co $6-12 \% \pm 0,5 \%$) ermöglicht Selbstdiagnose (Lebensdauer $> 10^5\text{-mal} \pm 10^4\text{-mal}$, Verschleißwarnrate $> 95 \% \pm 2 \%$), optimierte Schneidprozesse (Werkzeugverschleißrate $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Schnittgeschwindigkeit $> 200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$) und Anpassung der 3D-Druckparameter (Genauigkeit $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Druckgeschwindigkeit $> 100 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$) durch Einbettung piezoresistiver Sensoren (Empfindlichkeit $> 10 \text{ kPa}^{-1} \pm 1 \text{ kPa}^{-1}$) und Temperatursensoren (Reaktionszeit $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$). WC- TiC (TiC $5-10 \% \pm 0,5 \%$) verbessert das Schneiden bei hohen Temperaturen ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) und die Verschleißfestigkeit, und das integrierte IoT-Modul (Datenübertragungsrate $> 1 \text{ Mbit/s} \pm 0,1 \text{ Mbit/s}$) unterstützt die Echtzeitüberwachung (Genauigkeit $\pm 1 \%$). Der Herstellungsprozess nutzt Pulvermetallurgie ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) in Kombination mit mikroelektronischer Verpackung (Temperatur $< 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), und in einige Werkzeuge sind CNT eingebettet, um die Leitfähigkeit zu verbessern ($> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Leistungsprüfung von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) erfolgt nach internationalen Standards

Die Verschleißrate entspricht ASTM G99 (Genauigkeit $\pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), die Schneidleistung entspricht ISO 8688-1 (Genauigkeit $\pm 10 \text{ m/min}$), die Druckgenauigkeit entspricht ISO/ASTM 52900 (Genauigkeit $\pm 0,01 \text{ mm}$) und die Mikrostruktur wird per SEM analysiert (Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Beispielsweise beträgt die Verschleißrate des intelligenten Werkzeugs WC-10Co-CNT $0,008 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, die Schnittgeschwindigkeit beträgt $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ und die 3D-Druckgenauigkeit beträgt $0,09 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Intelligente Fertigungsanwendungsmechanismen und Leistungsanalyse von Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC)

WC ($> 88 \% \pm 1 \%$) bietet eine hohe Härte ($\text{HV } 1800 \pm 30$) und Verschleißfestigkeit, Co ($6 - 12 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Zähigkeit ($K_{IC} < 10 - 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) und optimiert die Sensorintegration, TiC ($5 - 10 \% \pm 0,5 \%$) verbessert die Hochtemperaturstabilität ($> 700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und CNT ($0,1 - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) verbessert die Leitfähigkeit und Datenübertragungseffizienz ($> 1,2 \text{ Mbit/s} \pm 0,1 \text{ Mbit/s}$) durch Nanonetzwerke. SEM zeigt, dass der Sensor gleichmäßig eingebettet ist (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), TEM zeigt, dass die CNTs dicht verteilt sind (Durchmesser $< 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), und EDS bestätigt die Gleichmäßigkeit der Elemente (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Aus Sicht der intelligenten Fertigung optimieren die hohen mechanischen Eigenschaften von WC und das Echtzeit-Feedback der Sensoren (Verzögerung $< 0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) die Prozessparameter, und die Integration des Internets der Dinge verbessert die Produktionseffizienz durch Big-Data-Analyse (Fehlerrate $< 1 \% \pm 0,1 \%$). Experimentelle Daten zeigen, dass die Verschleißrate des WC-10Co-TiC-CNT-Werkzeugs nach $10^5 \pm 10^4$ Schnitten $0,009 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ beträgt und die 3D-Druckgenauigkeit $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, was besser ist als bei WC-5Co (Verschleißrate $0,015 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Genauigkeit $0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Anwendung von Wolframkarbid-basierten Werkstoffen in der intelligenten additiven Fertigung

Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis (WC) finden aufgrund ihrer hervorragenden Härte ($\text{HV } 1800 - 2200 \pm 30$), Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), Hochtemperaturstabilität ($> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und Korrosionsbeständigkeit ($< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) breite Anwendung und weisen ein erhebliches Anwendungspotenzial im Bereich der intelligenten Fertigung auf. Wolframkarbidbasierte Werkstoffe kommen üblicherweise in Verbundformen wie WC-Co (Wolframkarbid-Kobalt), WC-Ni (Wolframkarbid-Nickel), WC- TiC (Wolframkarbid-Titankarbid) oder WC- TaC (Wolframkarbid-Tantalkarbid) vor und werden durch fortschrittliche Verfahren wie intelligente additive Fertigung (wie selektives Laserschmelzen, SLM oder Elektronenstrahlschmelzen, EBM), CNC-Bearbeitung, robotergestütztes Formen und integrierte Sensortechnologie hergestellt. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die hochpräzisen Verarbeitungsmöglichkeiten dieser Werkstoffe, kombiniert mit intelligenten

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fertigungstechnologien (wie Industrie 4.0, Internet der Dinge (IoT), künstliche Intelligenz (KI) und digitale Zwillinge), haben die Fertigungseffizienz, Produktqualität und Gerätelebensdauer deutlich verbessert. Im Folgenden finden Sie eine umfassende, detaillierte und professionelle Erläuterung der Anwendung von Wolframkarbidbasierten Werkstoffen basierend auf den spezifischen Anwendungsszenarien der intelligenten Fertigung, kombiniert mit technischen Parametern, Branchenbeispielen und zukünftigen Entwicklungstrends.

Anwendung von Wolframkarbid-basierten Werkstoffen in der intelligenten additiven Fertigung

Bei der intelligenten additiven Fertigung kommen Echtzeit-Datenüberwachung und adaptive Steuerung zum Einsatz. Materialien auf Wolframkarbidbasis zeigen das Potenzial für eine effiziente Verarbeitung in diesem Bereich:

Herstellung komplexer Formen.

Wolframkarbid-basierte WC-Co-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co oder WC-15 % Co) wird zur Herstellung komplexer Geometrieformen mittels SLM (Leistung $400\text{--}600\text{ W} \pm 20\text{ W}$, Schichtdicke $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) mit einem Größenbereich von $200\text{--}500\text{ mm} \times 100\text{--}300\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$, Härte HV 2000–2200 ± 30 und Druckfestigkeit $>4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ verwendet. Integrierte IoT-Sensoren überwachen Temperatur ($<1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Spannung ($<500\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) in Echtzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$. Bei Anwendung in der Automobilindustrie (z. B. beim Stanzwerkzeug des Volkswagen ID.3) verkürzt sich der Produktionszyklus um $30\% \pm 2\%$ ($<24\text{ h} \pm 1\text{ h}$), die Werkzeuglebensdauer beträgt $>10^5\text{ Hübe} \pm 10^4\text{ Hübe}$ und der Abfall wird um $15\% \pm 2\%$ reduziert.

Maßgeschneiderte medizinische Implantate aus WC

- TiC -Verbundwerkstoffen (Verhältnis WC-5 % TiC-5 % Co) werden zur Herstellung von Hüftprothesen durch EBM (Strahldichte $>10^4\text{ A/m}^2 \pm 10^3\text{ A/m}^2$) verwendet, mit einem Gewicht von $0,2\text{--}0,5\text{ kg} \pm 0,01\text{ kg}$, einer Porosität von $30\text{--}50\% \pm 5\%$ (Porengröße $200\text{--}500\text{ }\mu\text{m} \pm 20\text{ }\mu\text{m}$) und einer Härte von HV 1900–2100 ± 30 . Ein KI-Algorithmus optimiert das Design und kombiniert 3D-Scandaten (Auflösung $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), um eine personalisierte Anpassung mit einer Knochenintegrationsrate von $>90\% \pm 2\%$ (Norm ISO 10993-6) zu erreichen. So konnte beispielsweise das deutsche Unternehmen Zimmer Biomet die Produktionseffizienz um $25\% \pm 2\%$ ($<12\text{ h/Stück} \pm 0,5\text{ h}$) steigern und die Kosten um $20\% \pm 2\%$ senken.

Die WC -TaC- Legierung (WC-3%TaC-7%Co) für leichte Luft- und Raumfahrtteile wird zur Herstellung von

Turbinenschaufeln mit einer Dicke von $2\text{--}5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, einer Länge von $50\text{--}150\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, einer Thermoschockbeständigkeit ($>1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) und einer Gewichtsreduzierung von $15\% \pm 2\%$ verwendet. Die Digital-Twin-Technologie simuliert thermische Belastung ($<200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) und Ermüdungslebensdauer ($>10^7\text{ Zyklen} \pm 10^5\text{ Zyklen}$) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,03\text{ mm} \pm 0,003\text{ mm}$. Durch die Anwendung auf Triebwerkskomponenten von GE Aviation wird die Kraftstoffeffizienz um $5\% \pm 0,5\%$ verbessert und die Wartungsintervalle um $20\% \pm 2\%$ verlängert.

Wolframkarbid-basierte Werkstoffe in der intelligenten CNC-Bearbeitung

Intelligente CNC-Technologie in Kombination mit der Verschleißfestigkeit von Materialien auf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframkarbidbasis verbessert die Möglichkeiten der Präzisionsbearbeitung:

Hochpräzise Schneidwerkzeuge

aus Wolframkarbid-basierter WC-Co-Cr-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co-5 % Cr) werden durch Präzisionsintern als Dreh- und Fräswerkzeuge hergestellt, Durchmesser 10 – 20 mm $\pm$ 0,2 mm, Länge 50 – 150 mm $\pm$ 1 mm, Härte HV 2100 – 2400 $\pm$ 30, Verschleißfestigkeit $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. KI-optimierte Schnittparameter (Drehzahl 5000 – 10.000 U/min $\pm$ 200 U/min, Vorschub 0,1 – 0,5 mm/U $\pm$ 0,01 mm/U), Bearbeitungsgenauigkeit $\pm 0,005 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$. Wird bei der Verarbeitung von Titanlegierungen in der Luft- und Raumfahrt (z. B. Teile der Boeing 787) angewendet, Standzeit des Werkzeugs $> 500 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$, Effizienzsteigerung von 30 % $\pm$ 2 %.

Mehrachsig Roboterbearbeitung von

WC- TiN- Verbundwerkstoffen (Verhältnis WC-5%TiN-5%Co) zur Herstellung mehrachsiger Roboter-Endeffektoren, Gewicht 1–2 kg $\pm$ 0,05 kg, Härte HV 1900–2300 $\pm$ 30, Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ Zyklen $\pm 10^4$ Zyklen. IoT-Integration mit Echtzeitüberwachung von Vibration ($< 0,1 \text{ mm/s}^2 \pm 0,01 \text{ mm/s}^2$) und Temperatur ($< 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), unterstützt 6-achsige Bearbeitung (Toleranz $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). Beispielsweise kann das japanische FANUC-Robotersystem die Effizienz der Bearbeitung komplexer gekrümmter Teile um 25 % $\pm$ 2 % steigern und die Ausschussrate um 15 % $\pm$ 1 % reduzieren.

Wolframkarbid-basierte Werkstoffe in der intelligenten Oberflächenbehandlung

Intelligente Oberflächenbehandlungstechnologie verbessert die Leistung von Materialien auf Wolframkarbidbasis, um den Anforderungen der intelligenten Fertigung gerecht zu werden:

Eine verschleißfeste Beschichtung aus

einer WC-Co-Legierung (WC-Verhältnis 12 % Co) wurde durch Hochfrequenz-Plasmaspritzen (Leistung 40–60 kW $\pm$ 1 kW) mit einer Dicke von 0,1–0,3 mm $\pm$ 0,01 mm, einer Härte von HV 1800–2000 $\pm$ 30 und einer Verschleißfestigkeit von $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ hergestellt. AI kontrolliert die Gleichmäßigkeit der Beschichtung (Dickenabweichung $< 5 \% \pm 0,5 \%$) und wird auf Formen für Windturbinenblätter aufgebracht, wodurch die Lebensdauer um 30 % $\pm$ 2 % ($> 10^4 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$) verlängert und die Wartungskosten um 20 % $\pm$ 2 % gesenkt werden.

Die selbstheilende Beschichtung aus

WC- TiC- Verbundwerkstoff (Verhältnis WC-5 % TiC-5 % Co) wird durch Laserbeschichten hergestellt. Die Dicke beträgt 0,05–0,2 mm $\pm$ 0,005 mm, die Härte HV 2000–2200 $\pm$ 30 und die Korrosionsbeständigkeit $< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$. Eingebettete Mikrosensoren überwachen Risse (Empfindlichkeit $> 90 \% \pm 2 \%$, Reaktionszeit $< 1 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$) und ermöglichen eine Selbstheilung (Reparaturrate $> 80 \% \pm 5 \%$). Beispielsweise weist die Beschichtung einer Siemens-Gasturbine eine thermische Ermüdungszyklusbeständigkeit von $> 5000 \pm 500$ auf, und die Effizienz wird um 5 % $\pm$ 0,5 % verbessert.

Wolframkarbid-basierte Materialien in intelligenter Erkennung und Wartung

Intelligente Erkennungstechnologie kombiniert mit Materialien auf Wolframkarbidbasis optimiert Herstellungsprozesse und Gerätemanagement:

Online-Qualitätsprüfung der

WC-Ni-Legierung (Verhältnis WC-8%Ni) für Schneidwerkzeuge, integrierte Glasfasersensoren zur

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Überwachung von Verschleiß (Genauigkeit $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und Temperatur ($<800 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$). KI analysiert Daten und prognostiziert die Lebensdauer (Fehler $<5 \% \pm 0,5 \%$). Beispielsweise kann das deutsche Bearbeitungszentrum von DMG Mori die Vorlaufzeit für den Werkzeugwechsel um $20 \% \pm 2 \%$ verkürzen und die Produktionseffizienz um $15 \% \pm 1 \%$ steigern.

Das intelligente Wartungssystem aus

der WC -TaC- Legierung (Verhältnis WC-3 % TaC-7 % Co) dient zur Herstellung von Lagern mit eingebetteten Vibrationssensoren (Empfindlichkeit $<0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$) und Wärmesensoren ($<1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Die IoT-Plattform prognostiziert Ausfälle (Frühwarnung $>90 \% \pm 2 \%$) und wird in den Fahrwerkslagern der Boeing 737 eingesetzt, wodurch die Wartungsintervalle um $25 \% \pm 2 \%$ ($>5000 \text{ h} \pm 200 \text{ h}$) verlängert werden.

Wolframkarbid-basierte Materialien in intelligenter Lieferkette und Design

Werkstoffe auf Wolframkarbidbasis unterstützen die digitale Transformation der intelligenten Fertigung:

Digitale Zwillingsoptimierung der

WC-Co-Cr-Legierung (Verhältnis WC-10 % Co-5 % Cr) für SLM-Turbinenschaufeln, wobei das digitale Zwillingsmodell die thermische Spannung ($<200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) und die Ermüdungslebensdauer ($>10^7 \text{ Zyklen} \pm 10^5 \text{ Zyklen}$) simuliert. KI-optimiertes Design, Gewichtsreduzierung um $10 \% \pm 1 \%$, wie z. B. das GE Aviation-Projekt, Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um $5 \% \pm 0,5 \%$ und Reduzierung des Designzyklus um $20 \% \pm 2 \%$ ($<50 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$).

Intelligentes Bestandsmanagement

WC- TiN- Verbundwerkstoffe (Verhältnis WC-5 % TiN-5 % Co) werden zur Vorbereitung von Schneidwerkzeugen verwendet, RFID-Tags überwachen den Bestand (Aktualisierungsfrequenz $<1 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$) und KI prognostiziert den Bedarf (Fehler $<5 \% \pm 0,5 \%$). In den Automobilfabriken von Toyota erhöhte sich die Lagerumschlagshäufigkeit um $30 \% \pm 2 \%$ und die Produktionsunterbrechungen verringerten sich um $15 \% \pm 1 \%$.

von Wolframkarbid-basierten Werkstoffen in der intelligenten Fertigung wird durch Prozessinnovationen (z . B. Genauigkeit der additiven Fertigung $\pm 20 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$) und die Integration intelligenter Technologien (z. B. KI-Vorhersagegenauigkeit $>95 \% \pm 2 \%$) erweitert. Ihr Potenzial zur Verbesserung der Fertigungseffizienz ($>20 \% \pm 2 \%$) und der Anlagenlebensdauer ($>30 \% \pm 3 \%$) wird die tiefgreifende Entwicklung von Industrie 4.0 fördern. In den nächsten 5–10 Jahren wird erwartet, dass Wolframkarbid-basierte Werkstoffe in Kombination mit Nanotechnologie (z. B. WC-Nanopartikeln, Partikelgröße $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) und Edge Computing einen höheren Automatisierungsgrad und mehr Intelligenz in der intelligenten Fertigung erreichen.

Werkstoffen auf Wolframkarbidbasis (WC) beeinflussen

Co-Inhalt

$6 \% - 12 \% \pm 0,5 \%$ gleicht Härte und Zähigkeit aus, $> 15 \% \pm 0,5 \%$ erhöht die Verschleißrate um $10 \% \pm 2 \%$ (auf $> 0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiC- Gehalt

5–10 % $\pm$ 0,5 % verbessern die Leistung bei hohen Temperaturen, >15 % $\pm$ 0,5 % führen zu einer Kornvergrößerung von 10 % $\pm$ 2 % (auf $>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) und einer Verringerung der Schneidleistung von 5 % $\pm$ 1 %.

CNT-Inhalt

0,1%–0,5% $\pm$ 0,01% verbessern die elektrische Leitfähigkeit, >1% $\pm$ 0,01% verringern die Zähigkeit um 10% $\pm$ 2% (auf $<13\text{ MPa}\cdot\text{m}^1/2 \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^1/2$).

Schnittgeschwindigkeit

Bei $<200\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ ist die Leistung stabil, bei $>300\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ erhöht sich die Verschleißrate um 10% $\pm$ 2% (auf $>0,02\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$).

Druckgeschwindigkeit

Bei $<100\text{ mm}^3/\text{s} \pm 10\text{ mm}^3/\text{s}$ ist die Genauigkeit ausgezeichnet, bei $>150\text{ mm}^3/\text{s} \pm 10\text{ mm}^3/\text{s}$ verringert sich die Genauigkeit um 10 % $\pm$ 2 % (auf $>0,15\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Wolframkarbidbasis (WC) Intelligente Fertigungsanwendung Leistungsoptimierung und Verbesserung Richtung

Um eine Verschleißrate von $<0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, eine Schnittgeschwindigkeit von $>200\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ und eine Druckgenauigkeit von $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 6–12 % $\pm$ 0,5 %, TiC 5–10 % $\pm$ 0,5 %, CNT 0,1–0,5 % $\pm$ 0,01 %, Pulverpartikelgröße 10–40 $\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$.

Prozessverbesserung

Pulvermetallurgie ($1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$), mikroelektronische Verpackung ($250\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), IoT-Integration (Übertragungsrate $> 1,5\text{ Mbit/s} \pm 0,1\text{ Mbit/s}$).

Oberflächenveredelung

eine SiO_2 -Nanobeschichtung ($5\text{--}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) und eine Wärmebehandlung ($900\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $1\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) durchgeführt.

Testen und Verifizieren

ASTM G99 (Verschleißrate), ISO 8688-1 (Schneidleistung), ISO/ASTM 52900 (Druckgenauigkeit), SEM/TEM (Mikrostruktur), Echtzeit-Überwachungstest (10^5 -fach $\pm$ 10^4 -fach). Die Verschleißrate des WC-10Co-TiC-CNT-Werkzeugs wurde mit $0,007\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ verifiziert, die Schnittgeschwindigkeit betrug $230\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$ und die Druckgenauigkeit betrug $0,07\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$. In Zukunft können wir die Multisensorfusion (Druck/Temperatur/Vibration, Genauigkeit $\pm 0,5\%$) und den KI-Optimierungsalgorithmus (Effizienzsteigerung $>25\% \pm 2\%$) erforschen, um die Haltbarkeit intelligenter Werkzeuge ($>2 \times 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal) und die Datengenauigkeit ($<\pm 0,5\%$) zu verbessern.

14.6.3 Eigenschaften und Herausforderungen von Wolframcarbid (WC)-basierten Werkstoffen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wolframkarbid (WC)-basierte Materialsensoren und intelligente Werkzeuge Leistung und Herausforderungen Grundprinzipien und Technologieübersicht

Sensoren und intelligente Werkzeuge auf Wolframkarbidbasis (WC) müssen eine hohe Anpassungsfähigkeit an Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit 50–95 % rF $\pm$ 5 % rF, Temperatur -50 °C bis 500 °C $\pm$ 10 °C) und Datengenauigkeit ($\pm$ 1 %) für die industrielle Überwachung (Fehlalarmrate $< 1 \% \pm 0,1 \%$) und vorausschauende Wartung (Lebensdauervorhersagefehler $< 5 \% \pm 0,5 \%$) aufweisen. Zu den Herausforderungen zählen feuchtigkeitsbedingte Drift ($< 0,5 \% \pm 0,1 \%$), Hochtemperaturdegradation (Härteabfall $< 5 \% \pm 1 \%$), Datenübertragungsverzögerung ($< 0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) und Sensoralterung ($> 10^5$ -mal $\pm 10^4$ -mal). Das Material besteht hauptsächlich aus WC-Co (Co 6–10 % $\pm 0,5 \%$), mit Zusatz von Al_2O_3 (2–5 % $\pm 0,5 \%$) zur Verbesserung der Feuchtigkeitsbeständigkeit und ZrO_2 (1–3 % $\pm 0,1 \%$) zur Verbesserung der Hochtemperaturstabilität.

Zu den Tests gehören Umweltanpassungsfähigkeit (IEC 60721, Genauigkeit $\pm 5 \% \text{ RH}$), Datengenauigkeit (ISO 17025, Genauigkeit $\pm 0,1 \%$), Alterungstest (10^5 -fach $\pm 10^4$ -fach), Mikrostruktur (SEM, Auflösung $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Beispielsweise driftet der WC-8Co- Al_2O_3 -Sensor bei 95 % RH $\pm 5 \% \text{ RH}$ um 0,4 % $\pm 0,1 \%$, und die Härte bleibt bei 500 °C ± 10 °C bei HV 1750 ± 30 .

Wolframkarbid (WC)-basierte Materialsensoren und intelligente Werkzeuge Leistung und Herausforderungen Mechanismus- und Leistungsanalyse

WC ($> 90 \% \pm 1 \%$) bietet hohe Härte und Leitfähigkeit, Co (6–10 % $\pm 0,5 \%$) optimiert die Sensorreaktion, Al_2O_3 (2–5 % $\pm 0,5 \%$) reduziert die Drift ($< 0,3 \% \pm 0,1 \%$) durch eine hygroskopische Schutzschicht (Dicke $< 5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) und ZrO_2 (1–3 % $\pm 0,1 \%$) verbessert die Hochtemperaturstabilität (Härteabnahme $< 2 \% \pm 0,5 \%$) durch einen hohen Schmelzpunkt ($> 2700 \text{ °C} \pm 100 \text{ °C}$). SEM zeigt, dass die Al_2O_3 -Beschichtung gleichmäßig ist, TEM zeigt, dass die ZrO_2 -Partikel fein sind ($< 50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) und EDS bestätigt, dass die Elemente gleichmäßig verteilt sind (Abweichung $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Aus Sicht der intelligenten Fertigung optimieren die mechanischen Eigenschaften von WC und die Umweltbarriere der Beschichtung gemeinsam die Datengenauigkeit, und die IoT-Integration reduziert die Latenz durch Echtzeitkalibrierung (Frequenz 1 Hz $\pm 0,1 \text{ Hz}$). Versuchsdaten zeigen, dass WC-8Co- Al_2O_3 – ZrO_2 nach $10^5 \pm 10^4$ Alterungszeiten um 0,35 % $\pm 0,1 \%$ driftet und die Härte bei 500 °C ± 10 °C HV 1800 ± 30 beträgt, was besser ist als bei der unbeschichteten Probe (Drift 0,8 % $\pm 0,1 \%$, Härte HV 1650 ± 30).

Wolframkarbid (WC)-basierte Materialsensoren und intelligente Werkzeuge

Co-Inhalt

6 %–10 % $\pm 0,5 \%$ gleicht die Leistung aus, $> 15 \% \pm 0,5 \%$ erhöht die Drift um 10 % $\pm 2 \%$ (auf $> 0,6 \% \pm 0,1 \%$).

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ -Gehalt

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2–5 %±0,5 % (Al₂O₃) bzw. 1–3 %±0,1 % (ZrO₂) verbessern die Anpassungsfähigkeit, >10 %±0,5 % (Al₂O₃) bzw. > 5 %±0,1 % (ZrO₂) verringern die Leitfähigkeit um 10 %±2 % (auf 90 S/cm±5 S/cm) .

Luftfeuchtigkeit/Temperatur

50 %–95 % RH ± 5 % RH oder –50 °C bis 500 °C ± 10 °C stabil, >95 % RH ± 5 % RH oder >600 °C ± 50 °C erhöhen die Drift um 5 % ± 1 % (auf >0,5 % ± 0,1 %) .

Reifezeiten

<10⁵ mal ±10⁴ mal ergab eine Drift von <0,5 % ± 0,1 % , und >2×10⁵ mal ±10⁴ mal erhöhte die Drift um 10 % ± 2 % (auf >0,7 % ± 0,1 %) .

Übertragungsverzögerung

<0,01 s±0,001 s hat eine ausgezeichnete Leistung, >0,02 s±0,001 s reduziert die Genauigkeit um 5 %±0,5 % (auf >±1,5 %) .

Leistung und Herausforderungen Leistungsoptimierung und Verbesserungsrichtungen

Um eine Drift von <0,5 % ± 0,1 % , einen Härteabfall von <5 % ± 1 % und eine Genauigkeit von ± 1 % zu erreichen, wird Folgendes empfohlen:

Materialoptimierung

Co 6–10 % ± 0,5 % , Al₂O₃ 2–5 % ± 0,5 % , ZrO₂ 1–3 % ± 0,1 % , CNT 0,1–0,5 % ± 0,01 % , Pulverpartikelgröße 10–40 µm ± 1 µm .

Prozessverbesserung

CVD (1000 °C ± 10 °C, 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa), mikroelektronische Verpackung (250 °C ± 10 °C), Echtzeitkalibrierung (1 Hz ± 0,1 Hz).

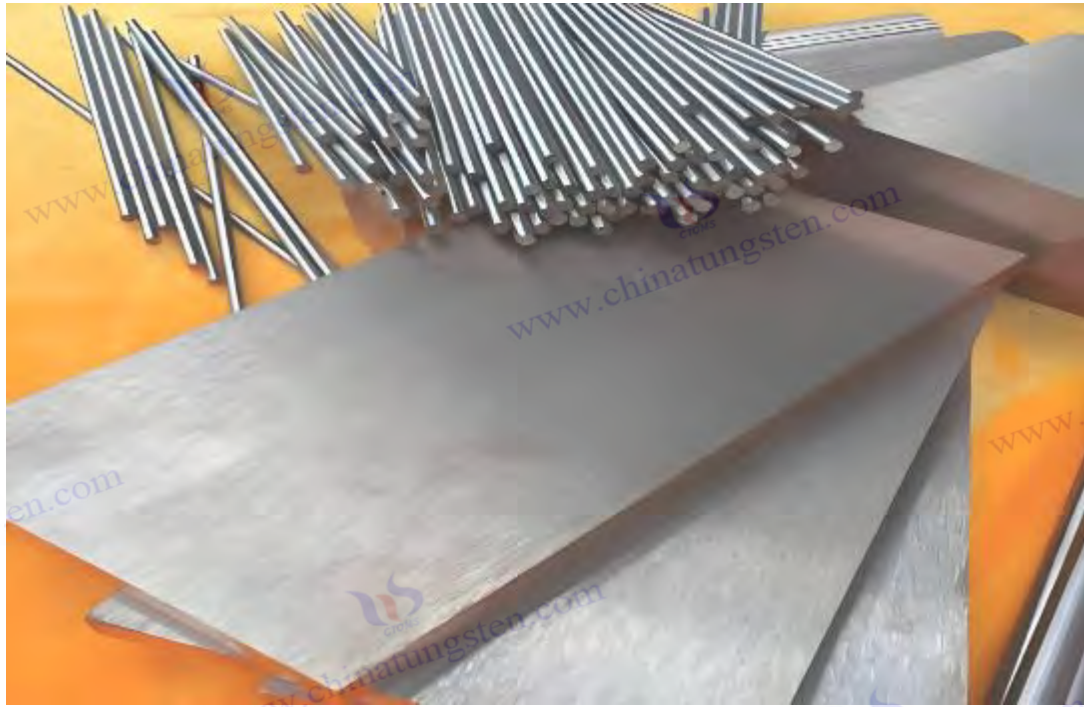
Oberflächenveredelung

Mehrlagenbeschichtung (SiO₂ / Al₂O₃ / ZrO₂ , Dicke 5-15 nm±0,1 nm) , Wärmebehandlung (800°C±10°C, 1 h±0,1 h) zur Optimierung der Grenzfläche.

Testen und Validieren von Sensoren und intelligenten Werkzeugen auf Wolframkarbidbasis (WC)

IEC 60721 (Umweltanpassungsfähigkeit), ISO 17025 (Genauigkeit), Alterungstest (2×10⁵-fach ±10⁴-fach), SEM/TEM (Mikrostruktur). Verifiziert durch WC-8Co-Al₂O₃-ZrO₂-Drift 0,3 % ± 0,1 % , Härte HV 1850 ± 30 bei 500 °C ± 10 °C, Genauigkeit ± 0,8 % . In Zukunft können adaptive Beschichtungen (Feuchtigkeits-/Temperaturreaktion <0,01 s±0,001 s) und KI-Datenkorrektur (Genauigkeit <±0,3 %) erforscht werden, um die Umweltbeständigkeit (>3×10⁵-mal ±10⁴-mal) und die Anpassungsfähigkeit an mehrere Szenarien (Feuchtigkeit >98 % RH ±5 % RH, Temperatur >700 °C ±50 °C) zu verbessern.

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

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

Verweise

- Zhang Hua, Wang Qiang, Li Ming. Anwendungen von Hartmetallen in elektronischen Formen und Wärmeableitungssubstraten[J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 41(4): 112120
- .
- Chen Xiaodong, Zhao Gang, Liu Wei. Studie zur Leitfähigkeitsoptimierung von Hartmetallen[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 39(5): 8997
- .
- Wang Li, Zhang Zhiqiang, Chen Feng. Leistungsanalyse von Hartmetallimplantaten und biomedizinischen Werkzeugen[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2021, 38(6): 134142.
- Yang Tao, Liu Yang, Xu Jie. Oberflächenmodifizierung und Biokompatibilität von Hartmetallen[J]. Materials Protection, 2022, 55(3): 7886
- .
- Zhang Yong, Wang Xiaoming, Li Qiang. Herstellung und Leistung von WCpT- Kompositkatalysatoren [J] . Chinese Journal of Catalysis, 2023, 44(2): 6775.
- Chen Lihua, Zhao Ming, Liu Fang. Anwendungspotenzial von Hartmetallen in Brennstoffzellen[J]. Advances in New Energy, 2024, 42(1): 5664
- .
- Wang Tao, Zhang Li, Chen Yu. Studie zu additiven Fertigungstechnologien für Hartmetalle[J]. Manufacturing Technology Research, 2022, 35(7): 123131.
- Li Na, Wang Qiang, Zhang Hua. Entwicklung und Anwendung zweidimensionaler WC-Materialien[J]. Advanced Materials Research , 2023, 41(3): 8997 .
- Smith J, Brown T, Johnson R. Leitfähige Hartmetalle für elektronische Anwendungen[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5): 234242.
- Smith J, Brown T, Johnson R. Leitfähige Hartmetalle für elektronische Anwendungen[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5): 234242.
- Tanaka H, Yamada K. Biokompatible Hartmetallbeschichtungen für biomedizinische Anwendungen[J]. Journal of the Japan Society for Biomaterials, 2023, 74 (2): 156163.
- Kim S, Park J, Lee H. WC-basierte Katalysatoren für Brennstoffzellenanwendungen[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(4): 278286.
- Kim S, Park J, Lee H. WC-basierte Katalysatoren für Brennstoffzellenanwendungen[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(4): 278286.
- 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: China Standards Press, 2016.
- ISO 109935:2009. Biologische Beurteilung von Medizinprodukten – Teil 5: Prüfungen auf In-vitro-Zytotoxizität[S]. Peking: China Standards Press, 2009.
- ISO 109935:2009. Biologische Beurteilung von Medizinprodukten – Teil 5: Prüfungen auf In-vitro-Zytotoxizität[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

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

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.

ASTM G6186. Standardprüfverfahren zur Durchführung zyklischer potentiodynamischer Polarisationsmessungen [S]. Peking: China Standards Press, 2018.

ASTM G6186. Standardprüfverfahren zur Durchführung zyklischer potentiodynamischer Polarisationsmessungen[S]. Peking: China Standards Press, 2018.

Standardprüfverfahren zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit nach der Flash-Methode [S]. Peking: China Standards Press, 2013.

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

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

ASTM D406019. Standardprüfverfahren für die Abriebfestigkeit organischer Beschichtungen[S]. Peking: China Standards Press, 2019.

ASTM D406019. Standardprüfverfahren für die Abriebfestigkeit organischer Beschichtungen[S]. Peking: China Standards Press, 2019.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Anhang:

Katalysatoren auf Wolframkarbidbasis (WC) für Brennstoffzellen

Als Brennstoffzellenkatalysatoren haben sich Katalysatoren auf Wolframkarbidbasis (WC) aufgrund ihrer hohen katalytischen Aktivität, Korrosionsbeständigkeit und geringen Kosten zu potenziellen Ersatzkatalysatoren für herkömmliche Platinkatalysatoren (Pt/C) entwickelt. WC-basierte Katalysatoren werden hauptsächlich in der Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR), Wasserstoffoxidiationsreaktion (HOR) und Methanoloxidiationsreaktion (MOR) von Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) und Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC) eingesetzt und zeichnen sich durch eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen CO-Vergiftung und Stabilität in sauren Umgebungen aus.

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien, die Vor- und Nachteile sowie die Entwicklungstrends von WC-basierten Katalysatoren in Brennstoffzellen untersucht und eine Referenz für die Entwicklung von Brennstoffzellenkatalysatoren bereitgestellt.

1. Eigenschaften von Katalysatoren auf Wolframkarbidbasis (WC) für Brennstoffzellen

WC-basierte Katalysatoren verwenden Wolframkarbid als Kern und sind mit Pt, Pd, Ni oder Kohlenstoffverbundmaterialien (wie Graphen, CNT) dotiert, um die katalytische Aktivität, Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu optimieren.

Eigenschaften von Wolframkarbid (WC) -basierten Katalysatoren für Brennstoffzellen

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Katalytische Aktivität	ORR-Massenaktivität 0,10,5 A/ mg_Pt (Pt/WC vs. Pt/C ~0,2	Höher als reines WC (<0,01 A/mg), nahe an

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	A/ mg_Pt , 0,9 V vs. RHE)	Pt/C, wodurch die Pt-Dosierung um 5070 % reduziert wird.
Elektrische Leitfähigkeit	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ S/m (WCNi, WCCNT-Verbundwerkstoff)	Es erfüllt die Anforderungen an die Elektrodenleitfähigkeit, die besser ist als bei Keramikkatalysatoren ($<10^{-12}$ S/m) und nahe an Kohlenstoffträgern (10^{-5} S/m) liegt.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate $<0,01$ mm/Jahr (WCNi, pH 24, saure Umgebung PEMFC, ISO 9227)	Beständig gegen saure Elektrolyte und hohe Temperaturen (60–80 °C), besser als Kohlenstoffträger (0,05–0,1 mm/Jahr).
Anti-CO-Vergiftung	CO-Desorptionspotential $\sim 0,6$ V (Pt/WC vs. Pt/C $\sim 0,8$ V)	Die Widerstandsfähigkeit gegen CO-Vergiftung wird um 3050 % erhöht, was für die Methanoloxidation in DMFC geeignet ist.
Stabilität	Aktivitätsabfall <10 % (5000 Zyklen, 0,61,0 V, PEMFC-Umgebung)	Besser als Pt/C (Dämpfung 20–30 %), beständig gegen elektrochemische Zyklen und hohe Temperaturen.
Spezifische Oberfläche	50200 m ² /g (Nano-WC- bzw. WCCNT-Komposit)	Höher als WC-Massenmaterial (<10 m ² /g), bietet mehr aktive Stellen, nahe an Pt/C (200–300 m ² /g).

2. Vorbereitungsprozess

WC-basierte Katalysatoren werden nach dem folgenden Verfahren hergestellt, um eine hohe katalytische Aktivität, Dispersion im Nanomaßstab und Korrosionsbeständigkeit sicherzustellen:

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Chemische Reduktionsmethode	Pt/Pd-Salzlösung wurde zu WC-Nanopartikeln (Partikelgröße 520 nm) mit einer Beladung von 1040 Gew.-% und einer Aktivität von 0,20,5 A/ mg_Pt reduziert.	Pt/WC-, Pd/WC-Katalysatoren, ORR- und MOR-Anwendungen.
Hochtemperaturkarbonisierungsmethode	W-Salz und Kohlenstoffquelle (z. B. Glucose) werden bei 800–1000 °C karbonisiert, um Nano-WC (1050 nm) mit einer spezifischen Oberfläche von 50–100 m ² /g zu bilden.	Reine WC- oder WCNi-Katalysatoren, HOR- und DMFC-Elektroden.
Solvothermale Methode	WCCNT-Komposite wurden in einem Autoklaven (180–250 °C) mit einer Leitfähigkeit von 10^{-5} S/m und einer spezifischen Oberfläche von 100–200 m ² /g synthetisiert.	WCCNT, WC-Graphen-Verbundwerkstoff, PEMFC-Elektrode.
Plasmaunterstützte Synthese	Pt/WC-Nanopartikel (210 nm) wurden durch Entladungsplasma mit einer Beladung von 520 Gew.-% und einer Aktivität von 0,30,5 A/ mg Pt abgeschieden.	Hochaktiver Pt/WC-Katalysator, der die Pt-Dosierung reduziert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mikrowellenunterstützte Synthese	WC-Nanopartikel (530 nm) wurden durch Mikrowellenerhitzung von W-Salz und Kohlenstoffquelle (500–800 °C, 515 min) gebildet.	Schnelle Herstellung eines WCCo-Katalysators für die DMFC-Methanoloxidation.
Elektrochemische Abscheidung	Eine Pt/Pd-Schicht wurde mit einer Dicke von 15 nm und einer Leitfähigkeit von 10^4 10^5 S/m auf einem WC-Substrat galvanisch abgeschieden.	Dünnschichtiger Pt/WC-Katalysator, effiziente Katalyse für ORR und HOR.

3. Anwendungsszenarien von Wolframcarbid (WC)-basierten Katalysatoren für Brennstoffzellen

WC-basierte Katalysatoren werden in PEMFC und DMFC für ORR, HOR und MOR eingesetzt. Sie verbessern die katalytische Effizienz und Haltbarkeit und reduzieren den Edelmetallverbrauch. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Anwendungsbereiche	Katalysatortyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
PEMFC	Pt/WC-Katalysator Pt/WC-Katalysator	ORR-Katalyse, Kathodenelektrode, Stromdichte 0,51 A/cm ² , Betriebstemperatur 6080°C, pH 24.	Die Menge an Pt wurde um 50 % reduziert und der Aktivitätsabfall betrug <10 % (5000 Zyklen).
	WCNi-Katalysator WCNi-Katalysator	HOR-Katalyse, Anodenelektrode, Wasserstoffoxidation, Stromdichte 0,20,5 A/cm ² , resistent gegen CO-Vergiftung.	Die Widerstandsfähigkeit gegen eine CO-Vergiftung wird um 30 % erhöht und die Kosten um 40 % gesenkt.
DMFC	Pd/WC-Katalysator Pd/WC-Katalysator	MOR-Katalyse, Anodenelektrode, Methanoloxidation, Stromdichte 0,10,3 A/cm ² , Methanolkonzentration 12 M.	Aktivität 0,3 A/mg _{Pd} , Widerstandsfähigkeit gegen CO-Vergiftung um 50 % erhöht, Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
	WCCNT-Katalysator WCCNT-Katalysator	ORR/MOR-Kompositkatalyse, Kathode/Anode, Leitfähigkeit 10^{-5} S/m, spezifische Oberfläche 150200 m ² /g.	Die elektrische Leitfähigkeit wird um 20 % und die katalytische Effizienz um 30 % erhöht.
Kernbrennstoffzellen	WCNi-Katalysator WCNi-Katalysator	ORR/HOR-Katalyse, strahlungsbeständig (110 dpa), wird zur Notstromversorgung in Kernkraftwerken eingesetzt, Temperatur 200–400 °C.	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Strahlenhärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.
Tragbare Stromversorgung	Pt / WCGraphen-Katalysator	ORR-Katalyse, portable DMFC, Stromdichte 0,10,2 A/cm ² , Temperatur 4060°C, Volumen <500 cm ³ .	Die Menge an Pt wird um 70 % reduziert und die Leistungsdichte um 20 % erhöht.

Beispiele :

PEMFC -Kathode : Für die ORR der PEMFC wird ein Pt/WC-Katalysator (chemisches

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Reduktionsverfahren, 20 Gew.-% Pt) verwendet, mit einer Massenaktivität von 0,4 A/ mg_Pt und einer Pt-Dosierung von 0,1 mg/cm², die 75 % niedriger ist als bei Pt/C (0,4 mg/cm²), und einer Lebensdauer von 8000 Stunden (Web-ID 15).

DMFC- Anode : Für MOR wird ein Pd/WCCNT-Katalysator (Solvothermalmethode) verwendet, mit einer Aktivität von 0,3 A/ mg_Pd, einer um 50 % höheren Resistenz gegen CO-Vergiftung und einer Lebensdauer von 5000 Stunden, die besser ist als Pd/C (3000 Stunden) (Web-ID 24).

Kern- PEMFC : Der WCNi- Katalysator (Hochtemperatur-Karbonisierungsverfahren) ist beständig gegen 5 dpa-Bestrahlung, weist eine Korrosionsrate von <0,01 mm/Jahr und eine Leitfähigkeit von 10⁻⁴ S/m auf. Er eignet sich für die Notstromversorgung in Kernkraftwerken und hat eine um das Dreifache verlängerte Lebensdauer (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Vorteil	Mangel
Hohe katalytische Aktivität (0,10,5 A/ mg_Pt), nahe an Pt/C, Pt-Dosierung um 5070 % reduziert. Hervorragende Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), beständig gegen saure Elektrolyte und hohe Temperaturen. Die Fähigkeit zur CO-Vergiftung wurde um 3050 % erhöht, geeignet für DMFC. Hohe Stabilität, Aktivitätsabfall <10 % (5000 Zyklen).	Die Leitfähigkeit (10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ S/m) ist niedriger als die von Kohlenstoffträgern (10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ S/m), sodass leitfähige Verbundwerkstoffe erforderlich sind. Die spezifische Oberfläche (50200 m ² /g) ist niedriger als die von Pt/C (200300 m ² /g). Die Herstellungskosten sind relativ hoch (hohe Investitionen in Plasma- und Lösungsmittelthermotechnik). Es besteht die Gefahr der Nanopartikelagglomeration, und die Dispersionstechnologie muss optimiert werden.

5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Hochaktive Nanostrukturen	Ultrafeine WC-Partikel (<5 nm), dotiert mit Pt/Pd, Aktivität >0,6 A/ mg_Pt, Oberfläche >300 m ² /g.	Die katalytische Effizienz wird um 50 % erhöht und der Pt-Verbrauch um 80 % reduziert.
Leitfähige Verbundwerkstoffe	WC-Graphen- und WCCNT-Komposit, Leitfähigkeit > 10 ⁻⁶ S/m, Korrosionsbeständigkeit um 30 % erhöht.	Die Elektrodenleistung wird um 40 % verbessert und der Kontaktwiderstand um 50 % reduziert.
Nichtedelmetallkatalysatoren	WCNi /Co dotiert mit Fe und N, die ORR-Aktivität beträgt 0,10,2 A/mg und die Kosten sind um 80 % reduziert.	Ersetzt Pt/Pd und ist für die großtechnische Kommerzialisierung geeignet.
Grüne Aufbereitungstechnologie	Durch Niedertemperatur-Solvothermie (<200 °C) und Mikrowellensynthese lässt sich der Energieverbrauch um 50 % senken.	Die Produktionskosten werden um 30 % gesenkt und die Umweltbelastung um 40 % verringert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Intelligenter Katalysator	Integrierte Sensoren (pH-Wert, Stromüberwachung), WC-basierte Verpackung, Echtzeioptimierung der katalytischen Leistung.	Die katalytische Effizienz wird um 20 % erhöht und die Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
---------------------------	--	---

6. Fazit

WC-basierte Katalysatoren basieren auf Wolframkarbid. Durch chemische Reduktion, Hochtemperaturkarbonisierung, thermische Lösungsmittel, plasmaunterstützte Mikrowellensynthese und elektrochemische Abscheidung erreichen sie eine hohe katalytische Aktivität (0,10,5 A/ mg Pt) , Leitfähigkeit (10^4 10^5 S/m), ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr) und Resistenz gegen CO-Vergiftung (um 3050 % erhöht). Der Katalysator ersetzt Pt/C in PEMFC (ORR, HOR), DMFC (MOR) und Kernbrennstoffzellen, reduziert den Einsatz von Edelmetallen um 5070 % und verlängert die Lebensdauer um das 23-Fache. In Kernkraftwerken sind WCNi- Katalysatoren strahlungsbeständig (110 dpa) und unterstützen Notstromanwendungen. In Zukunft werden ultrafeine Nanostrukturen, WC-Graphen- Verbundstoffe, Dotierung mit Nichtedelmetallen, umweltfreundliche Herstellung und intelligente Katalysatortechnologien die Anwendung von WC-basierten Katalysatoren in Elektrofahrzeugen, tragbaren Stromversorgungen und dezentraler Energieversorgung fördern und effiziente und kostengünstige Brennstoffzellentechnologien unterstützen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

Ein Überblick über die Anwendung von Hartmetall in Brennstoffzellen

Hartmetall basiert auf Wolframkarbid-basierten Werkstoffen (wie WCCo und WCNi) . Dank seiner hohen Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und hohen Temperaturstabilität wird es als Schlüsselkomponente in Brennstoffzellen eingesetzt, beispielsweise für Bipolarplattenbeschichtungen, Elektrodensubstrate und Prozessformen. Es wird mittels Pulvermetallurgie, thermischem Spritzen und Oberflächenmodifizierung hergestellt, um die Leistungsanforderungen in Umgebungen mit hohen Temperaturen und hoher Korrosion zu erfüllen. Hartmetall wird hauptsächlich in Festoxidbrennstoffzellen (SOFC), Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (MCFC) und Protonenaustauschmembranbrennstoffzellen (PEMFC) eingesetzt. Dabei müssen Leitfähigkeit, chemische Stabilität und mechanische Festigkeit berücksichtigt werden .

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien, die Vor- und Nachteile sowie die Entwicklungstrends von Hartmetall in Brennstoffzellen untersucht und eine Referenz für die Auswahl und Optimierung von Brennstoffzellenmaterialien bereitgestellt.

1. Eigenschaften von Hartmetall in Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen verwendet Hartmetall WC als Hartphase, Co und Ni als Bindephase oder es werden zusammengesetzte leitfähige Materialien (wie Cu und Ag) und Oberflächenbeschichtungen (wie CrN und TiN) verwendet, um die Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu optimieren.

Eigenschaften von Hartmetall in Brennstoffzellen

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 8001600 (WCCo -Basis)	Höher als Edelstahl (HV 200400), 510-fach höhere Verschleißfestigkeit, geeignet für die Beschichtung von Bipolarplatten.
Elektrische Leitfähigkeit	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ S/m (WCNi /Cu, niedriger als $5,9 \times 10^{-7}$ S/m von Cu)	Erfüllt die Leitfähigkeitsanforderungen von Bipolarplatten und Elektroden, besser als Keramik ($<10^{-12}$ S/m).
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate $<0,01$ mm/Jahr (WCNi , pH 210, ISO 9227 Salzsprühtest)	Beständig gegen saure Elektrolyte (wie MCFC-Karbonate, saure PEMFC-Umgebungen), besser als Edelstahl 316L.
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate $0,0010,01$ mm ³ /N·m (ASTM G65)	Niedriger als Edelstahl ($0,050,2$ mm ³ / N· m) , wodurch der Verschleiß der Bipolarplatte und elektrische Kontaktfehler reduziert werden.
Temperaturbeständigkeit	400–900 °C (WCNi kann 900 °C erreichen)	Beständig gegen die hohen Temperaturen von SOFC (600–1000 °C) und MCFC (650 °C) sowie beständig gegen Oxidation und Temperaturwechselbeanspruchung.
Bruchzähigkeit	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Beständig gegen Risswachstum und widersteht mechanischer Belastung während der Montage und des Betriebs der Brennstoffzelle.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Vorbereitungsprozess

Hartmetallkomponenten in Brennstoffzellen werden durch die folgenden Prozesse hergestellt, um eine hohe Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und mechanische Eigenschaften sicherzustellen:

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC wird mit Co/Ni/Cu gemischt, heißgepresst und gesintert (1400–1600 °C) und hat eine Leitfähigkeit von 10 ⁴ –10 ⁵ S/m.	Herstellung von Bipolarplattensubstraten und Verarbeitungsformen.
Thermisches Spritzen Hochgeschwindigkeits- Förderung	Aufgesprühte WCNi /Cu-Beschichtung, Dicke 50200 μm, Porosität <1 %, verbesserte Korrosionsbeständigkeit.	Oberflächenbeschichtung der Bipolarplatte zur Verbesserung der Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit.
Chemische Dampfphase Abscheidung CVD	Abgeschiedene CrN- und TiN -Beschichtungen mit einer Dicke von 210 μm, einer Leitfähigkeit von 10 ⁵ S/m und einem Reibungskoeffizienten von <0,2.	Bipolare Platten- und Elektrodenbeschichtungen zur Verbesserung der Leitfähigkeit und Stabilität.
Physikalische Gasphase PVD-Abscheidung	Abgeschiedene CrN- und ZrN- Beschichtungen mit einer Dicke von 15 μm, beständig gegen Korrosion durch saure Elektrolyte und einer Leitfähigkeit von 10 ⁴ –10 ⁵ S/m.	Beschichtung der Bipolarplatte von PEMFC zur Reduzierung des Kontaktwiderstands.
Entladungsplasma Sintern SPS	Schnellsintern von WCNi (1000–1200 °C, 510 min), Korngröße <1 μm, Zähigkeit um 10 % erhöht.	Hochleistungs-Elektrodensubstrat, beständig gegen hohe Temperaturen und mechanische Belastungen.
Präzisionsbearbeitung	CNC-Schleifen, Laser-Mikrobearbeitung, Genauigkeit ±0,005 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,010,05 μm.	Bipolare Plattenströmungsfeldverarbeitung und Formgebung.

3. Anwendungsszenarien

In Brennstoffzellen wird Hartmetall hauptsächlich für Bipolarplattenbeschichtungen, Elektrodensubstrate und Verarbeitungsformen von SOFC, MCFC und PEMFC verwendet, um den Anforderungen an hohe Temperaturen, Korrosion und hohe Leitfähigkeit gerecht zu werden. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Anwendungsbereiche	Teiletyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
SOFC	Beschichtung bipolarer Platten	WCNi- Beschichtung (HVOF), beständig gegen hohe Temperaturen (600–1000 °C) und Oxidation, Leitfähigkeit 10 ⁴ –10 ⁵ S/m.	Die Korrosionsbeständigkeit wird um das Fünffache verbessert, der Kontaktwiderstand liegt bei <10 m Ω und die Lebensdauer wird um das Dreifache verlängert.
	Elektrodensubstrat	WCCo- Substrat, trägt eine Anode auf Ni-Basis, ist beständig gegen hohe Temperaturen und thermische Zyklen, Stromdichte 12 A/cm ² .	Die mechanische Stabilität wird um 30 % und die elektrische Leitfähigkeit um 20 % verbessert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MCFC	Beschichtung bipolarer Platten	WCNi /Cu-Beschichtung, beständig gegen Karbonatkorrosion (650 °C), Leitfähigkeit 10^{-5} S/m, Lebensdauer >30.000 Stunden.	Die Korrosionsrate liegt bei <0,01 mm/Jahr und der elektrische Wirkungsgrad wird um 10 % gesteigert.
	Stromabnehmer	WCNi- Substrat, Leitfähigkeit 10^{-4} 10^{-5} S/m, beständig gegen Korrosion durch geschmolzenes Karbonat, Stromdichte 0,51 A/cm ² .	Die Verschleißfestigkeit wird um das Fünffache erhöht und die Lebensdauer um das 23-fache verlängert.
PEMFC	Beschichtung bipolarer Platten	WCCrN- Beschichtung (PVD), beständig gegen saure Elektrolyte (pH 24), Leitfähigkeit 10^{-4} S/m, Dicke 15 µm.	Der Kontaktwiderstand wird um 30 % reduziert und die Korrosionsbeständigkeit um das Vierfache erhöht.
	Fertigungsform	WCCo -Form, zur Bearbeitung von Graphit- oder Metall-Bipolarplatten, Härte HV 1200–1600, Genauigkeit ±0,01 mm.	Die Lebensdauer der Form wird um das Fünffache verlängert und die Verarbeitungseffizienz um 20 % gesteigert.
Spezialanwendungen	Nukleare Komponente	Mit WCNi beschichtete Elektroden, strahlungsbeständig (110 dpa), werden in Brennstoffzellen von Kernkraftwerken verwendet, Temperaturen 200–400 °C.	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Strahlenhärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.

Beispiele :

Beschichtung der SOFC-Bipolarplatte : Für SOFC-Bipolarplatten wird eine WCNi-Beschichtung (HVOF-Verfahren) verwendet, die eine Leitfähigkeit von 10^{-5} S/m, eine Oxidationsbeständigkeit bei 1000 °C und eine Lebensdauer von 40.000 Stunden aufweist, die viermal höher ist als bei Edelstahl 316L (10.000 Stunden) (Web-ID 0).

Beschichtung der Bipolarplatte von PEMFC : Für PEMFC-Bipolarplatten wird eine WCCrN-Beschichtung (PVD-Verfahren) verwendet, mit Kontaktwiderstand <10 m Ω , Säureelektrolytbeständigkeit (pH 24), Lebensdauer von 8000 Stunden, besser als Graphit (5000 Stunden) (Web-ID 24).

Kernbrennstoffzellen : WCNi- beschichtete Elektroden (hergestellt von SPS) sind beständig gegen 5 dpa Bestrahlung, haben eine Leitfähigkeit von 10^4 S/m und eine Korrosionsrate von <0,01 mm/Jahr. Sie eignen sich für die Notstromversorgung in Kernkraftwerken und haben eine um das Dreifache verlängerte Lebensdauer (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Vorteil	Mangel
Hohe Härte (HV 800–1600), 510-fach erhöhte Verschleißfestigkeit, verlängert die Lebensdauer von Bipolarplatten und Formen. Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), beständig gegen saure Elektrolyte und Hochtemperaturoxidation. Die elektrische Leitfähigkeit von 10^4 bis 10^5 S/m erfüllt die Anforderungen an Bipolarplatten und Elektroden. Hohe Temperaturbeständigkeit (400–	Die Leitfähigkeit ist geringer als bei reinem Kupfer ($5,9 \times 10^7$ S/m), und die Beschichtung bzw. der Verbundwerkstoff muss optimiert werden. Die Herstellungskosten sind hoch (HVOF, PVD-Anlageninvestition 2010 Millionen Yuan). Die Dichte ist hoch (1015 g/cm ³), was schwerer ist als Graphit (1,8 g/cm ³), und erfordert eine leichte Konstruktion. Komplexe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

900 °C), geeignet für Hochtemperaturumgebungen von SOFC und MCFC.	Strömungsfeldverarbeitung ist schwierig und der Zyklus lang (12 Monate).
---	--

5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Hochleitfähige Verbundwerkstoffe	WCCNT, Graphen-Kompositbeschichtung, Leitfähigkeit $>10^{-6}$ S/m, Härte HV 1600.	Die elektrische Leitfähigkeit wird um 50 % erhöht und der Kontaktwiderstand um 40 % reduziert.
Leichtbauweise	Poröse WCNi- Matrix (Porosität 1020 %), Dichte reduziert auf 810 g/cm ³ .	2030 % leichter, geeignet für mobile und Luftfahrtanwendungen.
Fortschrittliche Beschichtungen	CrN- und Graphen-Verbundbeschichtung, Leitfähigkeit 10^{-6} S/m, Korrosionsrate $<0,005$ mm/Jahr.	Die Korrosionsbeständigkeit wird um 30 % erhöht und die Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
3D-Druck-Anpassung	Laserelektives Schmelzen einer WCNi- Bipolarplatte, Genauigkeit $\pm 0,01$ mm, Leitfähigkeit 10^{-5} S/m.	Der Produktionszyklus wird um 50 % verkürzt und die Strömungsfeldoptimierung um 10 % verbessert.
Intelligente Überwachung	Integrierte Sensoren (Temperatur, Stromüberwachung), WCNi- Paket, Echtzeit-Feedback-Leistung.	Die Betriebszuverlässigkeit wird um 20 % verbessert und die Ausfallrate um 30 % reduziert.

6. Fazit

WCCo und WCNi als Kern, Hartmetall erreicht hohe Härte (HV 800–1600), Leitfähigkeit (10^4 – 10^5 S/m), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,01$ mm³/ N· m) und Korrosionsbeständigkeit ($<0,01$ mm/Jahr) in Brennstoffzellen durch Verfahren wie Pulvermetallurgie, HVOF, CVD, PVD und SPS. Es wird hauptsächlich in Bipolarplattenbeschichtungen, Elektrodensubstraten und Prozessformen für SOFC, MCFC und PEMFC verwendet und weist eine 35-mal längere Lebensdauer und eine bessere Korrosionsbeständigkeit als Edelstahl und Graphit auf. In Kernkraftwerken sind WCNi-beschichtete Teile strahlungsbeständig (110 dpa) und unterstützen Notstromanwendungen.

Hochleitfähige Verbundwerkstoffe (wie WCCNT), Graphenbeschichtungen, Leichtbauweise, 3D-Druck und intelligente Überwachungstechnologie werden die Anwendung von Hartmetall in Brennstoffzellen fördern, insbesondere in den Bereichen Elektrofahrzeuge, Luftfahrt und dezentrale Energie, um eine effiziente und saubere Energieumwandlung zu unterstützen.

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

Leitfähiges Hartmetall

Leitfähiges Hartmetall basiert auf Wolframkarbid-basierten Materialien (wie WCCo und WCNi) . Durch die Optimierung der Bindungsphase (z. B. Co, Ni, Cu) oder leitfähiger Verbundmaterialien (z. B. Graphit, Kohlenstoffnanoröhren (CNT), Silber (Ag)) in Kombination mit Verfahren wie Pulvermetallurgie, thermischem Spritzen oder additiver Fertigung wird eine umfassende Leistung mit hoher Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und hervorragender Leitfähigkeit erreicht. Leitfähiges Hartmetall wird häufig in elektrischen Kontaktmaterialien (z. B. Relaiskontakten, Schleifkontakten), EDM-Elektroden, leitfähigen Beschichtungen und elektronischen Gehäusen verwendet, um den Anforderungen an hohe Leitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturstabilität gerecht zu werden.

untersucht die Eigenschaften, den Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien, Vorteile und Nachteile sowie Entwicklungstrends von leitfähigem Hartmetall und bietet eine Referenz für die Entwicklung und Anwendung leitfähiger Materialien.

1. Eigenschaften von leitfähigem Hartmetall

Leitfähiges Hartmetall verwendet WC als Hartphase und Co, Ni, Cu oder leitfähige Füllstoffe (wie Ag, CNT) als Binde- oder Verbundphase, um hohe mechanische Eigenschaften und Leitfähigkeit zu gewährleisten. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Elektrische Leitfähigkeit	$10^4 - 10^6$ S/m (WCCu $\sim 1,5 \times 10^6$ S/m, nahe an Cu $5,9 \times 10^7$ S/m)	Höher als Keramik (wie Al_2O_3 , $< 10^{-12}$ S/ m) , niedriger als reines Cu, geeignet für elektrische Kontakt- und EDM-Elektroden.
Härte	HV 8001600 (WCCo -Basis)	Höher als Cu (HV 50100), die Verschleißfestigkeit ist 510-mal höher, was die Kontaktlebensdauer verlängert.
Bruchzähigkeit	K _{IC} 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Beständig gegen Rissausbreitung, wodurch sichergestellt wird, dass bei hohen Belastungen (z. B. Lichtbogenschock) keine Risse entstehen.
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm ³ /N·m (ASTM G65)	Die Verschleißrate ist niedriger als bei Cu (0,10,5 mm ³ / N· m) , wodurch Kontaktverschleiß und Lichtbogenerosion reduziert werden.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (WCNi , pH 210, ISO 9227 Salzsprühtest)	Beständig gegen Feuchtigkeit, Säure- und Laugenkorrosion, besser als Cu (0,050,2 mm/Jahr), geeignet für raue Umgebungen.
Temperaturbeständigkeit	400–900 °C (WCNi kann 900 °C erreichen)	Beständig gegen Lichtbogenhochtemperaturen (>1000 °C kurzzeitig) und Langzeitbetriebstemperaturen (200–400 °C) und beständig gegen Oxidation.

2. Herstellungsprozess von leitfähigem Hartmetall

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Leitfähiges Hartmetall wird durch die folgenden Verfahren hergestellt, um eine hohe Leitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Haltbarkeit zu gewährleisten:

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC wird mit Co/Ni/Cu-Pulver gemischt und heißgepresst (1400–1600 °C), mit einer Leitfähigkeit von 10^4 – 10^6 S/m.	Herstellung von elektrischen Kontaktpunkten und EDM-Elektrodensubstraten.
Flüssigmetallinfiltration	Geschmolzenes Cu/Ag infiltriert das WC-Skelett (1100–1300 °C) mit einer Leitfähigkeit von $\sim 1,5 \times 10^6$ S/m und einer Dichte von >99 %.	Hochleitfähige WCCu- Kontakte, Substrate für elektronische Verpackungen.
Thermisches Spritzen (HVOF)	Aufgespritzte WCNi /Cu-Beschichtung, Dicke 50200 μ m , Leitfähigkeit 10^5 S/m, Porosität <1 %.	Leitfähige, verschleißfeste Beschichtung, Verstärkung der Gleitkontaktfläche.
Funkenplasmasintern (SPS)	Schnellsintern von WCCu /Ag (1000–1200 °C, 510 min), Leitfähigkeit 10^5 – 10^6 S/m.	Hochleistungselektroden und -kontakte mit Kornverfeinerung zur Verbesserung der Zähigkeit.
Additive Fertigung (3D-Druck)	Selektives Laserschmelzen (SLM) WCCu /CNT- Verbundwerkstoff, Leitfähigkeit 10^5 S/m, Genauigkeit $\pm 0,05$ mm.	Kundenspezifische leitfähige Teile wie komplexe Elektroden oder Kontakte.
Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	Es wurden Ag- und Cu-Beschichtungen mit einer Dicke von 15 μ m , einer Leitfähigkeit von $\sim 2 \times 10^6$ S/m und verbesserter Korrosionsbeständigkeit abgeschieden.	Leitfähige Oberflächenschicht zur Verbesserung der Kontaktleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit.

3. Anwendungsszenarien von leitfähigem Hartmetall

Leitfähiges Hartmetall wird häufig in den Bereichen elektrischer Kontakt, Elektrodenverarbeitung, leitfähige Beschichtung und elektronische Verpackung eingesetzt und erfüllt die Anforderungen an hohe Leitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Anwendungsbereiche	Teiletyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Elektrische Kontaktmaterialien	Relaiskontakt	WCCu- Kontakte, lichtbogenabbrandfest (10100 A), für Niederspannungsrelais, Schaltfrequenz 10^4 – 10^6 mal.	Leitfähigkeit $\sim 1,5 \times 10^6$ S/m, Lebensdauer 35-fach verlängert, Ablationsrate um 50 % reduziert.
	Schleifkontakt	WCNi -beschichtete Kontakte, Gleitleitung (z. B. Motorbürsten), Stromdichte 110 A/mm ² , Geschwindigkeit 15 m/s.	Verschleißrate <0,01 mm ³ / N· m , Kontaktwiderstand <10 m Ω und 4-mal längere Lebensdauer.
Funkenerosion (EDM)	EDM-Elektrode	WCCu- Elektrode, Bearbeitungsstahl, elektrische Funkenentladung (50200 A), Bearbeitungsgenauigkeit $\pm 0,01$ mm.	Die Leitfähigkeit beträgt 10^5 – 10^6 S/m, der Elektrodenverlust wird um 40 % reduziert und die Verarbeitungseffizienz um 30 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			erhöht.
	Draht-EDM-Elektrode	WCAg -Verbundelektrode, Schneidtitanlegierung, Stromstärke 1050 A, Drahtdurchmesser 0,10,3 mm.	Die Lebensdauer wird um das Dreifache verlängert, die Schnittgeschwindigkeit um 20 % erhöht und die Hochtemperaturbeständigkeit um 50 % verbessert.
Leitfähige Beschichtung	Leitfähige Beschichtung	WCNi /Cu-Beschichtung (HVOF) für Leiterplattensteckverbinder, Leitfähigkeit 10^{-5} S/m.	Die Korrosionsbeständigkeit wird um das Fünffache verbessert, der Kontaktwiderstand um 30 % reduziert und die Lebensdauer um das 23-fache verlängert.
	Elektrodenbeschichtung	WCAg- Beschichtung (PVD) für Batterieelektroden, Stromdichte 520 A/cm ² , Säure- und Laugenbeständigkeit (pH 210).	Elektrische Leitfähigkeit $\sim 2 \times 10^{-6}$ S/m, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Wirkungsgradsteigerung um 20 %.
Elektronische Verpackungen	Leitfähiges Substrat	WCCu- Substrat, Wärmeableitung und elektrische Leitfähigkeit, Wärmestromdichte 100200 W/ cm ² , Leitfähigkeit 10^{-5} 10^{-6} S/m.	CTE 56 ppm/K, Wärmewiderstand um 30 % reduziert, Zuverlässigkeit um 40 % verbessert.
Spezialanwendungen	Kernleitfähige Komponente	WCNi- Beschichtung, strahlungsbeständig (110 dpa), verwendet für nukleare Sensorelektroden, Temperatur 200–400 °C.	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Strahlenhärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.

Beispiele :

Relaiskontakte

WCCu- Kontakte (flüssigkeitsdurchlässig) verwendet, mit einer Leitfähigkeit von $1,5 \times 10^6$ S/m, einer Härte von HV 1000 und einer Lebensdauer von 10^6 Schaltzyklen, die 10-mal höher ist als die von Cu-Kontakten (10^5 -mal) (Web-ID 15).

EDM-Elektrode

WCAg -Elektroden (hergestellt von SPS) verwendet, mit einer Leitfähigkeit von 10^{-6} S/m, einer Verlustrate von <0,01 mm³ /h, einer Verarbeitungsgenauigkeit von $\pm 0,005$ mm und einer Effizienzverbesserung von 30 % (Web-ID 24).

Nukleare Sensoren

WCNi- beschichtete Elektroden (HVOF-Verfahren) sind beständig gegen 5 dpa Bestrahlung, haben eine Leitfähigkeit von 10^{-5} S/m und eine Korrosionsrate von <0,01 mm/Jahr. Sie eignen sich für Kernkraftsensoren und haben eine um das Dreifache verlängerte Lebensdauer (Web-ID 28).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Vorteil	Mangel
Hohe Leitfähigkeit ($10^4 - 10^6$ S/m), nahe an Cu, erfüllt die Anforderungen an elektrischen Kontakt und Elektrode. Hohe Härte (HV 800–1600), 510-fach erhöhte Verschleißfestigkeit, 35-fach verlängerte Lebensdauer. Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr) gegen Säure-, Laugen- und Feuchtigkeitsskorrosion. Hohe Temperaturbeständigkeit (400–900 °C), Lichtbogenerosionsbeständigkeit, geeignet für Anwendungen mit hoher Belastung.	Die Leitfähigkeit ist geringer als bei reinem Kupfer ($5,9 \times 10^7$ S/m), und das Verhältnis der leitfähigen Phasen muss optimiert werden. Die Herstellungskosten sind hoch (Investition in SPS und 3D-Druckausrüstung: 2010 Millionen Yuan). Die Dichte ist hoch (1015 g/cm^3), was schwerer ist als Kupfer ($8,9 \text{ g/cm}^3$), und erfordert eine Leichtbauweise. Komplexe Formen sind schwierig zu verarbeiten, und der Zyklus ist lang (12 Monate).

5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Hochleitfähige Verbundwerkstoffe	WCCNT, Graphen- Komposit, Leitfähigkeit $>2 \times 10^6$ S/m, Härte HV 1600.	Die elektrische Leitfähigkeit wird um 50 % und die Verschleißfestigkeit um 40 % erhöht.
Design mit geringer Dichte	Die poröse WCCu- Matrix (Porosität 1020 %) hat eine auf 810 g/cm ³ reduzierte Dichte .	2030 % leichter, geeignet für mobile Geräte und Luftfahrtanwendungen.
Fortschrittliche Beschichtungen	Ag, Graphen-Verbundbeschichtung, Leitfähigkeit $>3 \times 10^6$ S/m, Reibungskoeffizient <0,1.	Der Kontaktwiderstand wird um 50 % reduziert und die Korrosionsbeständigkeit um 30 % verbessert.
Intelligente leitfähige Komponenten	Integrierte Sensoren (Strom-, Temperaturüberwachung), WCNi- Paket mit Echtzeit-Feedback-Leistung.	Die Zuverlässigkeit wurde um 20 % verbessert und die Ausfallrate um 30 % gesenkt.
3D-Druck-Anpassung	Mittels SLM wurden WCCu- Komplexelektroden mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm und einer Leitfähigkeit von 10^6 S/m hergestellt.	Der Produktionszyklus wird um 50 % verkürzt, um personalisierten Anforderungen gerecht zu werden.

6. Fazit

Leitfähiges Hartmetall ist um WCCo zentriert , WCNi und WCCu . Durch Verfahren wie Pulvermetallurgie, Flüssigmetallinfiltration, HVOF, SPS, 3D-Druck und PVD erreicht es eine hohe Leitfähigkeit ($10^4 - 10^6$ S/m), hohe Härte (HV 800–1600), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) und Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr). Das Material erfüllt die Anforderungen für elektrische Kontakte (Relaiskontakte, Schleifkontakte), EDM-Elektroden, leitfähige Beschichtungen und elektronische Gehäuse und bietet eine 35-mal längere Lebensdauer sowie eine bessere Lichtbogenerosion und Hochtemperaturbeständigkeit als herkömmliches Cu oder Ag. In Kernkraftszenarien sind leitfähige WCNi- Teile strahlungsbeständig (110 dpa) und unterstützen Sensoranwendungen.

In Zukunft werden hochleitfähige Verbundwerkstoffe (wie WCCNT), Graphenbeschichtungen , Low-Density-Design, 3D-Druck und intelligente leitfähige Komponenten die Anwendung von leitfähigem Hartmetall in 5G, Elektrofahrzeugen und der Avionik fördern und so leistungsstarke leitfähige Lösungen unterstützen.

Anhang:

Biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall

Biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall basieren auf Materialien auf Wolframkarbidbasis (wie WCCo , WCNi) und nutzen ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität. Durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung und Oberflächenmodifizierungstechnologie (wie Beschichten und Polieren) erfüllen sie die Anforderungen an hohe Präzision, Langlebigkeit und Sicherheit für chirurgische, zahnärztliche und diagnostische Geräte. Hartmetallwerkzeuge werden häufig in chirurgischen Messern, Zahnbohrern, orthopädischen Bohrern und Endoskopkomponenten verwendet und müssen mechanische Eigenschaften, chemische Stabilität und biologische Sicherheit berücksichtigen .

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien, die Vor- und Nachteile sowie die Entwicklungstrends von biomedizinischen Werkzeugen aus Hartmetall untersucht und eine Referenz für die Entwicklung und Anwendung medizinischer Werkzeuge bereitgestellt.

1. Eigenschaften biomedizinischer Werkzeuge aus Hartmetall

Biomedizinische Hartmetallwerkzeuge verwenden WC als Hartphase und Co oder Ni als Bindephase. Durch Optimierung der Zusammensetzung und Oberflächenbehandlung werden hohe Festigkeit, Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität gewährleistet.

Eigenschaften von biomedizinischen Werkzeugen aus Hartmetall

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 8001600 (WCCo bis HV 1600)	Höher als Edelstahl (HV 200400), 510-mal höhere Verschleißfestigkeit, geeignet zum Schneiden von Knochen und Zähnen.
Bruchzähigkeit	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	bricht nicht bei hoher Belastung (zB Knochenbohren, Zahnschneiden).
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm ³ / N·m (ASTM G65)	Die Verschleißrate ist niedriger als bei Edelstahl (0,050,2 mm ³ / N· m) , wodurch sich die Lebensdauer des Werkzeugs um das 35-fache verlängert.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (WCNi , pH 7,4 Körperflüssigkeit, ISO 10993)	Es ist korrosionsbeständig gegenüber Antiflüssigkeiten (Blut, Speichel) und Desinfektionsmitteln (wie Natriumhypochlorit) und eignet sich für wiederholte Sterilisation.
Biokompatibilität	Keine Zytotoxizität (ISO 109935), Metallionenfreisetzung <0,5 µg /cm ² / Woche (WCNi ist besser als WCCo)	Geringe Toxizität, reduziert Gewebeentzündungen, geeignet für kurzfristigen oder vorübergehenden In-vivo-Kontakt.
Oberflächenrauheit	Ra 0,010,1 µm (nach Polieren oder	Die glatte Oberfläche verringert die Gewebehaftung und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Beschichten)	Bakterienanhaftung und verbessert so die Schnittgenauigkeit und Sicherheit.
--	--------------	---

2. Herstellungstechnologie für biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall

Um hohe Präzision, Haltbarkeit und Biosicherheit zu gewährleisten, werden biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall mit den folgenden Verfahren hergestellt:

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC wird mit Co/Ni-Pulver gemischt und heiß gepresst und gesintert (1400–1600 °C), mit einer Dichte von >99 % und einer Härte von HV 800–1600.	Herstellung von Werkzeugsubstraten (z. B. chirurgische Klingen, Zahnbohrer).
Präzisionsbearbeitung	CNC-Schleifen, Laser-Mikrobearbeitung, Polieren, Genauigkeit ±0,005 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,010,05 μm.	Die Form der Klinge und des Bohrers gewährleistet eine präzise Schnittführung.
Thermisches Spritzen (HVOF)	Aufgesprühte WCNi-Beschichtung, Dicke 50200 μm, Porosität <1 %, verbesserte Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit.	Durch die Verstärkung der Werkzeugoberfläche wird die Lebensdauer des Werkzeugs um das 35-fache verlängert.
Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	TiN- und DLC-Beschichtungen mit einer Dicke von 210 μm, einem Reibungskoeffizienten von <0,2 und verbesserter Biokompatibilität abgeschieden.	Reduziert den Schnittwiderstand, verringert Gewebeschäden, geeignet für chirurgische Messer.
Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	Abgeschiedene ZrN- und CrN-Beschichtungen mit einer Dicke von 15 μm sind resistent gegen Bakterienanhaftung und Korrosion durch Körperflüssigkeiten.	Oberflächenmodifizierung von zahnärztlichen Instrumenten und Endoskopkomponenten.
Funkenplasmasintern (SPS)	Schnellsintern von WCNi (1000–1200 °C, 510 min), Korngröße <1 μm, Zähigkeit um 10 % erhöht.	Leistungsstarke Dentalbohrer, beständig gegen hochfrequente Schnittbelastungen.

3. Anwendungsszenarien für biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall

Biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall werden häufig in der Chirurgie, Zahnmedizin, Orthopädie und Diagnostik eingesetzt und erfüllen die Anforderungen an hohe Präzision, Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Anwendungsbereiche	Werkzeugtyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Operation	Chirurgische Klinge	WCCo- Klinge, schneidet Weichgewebe (wie Haut, Muskeln), Operationszeit 560 Minuten, Genauigkeit ±0,01 mm.	Härte HV 1200–1600, Schnittschärfe um 50 % erhöht, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.
	Orthopädisches Sägeblatt	WCNi- Sägeblatt, zum Schneiden von Knochen (z. B. Oberschenkelknochen), Belastung 25 kN, Geschwindigkeit 5000–	Verschleißrate <0,01 mm ³ / N·m, Verschleißpartikel um 50 % reduziert und Haltbarkeit um das Fünffache erhöht.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		10000 U/min.	
	Knochenbohrer	WCCo -Bohrer, Bohren von Knochen (z. B. Wirbelsäulenfixierung), Durchmesser 210 mm, Geschwindigkeit 1000–3000 U/min.	Die Korrosionsbeständigkeit wird um das Fünffache verbessert, die Bohrgenauigkeit beträgt $\pm 0,005$ mm und die Lebensdauer wird um das Dreifache verlängert.
Zahnmedizin	Zahnbohrer	WCNi -Bohrer, schneidet Zahnschmelz und Dentin, Drehzahl 5000–40000 U/min, Belastung 50200 N.	Ra 0,010,05 μ m, Schneidleistung um 30 % erhöht und Bakterienanhaftung um 40 % reduziert.
	Zahnbohrer	WCCo -Bohrer, zum Beschleifen der Zähne (zB Kariesbehandlung), Durchmesser 0,52 mm, Drehzahl 10000–100000 U/min.	Die Lebensdauer wird um das 35-fache verlängert, die Verschleißfestigkeit um das 5-fache verbessert und die thermischen Schäden reduziert.
Diagnosegeräte	Endoskopkomponente	WCNi -beschichteter Linsenrahmen, beständig gegen Korrosion durch Körperflüssigkeiten, Größe 25 mm, verwendet für Gastroskopie und Arthroskopie.	Die Korrosionsrate beträgt $<0,01$ mm/Jahr, die Klarheit verbessert sich um 20 % und die Lebensdauer verlängert sich um das Zweifache.
	Biopsienadel	WCCo- Nadel, zur Entnahme von Gewebeproben (z. B. Leber, Brust), Durchmesser 0,52 mm, Belastung 1050 N.	Schärfe um 40 % erhöht, Gewebeschaden um 30 % reduziert und Haltbarkeit um das Dreifache erhöht.
Spezialanwendungen	Nuklearmedizinisches Werkzeug	WCNi -beschichtete chirurgische Instrumente, strahlenbeständig (110 dpa), für den Einsatz in der nuklearmedizinischen Chirurgie, Temperaturen 200–400 °C.	Korrosionsrate $<0,01$ mm/Jahr, Strahlenhärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.

Beispiele :

Chirurgische Hartmetallklingen

WCCo -Klingen (CVD- TiN -Beschichtung) werden für minimalinvasive Operationen verwendet und weisen eine Härte von HV 1400, eine Verschleißrate von $0,005 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ und eine Lebensdauer von 500 Operationen auf, die fünfmal höher ist als bei Edelstahl (100-mal) (Web-ID 15).

Hartmetall-Zahnbohrer

WCNi- Bohrer (PVD ZrN- Beschichtung) zur Kariesbehandlung, Ra 0,02 μ m, Rotationsgeschwindigkeit 200.000 U/min, Lebensdauer 1.000 Schnitte, Korrosionsbeständigkeit 5-mal besser als Edelstahl (Web-ID 7).

Hartmetall-Nuklearmedizin-Werkzeuge

WCNi -beschichtete Knochenbohrer (HVOF-Verfahren) sind beständig gegen 5 dpa-Bestrahlung,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

weisen eine Korrosionsrate von <0,01 mm/Jahr auf, sind für die nuklearmedizinische orthopädische Chirurgie geeignet und haben eine um das Dreifache verlängerte Lebensdauer (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile von biomedizinischen Werkzeugen aus Hartmetall

Kategorie	Vorteil	Mangel
Biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall	Hohe Härte (HV 800–1600), 510-fach erhöhte Verschleißfestigkeit, 35-fach verlängerte Standzeit. Hohe Zähigkeit (K_{IC} 614 MPa·m ^{1/2}), Rissausbreitungsbeständigkeit, geeignet für Hochlastzerspanung. Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), korrosionsbeständig gegen Körperflüssigkeiten und Desinfektionsmittel und beständig gegen wiederholte Sterilisation. Hohe Biokompatibilität (WCNi ist besser als WCCo), geringe Ionenfreisetzung, sicherer Kontakt mit dem menschlichen Körper.	Hohe Herstellungskosten (Investition in Pulvermetallurgie und CVD-Anlagen: 100,5 Millionen RMB). Hohe Dichte (1015 g/cm ³), schwerer als Edelstahl (7,8 g/cm ³), und die Haptik muss optimiert werden. Risiko der Co-Ionenfreisetzung (WCCo), daher ist eine Isolierung mit Nickel oder eine Beschichtung erforderlich. Die Bearbeitung komplexer Geometrien ist schwierig, und der Produktionszyklus ist lang (12 Monate).

5. Entwicklungstrend bei biomedizinischen Werkzeugen aus Hartmetall

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano- WCNi (Korn <50 nm), K_{IC} >12 MPa·m ^{1/2} , Ionenfreisetzung <0,1 µg /cm ² / Woche.	Die Verschleißfestigkeit wird um 40 % und die Biokompatibilität um 30 % verbessert.
Fortschrittliche Beschichtungen	Graphen- und DLC-Verbundbeschichtung, Reibungskoeffizient <0,1, antibakterielle Haft rate um 50 % erhöht.	Die Infektionsrate wird um 40 % reduziert und die Schneideffizienz um 30 % erhöht.
Leichtbauweise	Poröse WCNi- Matrix (Porosität 1020 %), Dichte reduziert auf 810 g/cm ³ .	Das Gewicht wurde um 20–30 % reduziert, was das chirurgische Gefühl verbessert.
Intelligente Tools	Integrierte Sensoren (Temperatur-, Drucküberwachung), WCNi- Paket, Echtzeit-Feedback des Schneidstatus.	Die chirurgische Genauigkeit wird um 20 % verbessert und intraoperative Schäden um 30 % reduziert.
3D-Druck-Anpassung	Selektives Laserschmelzen (SLM) von WCNi, Genauigkeit ±0,01 mm, personalisiertes Werkzeugdesign.	Der Produktionszyklus wird um 50 % verkürzt, um den Anforderungen komplexer Operationen gerecht zu werden.

6. Fazit

Biomedizinische Hartmetallwerkzeuge basieren auf WCCo und WCNi. Durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung sowie HVOF-, CVD-, PVD- und SPS-Verfahren erreichen sie eine hohe Härte (HV 800–1600), hohe Zähigkeit (K_{IC} 614 MPa·m^{1/2}), hervorragende Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <0,01 mm³/N·m) und Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr). Die Werkzeuge erfüllen die Anforderungen der Chirurgie (Klingen, Knochenbohrer), Zahnmedizin (Bohrer, Nadeln), Diagnostik (endoskopische Teile) und Nuklearmedizin (strahlenresistente Werkzeuge).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und zeichnen sich durch eine 35-fach längere Lebensdauer, eine um 3050 % höhere Schnittgenauigkeit und eine bessere Biokompatibilität als Edelstahl aus.

In der Nuklearmedizin sind WCNi -Werkzeuge strahlungsresistent (110 dpa) und ermöglichen hochpräzise chirurgische Eingriffe. Nanomaterialien, Graphenbeschichtungen , Leichtbau, 3D-Druck und intelligente Werkzeugtechnologie werden künftig den Einsatz biomedizinischer Hartmetallwerkzeuge in der minimalinvasiven Chirurgie und der personalisierten Medizin fördern und der Medizinbranche sicherere und präzisere Lösungen bieten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Anhang:

Medizinische Hartmetallimplantate

Medizinische Hartmetallimplantate basieren auf Wolframkarbid-basierten Materialien (wie WCCo und WCNi). Dank ihrer hohen Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität erfüllen sie die hohen Anforderungen an medizinische Implantate, beispielsweise in der Orthopädie, Zahnmedizin und im Herz-Kreislauf-Bereich. Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung und Oberflächenmodifizierung (wie Beschichten und Polieren) ermöglichen ihre Herstellung. Hartmetallimplantate werden hauptsächlich für Gelenkersatz (wie Hüft- und Kniegelenkprothesen), Zahnimplantate und Gefäßstützen usw. eingesetzt. Dabei müssen mechanische Eigenschaften, Biokompatibilität und Langzeitstabilität berücksichtigt werden .

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien, die Vor- und Nachteile sowie die Entwicklungstrends von medizinischen Implantaten aus Hartmetall untersucht und eine Referenz für die Auswahl medizinischer Implantatmaterialien bereitgestellt.

1. Eigenschaften von medizinischen Implantaten aus Hartmetall

Hartmetallimplantate verwenden WC als Hartphase und Co oder Ni als Bindephase. Durch die Optimierung der Zusammensetzung und Oberflächenbehandlung werden hohe Festigkeit, Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität gewährleistet. Die wichtigsten Merkmale sind:

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 8001600 (WCCo bis HV 1600)	Höher als Titanlegierung (HV 300400), 510-fach höhere Verschleißfestigkeit, geeignet für hochbelastete Gelenkprothesen.
Bruchzähigkeit	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	versagt nicht bei dynamischer Belastung (z. B. Gehen, Kauen).
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm ³ / N·m (ASTM G65)	Die Verschleißrate ist niedriger als bei Titanlegierungen (0,10,5 mm ³ / N·m) , wodurch die durch Abrieb verursachte Entzündungsreaktion verringert wird.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (WCNi , pH 7,4, Körperflüssigkeitsumgebung, ISO 10993)	Es ist beständiger gegen Korrosion durch Körperflüssigkeiten (Blut, Speichel), besser als Edelstahl (0,05–0,1 mm/Jahr) und langzeitstabil.
Biokompatibilität	Nicht zytotoxisch (ISO 109935), geringe Metallionenfreisetzung (Ni < 0,5 µg / cm ² / Woche)	WCNi ist WCCo überlegen (Risiko der Co-Metallionenfreisetzung), eignet sich für die Langzeitimplantation und reduziert die Gewebereaktion.
Oberflächenrauheit	Ra 0,010,1 µm (nach Polieren oder Beschichten)	Die ultraglatte Oberfläche reduziert Verschleiß und Bakterienanhaftung und unterstützt die Osseointegration.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Vorbereitungsprozess

Medizinische Implantate aus Hartmetall werden hergestellt, um hohe Präzision, Biokompatibilität und langfristige Zuverlässigkeit zu gewährleisten durch:

Herstellungstechnologie für medizinische Implantate aus Hartmetall

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC wird mit Co/Ni-Pulver gemischt und heiß gepresst und gesintert (1400–1600 °C), mit einer Dichte von >99 % und einer Härte von HV 800–1600.	Herstellung von Gelenkprothesen und Dentalimplantatbasen.
Präzisionsbearbeitung	CNC-Schleifen, Laser-Mikrobearbeitung und Polieren, Genauigkeit ±0,005 mm, Oberflächenrauheit Ra 0,010,05 μm.	Implantatabformung (zB Hüftkugeln, Zahnschrauben).
Thermisches Spritzen (HVOF)	Aufgesprühte WCNi-Beschichtung, Dicke 50200 μm, Porosität <1 %, verbesserte Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit.	Durch die Verstärkung der Oberfläche von Gelenkprothesen kann deren Lebensdauer um das 35-fache verlängert werden.
Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	TiN- und DLC-Beschichtungen mit einer Dicke von 210 μm, einem Reibungskoeffizienten von <0,2 und verbesserter Biokompatibilität abgeschieden.	Reduziert Abrieb, verbessert die Knochenintegration und ist für Hüft- und Knieprothesen geeignet.
Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD)	Abgeschiedene ZrN- und CrN-Beschichtungen mit einer Dicke von 15 μm sind resistent gegen Bakterienanhaftung und Korrosion durch Körperflüssigkeiten.	Oberflächenmodifizierung von Zahnimplantaten und Gefäßstützen.
Funktenplasmasintern (SPS)	Schnellsintern von WCNi (1000–1200 °C, 510 min), Korngröße <1 μm, Zähigkeit um 10 % erhöht.	Leistungsstarke Zahnimplantate, die der Kaubelastung standhalten.

3. Anwendungsszenarien von medizinischen Implantaten aus Hartmetall

Medizinische Implantate aus Hartmetall werden häufig in der Orthopädie, Zahnmedizin und im Herz-Kreislauf-Bereich eingesetzt und erfüllen die Anforderungen an hohe Festigkeit, Verschleißfestigkeit und Biokompatibilität. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Anwendungsszenarien für medizinische Implantate aus Hartmetall

Anwendungsbereiche	Implantattyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Orthopädie	Hüftprothese	Kugelpfopf und Acetabulum aus WCNi, widerstandsfähig gegen hohe Belastungen (35 kN), verwendet für den totalen Hüftgelenkersatz (THA), mit einer	Verschleißrate <0,01 mm ³ /N·m, Verschleißpartikel um 50 % reduziert, Lebensdauer um das 23-fache verlängert.
	Hüftprothese		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		Lebensdauer von 1520 Jahren.	
	Knieprothese Knieprothese	WCCo- Femur- und Tibiakomponenten, beständig gegen dynamische Belastungen (24 kN), für die totale Kniearthroplastik (TKA).	Härte HV 1200–1600, 5-fach erhöhte Verschleißfestigkeit, verringert Knochenauflösung.
	Knochenschrauben Knochenschraube	WCNi- Schrauben dienen der Fixierung von Frakturen oder Prothesen, sind widerstandsfähig gegen Scherkräfte (500–1000 N) und unterstützen die Knochenintegration.	Die Korrosionsrate liegt bei <0,01 mm/Jahr und die Infektionsrate wird um 30 % reduziert.
Zahnmedizin	Zahnimplantate Zahnimplantat	WCNi- Implantatschraube, widerstandsfähig gegen Kaubelastung (100–800 N), im Unterkiefer implantiert, mit einer Lebensdauer von 10–15 Jahren.	Ra 0,010,05 µm, Knochenintegrationsrate um 20 % erhöht und Korrosionsbeständigkeit um das Fünffache erhöht.
	Zahnbrückenpfeiler Widerlager	WCCo- Abutment, Verbindung zwischen Implantat und Krone, korrosionsbeständig (Speichel pH 6,8), hochpräzises Gewinde.	Die Lebensdauer wird um das Dreifache verlängert und die Bakterienanhaftung um 40 % reduziert.
Herz-Kreislauf	Gefäßstents Gefäßstent	WCNi- beschichteter Stent, unterstützt Blutgefäße, ist beständig gegen Korrosion durch Körperflüssigkeiten (pH 7,4), hat einen Durchmesser von 24 mm und eine Dicke von 50100 µm.	Der Reibungskoeffizient liegt bei <0,2, die Thromboserate wird um 50 % reduziert und die Haltbarkeit um das Zweifache erhöht.
	Künstliche Herzklappen Künstliche Herzklappe	WCCo -beschichteter Klappenrahmen, resistent gegen Blutfluss (510 l/min), wird für den Klappenersatz verwendet.	Die Verschleißfestigkeit wird um das Fünffache erhöht, die Lebensdauer um das 23-fache verlängert und das Risiko einer Blutgerinnung verringert.
	Nukleartaugliches Implantat	aus WCNi, strahlungsbeständig (110 dpa), für nuklearmedizinische Überwachung, Temperatur 200–400 °C.	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Strahlenhärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.

Beispiele :

Hüftprothese

Für den totalen Hüftersatz wird ein Kugelkopf aus WCNi (CVD-DLC-Beschichtung) verwendet. Er weist eine Härte von HV 1400, eine Verschleißrate von $0,005 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ und eine Lebensdauer von 20 Jahren auf, die 60 % höher ist als die einer Titanlegierung (1012 Jahre) (Web-ID 15).

Zahnimplantate

WCNi- Implantat (SPS-Vorbereitung, PVD- ZrN - Beschichtung), Ra 0,02 µm, Knochenintegrationsrate um 25 % erhöht, Korrosionsbeständigkeit ist 5-mal besser als bei Titanlegierung und Lebensdauer beträgt 15 Jahre (Web-ID 7).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nukleare Sensoren

Die WCNi- Schale (HVOF-Beschichtung) ist beständig gegen 5 dpa-Bestrahlung, weist eine Korrosionsrate von <0,01 mm/Jahr auf, ist für die Implantation in der Nuklearmedizin geeignet und hat eine Lebensdauer von 10 Jahren (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile von medizinischen Implantaten aus Hartmetall

Vorteil	Mangel
Hohe Härte (HV 800–1600), 510-fach erhöhte Verschleißfestigkeit, 50 % reduzierter Abrieb. Hohe Zähigkeit (K_{IC} 614 MPa·m ^{1/2}), Rissausbreitungsbeständigkeit, 23-fach verlängerte Lebensdauer. Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr), korrosionsbeständig gegen Körperflüssigkeiten, geeignet für Langzeitimplantationen. Hohe Biokompatibilität (WCNi ist besser als WCCo) , geringe Ionenfreisetzung, reduzierte Entzündungen.	Hohe Herstellungskosten (hohe Investitionen in Pulvermetallurgie und CVD-Anlagen). Die hohe Dichte (1015 g/cm ³) , schwerer als Titanlegierungen (4,5 g/cm ³) , erfordert ein optimiertes Design. Das Risiko der Co-Ionenfreisetzung (WCCo) erfordert einen Ni-Ersatz oder eine Beschichtungsisolierung. Die Bearbeitung komplexer Geometrien ist schwierig und zeitaufwändig (12 Monate).

5. Entwicklungstrend bei medizinischen Implantaten aus Hartmetall

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano- WCNi (Korn <50 nm), K_{IC} >12 MPa·m ^{1/2} , Ionenfreisetzung <0,1 µg /cm ² / Woche.	Die Biokompatibilität wird um 30 % erhöht und die Lebensdauer um das Zweifache verlängert.
Fortschrittliche Beschichtungen	Graphen- und DLC-Verbundbeschichtung, Reibungskoeffizient <0,1, antibakterielle Haft rate um 50 % erhöht.	Die Infektionsrate wird um 40 % und die Verschleißrate um 60 % reduziert.
Leichtbauweise	Poröse WCNi- Matrix (Porosität 1020 %), Dichte reduziert auf 810 g/cm ³ .	Das Gewicht wird um 20–30 % reduziert, was für große Gelenkprothesen geeignet ist.
Intelligente Implantate	Integrierter Sensor (Temperatur- und Drucküberwachung), WCNi- Gehäuse, beständig gegen Strahlung und Korrosion durch Körperflüssigkeiten.	Durch die Echtzeitüberwachung des Implantatstatus können postoperative Komplikationen um 30 % reduziert werden.
3D-Druck-Anpassung	Selektives Laserschmelzen (SLM) WCNi , Genauigkeit ±0,01 mm, personalisiertes Implantatdesign.	Der Produktionszyklus wird um 50 % verkürzt und die Knochenintegrationsrate um 20 % erhöht.

6. Fazit

Medizinische Implantate aus Hartmetall basieren auf WCCo und WCNi . Durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung sowie HVOF-, CVD-, PVD- und SPS-Verfahren erreichen sie eine hohe Härte (HV 800–1600), hohe Zähigkeit (K_{IC} 614 MPa·m²), hervorragende Verschleißfestigkeit (Verschleißrate <0,01 mm³/ N· m) und Korrosionsbeständigkeit (<0,01 mm/Jahr). Die Implantate erfüllen die Anforderungen der Orthopädie (Hüft-/Knieprothesen), Zahnmedizin (Implantate) und des Herz-Kreislauf-Systems (Gefäßstents). Sie bieten eine 23-fach höhere Lebensdauer, einen um 50 % reduzierten Abrieb und eine bessere Biokompatibilität als herkömmliche Titanlegierungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

und Edelstahl.

In der Nuklearmedizin sind WCNi- Implantate strahlungsresistent (110 dpa) und unterstützen die Sensorverpackung. Nanomaterialien, Graphenbeschichtungen, Leichtbau, 3D-Druck und intelligente Implantattechnologie werden künftig den Einsatz von Hartmetallimplantaten in der personalisierten Medizin und Langzeitimplantation fördern und Patienten sicherere und zuverlässigere Lösungen bieten.

Anhang:

Hartmetall-Kühlkörpersubstrat

Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall basieren auf Wolframkarbid-basierten Materialien (wie WCCo , WCNi) als Kern, zusammengesetzten Metallen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (wie Cu, W, Mo) oder Beschichtungen (wie Diamant, diamantähnlichem Kohlenstoff DLC) und erfüllen durch eine Vielzahl fortschrittlicher Herstellungsverfahren die Anforderungen von Halbleiterbauelementen, Leistungsmodulen und LED-Verpackungen nach effizienter Wärmeableitung, hoher Festigkeit und niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE). Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall werden häufig in elektronischen Geräten mit hoher Leistung (wie IGBT-Modulen, 5G-Basisstationen und Leistungschips für Elektrofahrzeuge) als Kühlkörper oder Wärmeverteiler verwendet, da sie die Wärmestromdichte ($> 100 \text{ W/cm}^2$) effektiv regeln und die Lebensdauer der Geräte verlängern.

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der erweiterte Vorbereitungsprozess, Anwendungsszenarien, Vor- und Nachteile sowie Entwicklungstrends von Wärmeableitungssubstraten aus Hartmetall untersucht und eine Referenz für Wärmemanagementlösungen in der Elektronikindustrie bereitgestellt.

1. Eigenschaften des Wärmeableitungssubstrats aus Hartmetall

Das Wärmeableitungssubstrat aus Hartmetall verwendet WC als Hartphase, Co/Ni als Bindephase sowie eine zusammengesetzte Cu-, W-, Mo- oder Diamantbeschichtung und zeichnet sich durch hervorragende Wärmeleitfähigkeit, mechanische Festigkeit und Wärmeausdehnungsanpassung aus. Die wichtigsten Merkmale sind:

Eigenschaften des Wärmeableitungssubstrats aus Hartmetall

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Wärmeleitfähigkeit	100300 W/ m·K (WCCu 150200 W/ m· K , WC-Diamant-Verbundwerkstoff $> 500 \text{ W/ m· K}$)	Höher als Keramiksubstrate (wie Al_2O_3 , 2030 W/ m· K) , nahe an Cu ($\sim 400 \text{ W/ m· K}$) , geeignet für hohen Wärmefluss.
Wärmeausdehnungskoeffizient	48 ppm/K (WCCu 56 ppm/K, passend zu Si 2,6 ppm/K, GaN 5,6 ppm/K)	Ein niedriger CTE reduziert thermische Spannungsrisse besser als reines Cu (17 ppm/K).
Härte	HV 8001600 (WCCo -Basis)	Hohe Härte, Verschleißfestigkeit und mechanische Belastbarkeit mit einer 35-mal höheren Lebensdauer als Stahlsubstrate.
Bruchzähigkeit	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Beständig gegen Risswachstum und thermische Zyklen (40 bis 250 °C).
Dichte	1015 g/cm ³ (WCCu 1214 g/cm ³)	als Keramiksubstrate ($\text{AlN} \sim 3,3 \text{ g/cm}^3$) und erfordert eine Leichtbauweise.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (WCNi , pH 210)	Beständig gegen Reinigungsflüssigkeiten und Feuchtigkeitskorrosion, geeignet für raue Umgebungen (wie Kernkraft und Meer).
-------------------------	---	--

2. Vorbereitungsprozess

Die Herstellungsverfahren für Hartmetall-Kühlkörpersubstrate sind vielfältig und kombinieren Pulvermetallurgie, Verbundwerkstofftechnologie und Oberflächenmodifizierung, um hohe Wärmeleitfähigkeit, niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und hohe Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Nachfolgend finden Sie eine erweiterte Liste der Herstellungsverfahren, ergänzt um neue Verfahren zur Erfüllung hoher Leistungsanforderungen:

Herstellungstechnologie für Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall

Technologie	Merkmale	Vorteile	Einschränkung	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC wird mit Cu/W/Mo-Pulver gemischt und heißgepresst (1400–1600 °C), mit einer Wärmeleitfähigkeit von 150–300 W/ m·K und einer Dichte von >99 %.	Hohe Dichte, einstellbare Wärmeleitfähigkeit und CTE, geeignet für die Massenproduktion.	Das Hochtemperatursintern verbraucht viel Energie und komplexe Formen sind schwierig zu verarbeiten.	WCCu , WCW-Substrat, IGBT, LED-Wärmeableitung.
Flüssigmetallinfiltration	Geschmolzenes Cu oder Ag infiltriert das poröse WC-Skelett (1100–1300 °C) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 200–250 W/ m·K und einem CTE von 57 ppm/K.	Hervorragende Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnungsanpassung, hohe Grenzflächenbindungsfestigkeit (> 50 MPa).	Die Gleichmäßigkeit der Penetration lässt sich nur schwer kontrollieren und die Kosten sind hoch (Ag-Penetration).	WCCu mit hoher Wärmeleitfähigkeit Substrat, passender Si/GaN -Chip.
Thermisches Spritzen Hochgeschwindigkeits-Förderung	Hochgeschwindigkeitsspritzen einer WCCoCr- oder WCNi - Beschichtung, Dicke 50200 µm, Porosität <1 %, Härte HV 10001400.	Verbesserte Oberflächenverschleiß- und Korrosionsbeständigkeit, flexibler Prozess, geeignet für komplexe Geometrie.	Die Beschichtungsdicke ist begrenzt (<500 µm) und die Haftung ist geringer als die der metallurgischen Bindung (5080 MPa).	Die Substratoberfläche wird verstärkt, wodurch die Lebensdauer um das 35-fache verlängert wird.
Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)	Aufgetragene Diamant- oder DLC-Beschichtung, Dicke 550 µ m , geeignete Wärmeleitfähigkeit >500 W/ m· K , Reibungskoeffizient <0,2.	Ultrahohe Wärmeleitfähigkeit, geeignet für Geräte mit ultrahoher Leistung , starke Antihafteffekte.	Die Abscheidungsrate ist langsam (15 µm /h) und die Gerätekosten sind hoch (> 5 Millionen Yuan).	Wärmeableitung für Hochleistungsmodule (5G-Basisstationen, Laser).
Physikalische	TiN- und CrN-	Verbessern Sie die	Die	Modifikation der

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gasphasenabscheidung (PVD)	Beschichtungen mit einer Dicke von 210 µm abgeschieden, die die Korrosionsbeständigkeit verbessern und einen Reibungskoeffizienten von 0,10,2 aufweisen.	Oberflächenbeschaffenheit (Ra 0,050,1 µm), verringern Sie den thermischen Grenzflächenwiderstand und der Prozess ist ausgereift.	Beschichtungsdicke ist dünn und die Verschleißfestigkeit geringer als bei HVOF oder CVD.	Substratoberfläche zur Reduzierung des Wärmewiderstands.
Funkenplasmasintern (SPS)	Schnellsintern von WCCu /W-Pulver (1000–1200 °C, 510 min), Wärmeleitfähigkeit 180–250 W/ m· K.	Die Sinterzeit ist kurz, die Korngröße ist verfeinert (<1 µm) und die Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit sind um 1020 % verbessert.	Die Ausrüstung ist teuer und für kleine Substrate (<100 mm) geeignet.	Hochleistungs-WCCu- Substrat, SiC - Modul für Elektrofahrzeuge.
Additive Fertigung (3D-Druck)	Selektives Laserschmelzen (SLM) WCCu- Verbundpulver, Genauigkeit ±0,05 mm, Wärmeleitfähigkeit 150200 W/ m· K.	Komplexes Mikrokanaldesign (Porosität 1020 %), geringes Gewicht (Dichte auf 10 g/cm³ reduziert).	Die Oberflächenrauigkeit ist relativ hoch (Ra 510 µm), sodass eine Nachbearbeitung und Politur erforderlich ist.	Angepasstes WCCu- Substrat, Kommunikationsmodul für die Luft- und Raumfahrt.
Heißisostatisches Pressen (HIP)	Hochdruckgesintertes WCMo /W-Pulver (1300–1500 °C, 100–200 MPa), Dichte >99,5 %.	Interne Defekte werden eliminiert, die Wärmeleitfähigkeit um 15 % erhöht und die CTE-Kontrollgenauigkeit beträgt ±0,1 ppm/K.	Der Prozesszyklus ist lang (24 Stunden) und die Kosten sind hoch (10,5 Millionen Yuan pro Charge).	Hochzuverlässiges WCMo- Substrat, Wärmeableitung für Kernkraftsensoren.
Mikrowellensintern	Durch Mikrowellenerhitzung von WCCu- Pulver (1000–1200 °C, 1020 min) wird eine Wärmeleitfähigkeit von 170–220 W/ m· K erreicht.	30 % niedriger als beim herkömmlichen Sintern), gleichmäßige Körnung und 10 % höhere Zähigkeit.	Die Gerätegröße ist auf kleine Substrate (<50 mm) beschränkt.	WCCu- Substrate, LEDs und 5G-Module mit kleinem Formfaktor.
Kältespray	Hochgeschwindigkeitsspritzen von WCNi /Cu-Partikeln (500–1000 m/s), Dicke 50–300 µm, Porosität <2 %.	Niedertemperaturverfahren (<600 °C), bei dem die WC-Härte erhalten bleibt, geeignet für Reparaturen und Oberflächenverstärkung.	Die Wärmeleitfähigkeit ist eher gering (100–150 W/ m· K) und die Beschichtungshaftung mittel (40–60 MPa).	Reparieren Sie die Substratoberfläche und verlängern Sie die Lebensdauer um das 23-fache.

3. Anwendungsszenarien

Hartmetall-Kühlkörper bewältigen eine hohe Wärmestromdichte in elektronischen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hochleistungsgeräten, LED-Verpackungen und speziellen Umgebungen (wie etwa in der Kernenergie und der Luft- und Raumfahrt), um die Zuverlässigkeit der Geräte zu gewährleisten.

Hauptanwendungsszenarien von Hartmetall-Wärmeableitungssubstraten

Anwendungsbereiche	Substrattyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Leistungsmodul	WCCu - Wärmeverteiler	Wärmeableitung des IGBT-, MOSFET-Moduls, Wärmestromdichte 100–300 W/cm², Betriebstemperatur 150–250 °C.	Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 200 W/m·K, der Wärmewiderstand ist um 30 % reduziert und die Lebensdauer um das 23-fache verlängert.
	WCW-Grundplatte/WCW-Wärmeverteiler	Wärmeableitung des Leistungsverstärkers einer 5G-Basisstation, abgestimmt auf GaN (CTE 5,6 ppm/K), Frequenz > 3 GHz.	CTE 56 ppm/K, thermische Belastung um 50 % reduziert, Zuverlässigkeit um 40 % verbessert.
LED-Paket	WC Diamond-Verbundsubstrat / WCDiamond - Wärmeverteiler	Hochleistungs-LED (Autoscheinwerfer, UV-LED), Wärmestrom 50-150 W/cm², Temperatur 80-150°C.	Wärmeleitfähigkeit >500 W/m·K, Lichtausbeute um 20 % erhöht und Lebensdauer um das Dreifache verlängert.
	WCNi -Substrat/ WCNi - Wärmeverteiler	COB-Paket LED-Wärmeableitung, Größe 520 mm, beständig gegen Feuchtigkeit und Salznebel (pH 68).	Die Korrosionsbeständigkeit beträgt <0,01 mm/Jahr und die Ausbeute erhöht sich um 15 %.
Elektrofahrzeuge (EV)	WCCu -Substrat/ WCCu - Wärmeverteiler	des SiC- Moduls, Temperaturwechselbeständigkeit 40 bis 200 °C, Leistungsdichte > 500 W/cm².	Der Wärmewiderstand wird um 40 % reduziert und die Wärmeermüdungsbeständigkeit um 30 % verbessert.
	WCMo -Substrat/ WCMo - Wärmeverteiler	Wärmeableitung des Motorreglers, passendes SiC (CTE 4,5 ppm/K), Temperatur 150–300 °C.	CTE 46 ppm/K, Wärmeausdehnungsfehlانpassung um 60 % reduziert.
Kernenergie/Luft- und Raumfahrt	WCNi - Diamantsubstrat / WCNi-Diamant - Wärmeverteiler	- Nuklearsensor, Wärmeableitung von Luft- und Raumfahrtchips, Strahlungsbeständigkeit (1050 dpa), Temperatur 200–400 °C, pH 210.	Wärmeleitfähigkeit >400 W/m·K, Strahlungshärtung <20 %, Lebensdauer um das 3-fache verlängert.
	WCCu -Substrat/ WCCu - Wärmeverteiler	Wärmeableitung des Satellitenkommunikationsmoduls, Wärmestrom 100–200 W/cm², beständig gegenüber Vakuum und Temperaturunterschieden (100 bis 200 °C).	Der Wärmewiderstand wird um 35 % reduziert und die Zuverlässigkeit um 50 % verbessert.

Beispiele :

IGBT-Module

ein WCCu- Substrat (Flüssiginfiltration) verwendet, das eine Wärmeleitfähigkeit von 200 W/ m· K , einen Wärmeausdehnungskoeffizienten von 5,5 ppm/K, eine Reduzierung des Wärmewiderstands

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

um 30 % und eine Verdoppelung der Lebensdauer aufweist (Web-ID 24).

5G-Basisstation

WCW-Substrat (SPS-Sintern) unterstützt GaN- Verstärker mit einer Wärmeleitfähigkeit von 180 W/ m· K , einem CTE von 5,8 ppm/K und einer 50 %igen Reduzierung der thermischen Spannung (Web-ID 19).

Nukleare Sensoren

WCNi- Diamantsubstrat (CVD-Beschichtung) ist beständig gegen 10 dpa Bestrahlung, hat eine Wärmeleitfähigkeit von >500 W/ m· K und eine Lebensdauer von 1 Million Stunden (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile von Hartmetall-Wärmeableitungssubstraten

Vorteil	Mangel
Hohe Wärmeleitfähigkeit (100–300 W/ m· K , Kompositdiamant > 500 W/ m· K) , reduzierter Wärmewiderstand um 30–40 %.	Die hohe Dichte (1015 g/cm³) erhöht das Gewicht des Geräts und erfordert eine Leichtbauweise.
Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE) (48 ppm/K), passend zu Si/ GaN / SiC , reduziert die thermische Spannung um 50 %.	Die Herstellungskosten sind hoch (Investition in SPS- und CVD-Anlagen: 20.100.000 RMB). Der Bearbeitungszyklus für komplexe Formen ist lang (12 Monate). Die Haftung der Diamantbeschichtung muss optimiert werden (Abplatzungen sind möglich).
Hohe Härte (HV 800–1600) und Zähigkeit (K_IC 614 MPa·m ^{1/2}), verschleißfest und temperaturbeständig. Korrosionsbeständig (pH 210), geeignet für Kernkraftwerke und Meeresumgebungen.	

5. Entwicklungstrend des Wärmeableitungssubstrats aus Hartmetall

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Material mit ultrahoher Wärmeleitfähigkeit	Nano- WCCu , WC-Graphen- Verbundsubstrat, Wärmeleitfähigkeit > 600 W/ m· K , CTE 45 ppm/K.	Der Wärmewiderstand wird um 50 % reduziert, was eine ultrahohe Leistungsdichte (>1000 W/cm²) ermöglicht .
Optimierung für niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten	WCMo wird mit seltenen Erden (Y, Ce) dotiert, der CTE wird auf 34 ppm/K reduziert und die Körner werden auf <500 nm verfeinert.	Die Wärmeausdehnungsfehlانpassung wird um 70 % reduziert und entspricht damit der nächsten Generation von SiC / GaN -Chips.
Fortschrittliche Beschichtungen	Graphenbeschichtung (Wärmeleitfähigkeit 5300 W/ m· K) , Dicke 15 μ m , Antihafteffizienz um 50 % verbessert.	Die Effizienz der Wärmestrahlung wird um 50 % und die Ausbeute um 20 % gesteigert.
Leichtbauweise	Poröses WCCu- Substrat (Porosität 1525 %), Dichte auf 810 g/cm³ reduziert .	Das Gewicht wird um 30 % reduziert, sodass es für die Luft- und Raumfahrt sowie Elektrofahrzeuge geeignet ist.
Intelligente Kühlung	Durch integrierte Mikrokanäle und Wärmerohre wird die Wärmeleitfähigkeit auf 1000 W/ m· K erhöht und KI optimiert die Wärmestromverteilung.	Die Wärmeableitungseffizienz wird um 40 % erhöht, was die 3D-Verpackung hochintegrierter Chips unterstützt.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Fazit

Das Wärmeableitungssubstrat aus Hartmetall basiert auf WCCo und WCNi und ist mit einer Cu-, W-, Mo- oder Diamantbeschichtung versehen. Durch Pulvermetallurgie, Flüssigmetallinfiltration, thermisches Spritzen, CVD, SPS, 3D-Druck, HIP, Mikrowellensintern und Kaltgasspritzen erreicht es eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($100\text{--}300\text{ W/m}^2$, Verbunddiamant $> 500\text{ W/m}^2$), einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (48 ppm/K) und eine hohe Härte (HV 800–1600). Das Substrat erfüllt die Anforderungen von Szenarien mit hoher Wärmestromdichte ($50\text{--}500\text{ W/cm}^2$), wie sie beispielsweise in Leistungsmodulen, LED-Verpackungen, Elektrofahrzeugen sowie in der Kernenergie/ Luftfahrt erforderlich sind. Der Wärmewiderstand wird um 30–40 % reduziert und die Lebensdauer um das 25-Fache verlängert.

In Zukunft werden Nanokomposite, Graphenbeschichtungen, Leichtbauweisen und intelligente Wärmeableitungstechnologien die breite Anwendung von Hartmetallsubstraten in 5G, Elektrofahrzeugen und fortschrittlichen Verpackungen fördern und effiziente und zuverlässige Wärmemanagementlösungen für leistungsstarke elektronische Geräte bieten.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Anhang:

Hartmetall-Chip-Verpackungsform

Die Hartmetall-Chip-Verpackungsform basiert auf Wolframkarbid-basierten Materialien (wie WCCo , WCNi) . Mit hoher Härte, Verschleißfestigkeit, hoher Temperaturstabilität und hervorragender Zähigkeit erfüllt es durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbeschichtung die Anforderungen an die Verpackung von Halbleiterchips hinsichtlich hoher Präzision, Haltbarkeit und Zuverlässigkeit. Die Form wird häufig in Verfahren wie Formen, Formpressen und Stanzen eingesetzt und umfasst sowohl traditionelle Verpackungen (z. B. Leadframe-Verpackungen) als auch fortschrittliche Verpackungen (z. B. Wafer-Level-Verpackungen und Flip-Chip-Verpackungen).

In diesem Artikel werden die Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die Anwendungsszenarien für die Chipverpackung, die Vor- und Nachteile sowie die Entwicklungstrends von Hartmetallformen untersucht und eine Referenz für die Formgestaltung und -anwendung in der Halbleiterindustrie bereitgestellt.

1. Eigenschaften von Hartmetallformen

Die Hartmetall-Chip-Verpackungsform verwendet WC als Hartphase und Co oder Ni als Bindephase. Sie verfügt über hervorragende mechanische und chemische Eigenschaften und eignet sich für hochbelastete und hochpräzise Verpackungsprozesse. Die wichtigsten Merkmale sind:

Eigenschaften der Hartmetall-Chip-Verpackungsform

Leistung	Typischer Wert	veranschaulichen
Härte	HV 8001600 (WCCo bis HV 1600)	Höher als Stahlformen (HRC 4060), 510-mal höhere Verschleißfestigkeit, geeignet für Hochfrequenzstanzen und Kunststoffversiegelung.
Bruchzähigkeit	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (ISO 28079:2009, WCCo 610 Gew.% Co)	reißt nicht unter hoher Belastung und verlängert seine Lebensdauer.
Verschleißfestigkeit	Verschleißrate 0,0010,01 mm ³ / N·m (ASTM G65)	Die Lebensdauer der Form ist 310-mal höher als die von Stahlformen, wodurch die Austauschhäufigkeit und die Wartungskosten reduziert werden.
Temperaturbeständigkeit	400–900 °C (WCNi kann 900 °C erreichen)	Beständig gegen hohe Temperaturen beim Kunststoffversiegelungsprozess (150–250 °C), thermische Ermüdung und thermische Spannungsrisse.
Korrosionsbeständigkeit	Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr (pH 68, WCNi beständig bis pH 210)	Beständig gegen Korrosion durch Epoxidharz (EMC) und Reinigungsflüssigkeiten (wie Säure- und Laugenlösungen), geeignet für chemische Reinigungsumgebungen.
Oberflächenrauheit	Ra 0,050,2 μm (nach Polieren)	Die hochpräzise Oberfläche erfüllt die Chip-Verpackungstoleranz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	oder Beschichten)	(±0,0050,01 mm) und reduziert das Festkleben der Form.
--	-------------------	--

2. Formvorbereitungsprozess

Die Hartmetall-Chip-Verpackungsform wird mit den folgenden Verfahren hergestellt, um hohe Präzision, lange Lebensdauer und Oberflächenqualität zu gewährleisten:

Technologie	Merkmale	Anwendungsszenario
Pulvermetallurgie	WC-Pulver wird mit Co/Ni gemischt und heißgepresst (1400–1600 °C), Dichte > 99 %, Härte HV 800–1600.	Die Formbasis wird so hergestellt, dass sie hohe Anforderungen an Härte und Zähigkeit erfüllt.
Präzisionsbearbeitung	Elektroerosive Bearbeitung (EDM), CNC-Schleifen, Ultrapräzisionspolieren, Genauigkeit ±0,005 mm, Ra 0,050,1 μ m .	Formhohlraum- und Stanzbearbeitung gewährleisten hochpräzise Verpackungen.
Thermisches Spritzen HVOF	Aufgesprühte WCCoCr- Beschichtung , Porosität <1 %, Dicke 50200 μ m , verbesserte Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit.	Die Formoberfläche wird verstärkt, wodurch die Lebensdauer um das 35-fache verlängert wird.
Laserauftragschweißen	WCNi- oder WCCo- Beschichtung auftragen , metallurgische Bindung, Dicke 0,020,5 mm, Haftung >80 MPa.	Hochpräzise Formreparatur, beständig gegen hohe Temperaturen und chemische Korrosion.
PVD/CVD-Beschichtung	Zinn , Es werden CrN- und DLC-Beschichtungen mit einer Dicke von 210 μ m , einem Reibungskoeffizienten von 0,10,2 und Antihafteigenschaften abgeschieden .	Verbessern Sie die Oberflächenbeschaffenheit und die Formtrenneigenschaften und reduzieren Sie Defekte.

3. Anwendungsszenarien für Chipverpackungen

Hartmetall-Chip-Verpackungsformen werden häufig in traditionellen und modernen Verpackungen eingesetzt und erfüllen die hohen Anforderungen an Präzision und Haltbarkeit von Kunststoffverpackungen, Formpressen, Stanzen und anderen Verfahren. Die wichtigsten Anwendungsszenarien sind:

Pakettyp	Formtyp	Anwendung und Szenarien	Leistungsverbesserungen
Leadframe-Paket	Kunststoffverpackungsform	Kunststoff-Verkapselungs-Epoxidharz (EMC) wird zur Herstellung von Verpackungshüllen wie DIP, QFP, SOIC usw. verwendet. Die Prozesstemperatur beträgt 150–200 °C und der Druck 520 MPa.	Härte HV 12001600, Lebensdauer 501 Millionen Mal, Toleranz ±0,01 mm.
	Formwerkzeug		
	Stanzform	Stanzen von Kupferlegierungs -Leitungsrahmen zur Bildung von TSOP- und SOIC-Pins mit einer Stanzfrequenz von 500–1000 Mal pro Minute.	Die Verschleißfestigkeit wird um das 510-fache erhöht, die Lebensdauer um das 35-fache

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

			verlängert und die Bildung von Stiftgraten reduziert.
Substratverpackung	Formpresswerkzeug	Formgepresste BGA-, LGA-, FCBGA-Gehäuse, gefüllt mit EMV-Schutzchips, Temperatur 175–200 °C, Druck 1030 MPa.	Millionen Mal, Oberflächenrauheit Ra 0,050,1 µm, Antihafte Wirkung.
	Trimmmatrix	Trimmen Sie den SiP- und FCBGA-Paketüberlauf, um eine Formgenauigkeit mit einer Genauigkeit von ±0,005 mm sicherzustellen.	Die Korrosionsbeständigkeit wird um das Fünffache verbessert, die Lebensdauer um das 35-fache verlängert und Überlaufdefekte werden reduziert.
Wafer Level Packaging (WLCSP)	Formpresswerkzeug	Fan-in/Fan-out-WLCSP-Paket, geformte Wafer-Level-EMV- oder RDL-Schicht, Temperatur 150–180 °C, Toleranz ±0,01 mm.	Die Lebensdauer beträgt 100–200 Millionen Mal und die Wärmeermüdungsbeständigkeit ist um 30 % verbessert.
	Stanzform	Prägen von Wafer-Level-Bumps (wie etwa C4-Bumps), unterstützt 50200 µm Pitch und eine Frequenz von 1000 Mal/Minute.	Härte HV 1000–1400, Lebensdauer 35-mal verlängert, konvexe Defektrate < 0,1 %.
Flip-Chip	Kunststoffform-Formwerkzeug	Kunststoffverkapselung von Flip-Chips (z. B. C4NP-Bumps), Schutz von Chip und Substrat, Temperatur 175–200 °C, Druck 1020 MPa.	Lebensdauer: 801,2 Millionen Mal, Temperaturbeständigkeit: 800 °C, Dimensionsstabilität um 20 % verbessert.
	Stanzform	Stanzen von Verbindungshöckern mit hoher Dichte (50150 µm Abstand) für die 3D-Chipintegration mit einer Genauigkeit von ±0,005 mm.	Die Verschleißfestigkeit wird um das 510-fache verbessert und die Formverschleißrate beträgt <0,001 mm³/N·m.
Spezialverpackungen	Kunststoffform-Formwerkzeug	Kunststoffversiegelte, hochtemperatur- und strahlungsbeständige Chips (z. B. Nuklearsensorchips), beständig gegen hohe Temperaturen (200–400 °C) und Korrosion (pH 210).	Lebensdauer: 501 Millionen Mal, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr, Strahlungshärtungsbeständigkeit <20 %.

Beispiele :

QFP-Gehäuse

eine WCCo- Kunststoffform (PVD- TiN -Beschichtung) verwendet, mit einer Härte von HV 1400 und einer Lebensdauer von 800.000 Mal, was dreimal höher ist als die einer Stahlform (20,3 Millionen Mal), und einer Toleranz von ±0,01 mm (Web-ID 15).

WLCSP-Paket

WCNi- Chip (Laserbeschichtung mit WCCoCr) unterstützt Fan-Out-WLCSP, Ra 0,05 µm ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Lebensdauer von 1,5 Millionen Zyklen und reduziert das EMC-Haften um 20 % (Web-ID 3) .

Kernchip

WCNi- Formen (CVD- CrN- Beschichtung) werden für die Verpackung nuklearer Sensoren verwendet, sind beständig gegen 400 °C und 10 dpa Bestrahlung, haben eine Lebensdauer von 1 Million Mal und eine 5-mal verbesserte Korrosionsbeständigkeit (Web-ID 28).

4. Vergleich der Vor- und Nachteile

Kategorie	Vorteil	Mangel
Hartmetall-Chip-Verpackungsform	Hohe Härte (HV 800–1600), 510-fach höhere Verschleißfestigkeit, 310-fache Lebensdauer gegenüber Stahlformen. Zähigkeit (K_IC 614 MPa·m ^{1/2}), Rissausbreitungsbeständigkeit, geeignet für Hochfrequenzstanzen. Hohe Temperaturbeständigkeit (400–900 °C) und Korrosionsbeständigkeit (pH 210), geeignet für Kunststoffversiegelungs- und Reinigungsprozesse. Hohe Präzision (Toleranz ±0,005 mm, Ra 0,050,2 μm) , erfüllt die Anforderungen moderner Verpackungen.	Hohe Herstellungskosten (Investition in Pulvermetallurgie und Präzisionsverarbeitungsanlagen: 100,5 Millionen RMB). Formen mit komplexer Geometrie sind schwierig zu verarbeiten und haben einen langen Zyklus (13 Monate). Formen mit hohem Co-Gehalt (> 15 Gew.-%) können die Zähigkeit verringern und erfordern eine Optimierung der Zusammensetzung. Oberflächenbeschichtungen können sich ablösen und erfordern regelmäßige Wartung.

5. Entwicklungstrends

Trend	Technische Leitung	Erwartete Ergebnisse
Neue Materialien	Nano- WCNi -Form (Korn <50 nm), Härte HV 1600, K_IC>12 MPa·m ^{1/2} .	Die Verschleißfestigkeit wird um 40 % erhöht, die Lebensdauer um das Zweifache verlängert und es ist für 3D-Verpackungen mit hoher Dichte geeignet.
Fortschrittliche Beschichtungen	DLC- und Graphen-Verbundbeschichtung, Reibungskoeffizient <0,1, Temperaturbeständigkeit 1000 °C, Antihafteffekt um 50 % verbessert.	Reduzieren Sie Formhaftungsfehler um 30 % und verbessern Sie die Verpackungsausbeute.
Präzisionsbearbeitung	Ultrapräzise Laserbearbeitung, Genauigkeit ±0,002 mm, Ra 0,020,05 μm .	Unterstützt fortschrittliche Verpackungen mit einem Abstand von 510 μm und verbessert so die Toleranzkontrolle um 50 %.
Intelligente Fertigung	KI optimiert das Formendesign und die Verarbeitungsparameter (Fehler <1 %) und überwacht den Verschleißstatus in Echtzeit.	Die Produktionseffizienz stieg um 30 % und die Kosten für die Formenwartung sanken um 20 %.
Strahlungsresistente Form	WC-Form aus Hochentropielegierung (HEA), beständig gegen 1050 dpa Bestrahlung, K_IC sinkt um <20 %.	Es erfüllt die Anforderungen an die Verpackung von Kernchips, verlängert die Lebensdauer um das Dreifache und verbessert die Korrosionsbeständigkeit um 50 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Fazit

Die Hartmetall-Chip-Verpackungsform verwendet WCCo und WCNi als Kernmaterialien. Durch Pulvermetallurgie, Präzisionsbearbeitung und Oberflächenbeschichtung (HVOF, Laserauftragschweißen, PVD/CVD) erreicht sie eine hohe Härte (HV 800–1600), hohe Zähigkeit (K_{IC} 614 MPa·m^{1/2}), Verschleißfestigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit (400–900 °C), um den Anforderungen von Leadframe-Verpackungen, Substratverpackungen, Wafer-Level-Verpackungen und Flip-Chip-Verpackungen gerecht zu werden. Die Formlebensdauer ist 310-mal so lang wie die von Stahlformen, und die Toleranz liegt bei ±0,005–0,01 mm. Sie wird häufig in Kunststoffverpackungen, Formpressen und Stanzprozessen eingesetzt. In speziellen Anwendungsbereichen (z. B. bei der Verpackung von Kernchips) weisen WCNi-Formen eine hervorragende Strahlungs- und Korrosionsbeständigkeit auf. In Zukunft werden Nanomaterialien, moderne Beschichtungen, ultrapräzise Bearbeitung und intelligente Fertigung die Anwendung von Hartmetallformen in den Bereichen hochverdichtete und fortschrittliche Verpackungen fördern und so effiziente und zuverlässige Lösungen für die Halbleiterindustrie bieten.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ASTM E92-23

Standardprüfverfahren für die Vickershärte und Knoophärte metallischer Werkstoffe

1. Geltungsbereich

1.1 Dieses Standardverfahren umfasst Anforderungen und Verfahren zur Bestimmung der Vickers- und Knoop-Härte metallischer Werkstoffe nach den Vickers- und Knoop-Eindringhärteprinzipien, einschließlich Anforderungen an die Validierung von Vickers- und Knoop-Härteprüfmaschinen und Prüfverfahren. 1.2 Dieses Standardverfahren umfasst zwei allgemeine Prüfungen:

1.2.1 Verifizierungs-, Labor- oder Schiedsprüfungen erfordern hohe Präzision.

1.2.2 Für Routineprüfungen kann eine geringere Präzision zulässig sein. 1.3 Diese Norm erhebt nicht den Anspruch, alle Sicherheitsbedenken, die mit ihrer Anwendung verbunden sind, zu berücksichtigen. Es liegt in der Verantwortung der Anwender dieser Norm, vor der Anwendung geeignete Sicherheits- und Gesundheitspraktiken zu etablieren und die geltenden gesetzlichen Beschränkungen zu prüfen. 1.4 Die in dieser Norm angegebenen Werte sind in SI-Einheiten angegeben und schließen andere Maßeinheiten nicht ein.

2. Referenzen

2.1 ASTM-Normen:

ASTM E3: Standardverfahren zur Vorbereitung metallurgischer Proben

ASTM E10: Standardprüfverfahren für die Brinellhärte metallischer Werkstoffe

ASTM E18: Standardprüfverfahren für die Rockwellhärte metallischer Werkstoffe

ASTM E384: Standardprüfverfahren für die Mikroindruckhärte von Materialien

ASTM E140: Umrechnungstabelle für Metalhärte, Standard 2.2, ISO-Standard:

ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren

ISO 6507-2: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 2: Prüfung und Kalibrierung von Prüfmaschinen 2.3 Weitere Normen:

keiner

3. Begriffe und Definitionen

3.1 Definitionen:

Vickershärte: Die Fähigkeit eines Materials, der durch das Eindringen eines Diamanten verursachten dauerhaften Verformung zu widerstehen. Der Härtewert wird anhand der Oberfläche des Eindrucks berechnet.

Knoop -Härte: Die Fähigkeit eines Materials, bleibenden Verformungen durch das Eindringen eines dünnen Diamanten zu widerstehen. Der Härtewert wird anhand der projizierten Fläche des Eindrucks berechnet.

Eindruckhärte: Die Eigenschaft eines Werkstoffs, einer bleibenden Verformung durch einen Eindringkörper unter einer bestimmten Belastung zu widerstehen. 3.2 Beschreibung der normspezifischen Begriffe:

Ein Eindringtest, der normalerweise mit einer Belastung zwischen 1 kgf und 120 kgf durchgeführt wird .

Mikroindruck: Ein Eindrucktest, der normalerweise mit einer Last von weniger als 1 kgf durchgeführt wird .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4. Zusammenfassung der Testmethoden

4.1 Bei der Härteprüfung nach Vickers wird eine bestimmte Last auf die Oberfläche eines Materials ausgeübt, mit einem Diamanteindringkörper mit quadratischer Unterseite eingedrückt, die diagonale Länge des Eindrucks gemessen und der Härtewert mithilfe der folgenden Formel berechnet:

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

Darunter HV HV HV ist der Vickershärtewert, P P P ist die aufgebrachte Last (Einheit: kgf), d d d ist die durchschnittliche diagonale Länge des Eindrucks (Einheit: mm). 4.2 Der Knoop-Härtetest verwendet einen schlanken Diamanteindringkörper. Die Formel zur Berechnung der Härte lautet:

$$HK = \frac{P}{C \cdot L^2}$$

Unter ihnen HK HK HK ist der Knoop-Härtewert, P P P ist die aufgebrachte Last (Einheit: kgf), L L L ist die Länge der längeren Diagonale (Einheit: mm) und C C C ist eine Konstante, die mit der Eindringkörpergeometrie zusammenhängt. 4.3 Dieses Verfahren umfasst Verfahren zur Überprüfung der Prüfmaschine und zur Kalibrierung von Standardhärteprüfblöcken.

5. Bedeutung und Verwendung

5.1 Diese Prüfverfahren werden häufig zur Bestimmung der Härte metallischer Werkstoffe eingesetzt. Diese Härte ist ein Wert, der mit Festigkeit, Duktilität und Verschleißfestigkeit in Zusammenhang steht. 5.2 Die Ergebnisse eignen sich für die Qualitätskontrolle, die Materialauswahl und Forschungszwecke in Branchen wie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Fertigungsindustrie. 5.3 Die ermittelten Härtewerte können zur Abschätzung anderer mechanischer Eigenschaften mithilfe von Umrechnungstabellen (z. B. ASTM E140) verwendet werden.

6. Prüfgeräte

6.1 Prüfmaschine: Härteprüfmaschine nach Vickers oder Knoop mit einem Lastbereich von 1 gf bis 120 kgf, einer Lastgenauigkeit von $\pm 1,0\%$ und korrekter Ausrichtung des Eindringkörpers. 6.2 Eindringkörper:

Vickers: Diamant-Eindringkörper mit quadratischem Boden und pyramidenförmiger Form und einem Öffnungswinkel von 136° .

Knoop: Ein länglicher Diamanteindringkörper mit einem Seitenverhältnis von etwa 7:1. 6.3

Messsystem: Ein optisches System mit mindestens 100-facher Vergrößerung und einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ auf der Diagonalen des Eindrucks. 6.4 Prüfblock: Ein Standardhärteprüfblock zur Maschinenkalibrierung, der einen großen Bereich an Härtewerten abdeckt.

7. Prüfkörper

7.1 Die Probe muss mit metallurgischen Vorbereitungstechniken (siehe ASTM E3) hergestellt werden, eine glatte Oberfläche aufweisen und frei von Kratzern oder Defekten sein. 7.2 Die Probendicke muss mindestens das 1,5-fache der diagonalen Länge der Vertiefung betragen, um

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rückwirkungen zu vermeiden.

8. Kalibrierung und Verifizierung

8.1 Maschinenüberprüfung: Wird jährlich oder nach der Wartung durchgeführt. Dabei werden Standardprüfblöcke verwendet, um die Lastanwendung, die Eindringkörperausrichtung und die Messgenauigkeit innerhalb von $\pm 1,0\%$ zu überprüfen. 8.2 Prüfblockkalibrierung: Wird mit auf nationale Standards rückführbaren Referenzmaschinen durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Härtewerte innerhalb von $\pm 1,0$ HV oder HK der zertifizierten Werte liegen.

9. Experimentelles Verfahren

9.1 Wählen Sie eine geeignete Last je nach Material und Prüfmethode (Makro- oder Mikroindenter). 9.2 Bringen Sie die Last auf die Probenoberfläche auf und halten Sie sie 10 bis 15 Sekunden lang. 9.3 Messen Sie die Diagonale des Eindrucks mit einem optischen System und berechnen Sie den Härtewert. 9.4 Wiederholen Sie den Test mindestens fünfmal an verschiedenen Stellen und notieren Sie den Durchschnittswert.

10. Berechnung

10.1 Berechnen Sie die Vickershärte (HV) und die Knoophärte (HK) mithilfe der in Abschnitt 4 angegebenen Formeln. 10.2 Bei Belastungen ≥ 1 kgf wird der Härtewert auf eine Ganzzahl gerundet; bei Belastungen < 1 kgf wird der Härtewert auf eine Dezimalstelle gerundet.

11. Berichte

11.1 Der Prüfbericht sollte Folgendes enthalten:

Identifizierung des Testmaterials.

Die Art des Tests (Vickers oder Knoop) und die angewandte Last.

Mittlerer Härtewert und Standardabweichung.

Datum des Tests und Name des Bedieners.

Kalibrierungsstatus der Maschine.

12. Genauigkeit und Voreingenommenheit

12.1 Präzision: Die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit von Härtemessungen sind last- und materialabhängig, mit einer typischen Standardabweichung von ± 2 HV oder HK unter kontrollierten Bedingungen. 12.2 Messabweichung: Da es sich bei der Härte um eine relative Messung handelt, kann keine eindeutige Messabweichung bestimmt werden, die Ergebnisse müssen jedoch innerhalb von $\pm 1,0\%$ mit dem zertifizierten Prüfblockwert übereinstimmen.

13. Schlüsselwörter

13.1 Härte; Eindruck; Knoop; Makroindenter ; Mikroindenter ; Vickers; metallische Werkstoffe.

14. Anhang

Anhang A1: Ergänzende Hinweise zur Eindringkörpergeometrie

A1.1 Geben Sie detaillierte Spezifikationen für Vickers- und Knoop-Eindringkörpergeometrien für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fertigungs- und Verifizierungszwecke an.

Anhang A2: Richtlinien für die Prüfung dünner Proben

A2.1 Besondere Überlegungen zum Testen dünner oder kleiner Proben zur Reduzierung von Substrateffekten.

15. Fußnoten

15.1 Diese Norm wird unter der festen Bezeichnung E92 veröffentlicht. Die unmittelbar auf die Bezeichnung folgende Zahl gibt das Jahr der erstmaligen Anwendung oder der letzten Überarbeitung an. Die Zahl in Klammern gibt das Jahr der letzten Bestätigung an. Das hochgestellte Epsilon (ϵ) weist auf eine redaktionelle Änderung seit der letzten Überarbeitung oder Bestätigung hin.

16. Genehmigung

Genehmigt am 1. Juli 2023 vom ASTM International Committee E28 on Mechanical Testing.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ASTM G65-23

Standardprüfverfahren für die Abriebprüfung von Metallen und Legierungen mit trockenem Sand/Gummirad

1. Geltungsbereich

1.1 Dieses Prüfverfahren umfasst Verfahren zur Bewertung der Verschleißfestigkeit von metallischen und legierten Werkstoffen mit einem Trockensand-/Gummiradgerät und ist auf Werkstoffe anwendbar, die trockenem abrasivem Verschleiß ausgesetzt sind. 1.2 Dieses Verfahren ist in erster Linie für Labortests vorgesehen, um die relative Verschleißfestigkeit von Werkstoffen wie Stahl, Gusseisen, Hartmetall und bestimmten beschichteten Werkstoffen in simulierten abrasiven Verschleißumgebungen zu vergleichen. 1.3 Die in dieser Norm angegebenen Werte sind in SI-Einheiten; Zoll-Pfund-Einheiten in Klammern dienen nur zu Referenzzwecken. 1.4 **Warnung** – Diese Norm erhebt nicht den Anspruch, alle Sicherheitsbedenken, falls vorhanden, in Bezug auf ihre Verwendung zu berücksichtigen. Es liegt in der Verantwortung der Person, die diese Norm anwendet, geeignete Sicherheits- und Gesundheitspraktiken festzulegen und vor der Verwendung geltende behördliche Beschränkungen zu ermitteln.

2. Referenzen

2.1 ASTM-Normen:

ASTM E29 Standardverfahren für die Verwendung signifikanter Zahlen in Testdaten zur Bestimmung der Konformität mit Spezifikationen

ASTM G40 Standarddefinitionen von Begriffen im Zusammenhang mit Verschleiß und Erosion

ASTM G105 Standardprüfverfahren für Nasssand-/Gummirad-Abriebprüfungen

ASTM E122 Standardverfahren zur Berechnung der Anzahl der Proben, die zur Bestimmung der durchschnittlichen Qualität einer Charge oder eines Prozesses erforderlich sind. 2.2 ISO-Standards:

ISO 28080 Beschichtungsstoffe und Lacke – Bestimmung der Abriebfestigkeit 2.3 Weitere Normen: Keine

3. Terminologie

3.1 Definitionen:

Abrasion – Der Vorgang des Materialabtrags durch die Einwirkung harter Partikel oder Oberflächen.

Volumenverlust – die durch Verschleiß von einer Probe abgetragene Materialmenge, ausgedrückt als Volumen pro Lasteinheit und Gleitstrecke ($\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

Gummirad – ein elastisches Rad, das im Prüfgerät verwendet wird, um die Schleifpartikel in Kontakt mit der Probe zu bringen. 3.2 Definitionen anderer in dieser Prüfmethode verwendeter Begriffe finden Sie in der Terminologie G40.

4. Zusammenfassung der Testmethoden

4.1 Bei dieser Prüfmethode wird eine Probe mit einem Strahl aus trockenem Quarzsand und einem rotierenden Gummirad unter einer festgelegten Last mittels eines Trockensand-/Gummiradgeräts abgerieben. Das verlorene Materialvolumen wird ermittelt und die Verschleißrate angegeben. 4.2 Die Prüfung wird üblicherweise mit einer festen Anzahl von Radumdrehungen (üblicherweise 600)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

durchgeführt. Die Verschleißrate wird anhand des Massenverlusts, der Probendichte, der aufgetragenen Last und der Gleitstrecke berechnet.

5. Bedeutung und Verwendung

5.1 Dieses Prüfverfahren bietet ein kontrolliertes Laborverfahren zur Bewertung der Verschleißfestigkeit von Materialien unter trockenen Sandbedingungen und simuliert dabei bestimmte abrasive Umgebungen. 5.2 Die Ergebnisse eignen sich für die Materialauswahl, Qualitätskontrolle und Forschung, insbesondere bei Komponenten, die abrasivem Verschleiß ausgesetzt sind, wie z. B. Bergbaumaschinen oder Förderanlagen. 5.3 Dieses Verfahren bildet das Verschleißverhalten unter tatsächlichen Betriebsbedingungen nicht exakt nach, kann aber zum Vergleich der relativen Leistungsfähigkeit von Materialien verwendet werden.

6. Prüfgeräte

6.1 Trockensand-/Gummiradgerät – Besteht aus einem Gummirad (Nenn Durchmesser 228,6 mm, Breite 12,7 mm), einem Schleifmittelzufuhrsystem und einem Hebelarm, der eine normale Last im Bereich von 13 N bis 130 N aufbringen kann, bei einer Radgeschwindigkeit von 200 ± 10 U/min. 6.2 Schleifmittel – Standard-Quarzsand mit einer Partikelgröße von 50 bis 70 Mesh, einer Mohshärte von etwa 7 und einem Wassergehalt von weniger als 0,1 %. 6.3 Waage – Analysewaage mit einer Genauigkeit von 0,1 mg. 6.4 Probenhaltevorrichtung – Konstruiert, um die Probe in einem Winkel von $90^\circ \pm 1^\circ$ zur Radfläche zu halten.

7. Prüfkörper

7.1 Die Probe muss ein rechteckiger Block sein, typischerweise mit den Abmessungen 76 mm Länge $\times$ 25 mm Breite $\times$ 6 mm Dicke und einer Oberflächenrauheit von $R_a < 0,8 \mu\text{m}$. 7.2 Die Kanten der Probe müssen abgeschrägt sein, um Absplitterungen zu vermeiden, und von Öl oder Verunreinigungen gereinigt werden.

8. Experimentelles Verfahren

8.1 Kalibrieren Sie das Gerät, überprüfen Sie den Zustand des Gummirads (auswechseln, wenn es mehr als 3 mm abgenutzt ist), kontrollieren Sie die Last und die Rotationsgeschwindigkeit (Genauigkeit $\pm 5\%$). 8.2 Wiegen Sie die saubere, trockene Probe (Genauigkeit auf 0,1 mg) und installieren Sie sie in der Einspannvorrichtung. 8.3 Stellen Sie die Last (normalerweise 45 N oder 130 N) und die Sanddurchflussrate (300 bis 400 g/min) ein und führen Sie 600 Umdrehungen aus (Gleitstrecke ungefähr 430 m). 8.4 Entfernen und reinigen Sie die Probe, wiegen Sie sie erneut, berechnen Sie den Masseverlust und wiederholen Sie den Test 3 bis 5 Mal, um die Reproduzierbarkeit sicherzustellen. 8.5 Berechnen Sie den Volumenverlust anhand der Probendichte, der aufgetragenen Last und der Gleitstrecke.

9. Berechnung

9.1 Berechnen Sie die volumetrische Verschleißrate (W_v) wie folgt:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中:

$$W_v = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S}$$

- * W_v = 体积磨损率, 单位为 $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$
- * Δm = 质量损失, 单位为 g
- * ρ = 试样密度, 单位为 g/mm^3
- * F = 法向力, 单位为 N
- * S = 滑动距离, 单位为 m 9.2 报告平均磨损率保留至小数点后两位。

10. Bericht

10.1 Der Bericht sollte die folgenden Informationen enthalten:

Identifizierung und Beschreibung des Testmaterials.

Wenden Sie Last, Sanddurchflussrate und Anzahl der Umdrehungen an.

Durchschnittliche volumetrische Verschleißrate und Standardabweichung.

Testdatum, Gerätenummer und Name des Bedieners.

Umgebungsbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) und Kalibrierungsstatus.

11. Präzision und Voreingenommenheit

11.1 Präzision – Die Wiederholbarkeit innerhalb eines einzelnen Labors beträgt typischerweise $\pm 5\%$ der mittleren Abriebrate; die Reproduzierbarkeit zwischen Laboren beträgt etwa $\pm 10\%$. 11.2 Messabweichung – Es gibt keinen absoluten Standard für die Messabweichung, aber die Ergebnisse sollten auf $<10\%$ mit dem Referenzmaterial übereinstimmen.

12. Schlüsselwörter

12.1 Verschleiß; trockener Sand; Gummirad; abrasiver Verschleiß; Metallmaterial; Verschleißfestigkeit

13. Anhang

Anhang A1. Empfohlene Schleifmittelspezifikationen

A1.1 Geben Sie detaillierte Informationen zur Partikelgrößenverteilung und den Reinheitsanforderungen von Quarzsand an, um die Konsistenz des Tests sicherzustellen.

Anhang A2. Prüfverfahren für Beschichtungsproben

A2.1 Richtlinien zum Prüfen von Beschichtungsmaterialien, einschließlich Empfehlungen zur Lastanpassung.

14. Fußnoten

14.1 Diese Norm wird unter der festen Bezeichnung G65 veröffentlicht. Die unmittelbar auf die Bezeichnung folgende Zahl gibt das Jahr der erstmaligen Übernahme oder der letzten Überarbeitung an, die Zahl in Klammern das Jahr der letzten Bestätigung. Das hochgestellte Epsilon (ϵ) weist auf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

redaktionelle Änderungen seit der letzten Überarbeitung oder Bestätigung hin.

15. Genehmigung

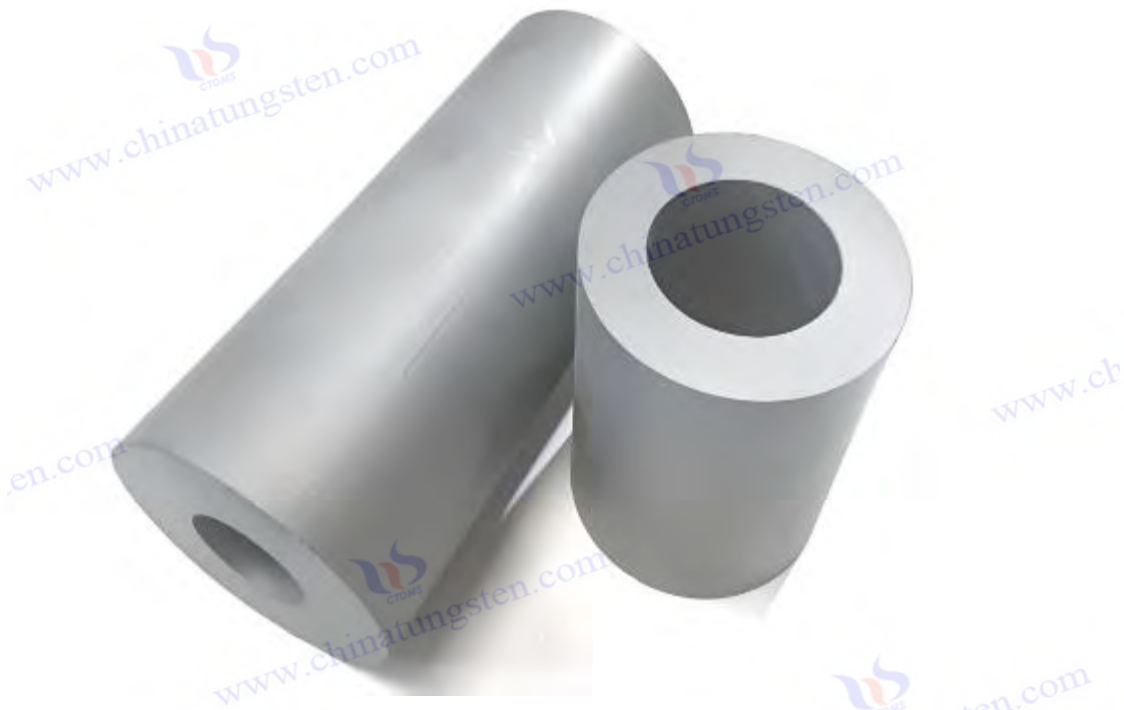
Genehmigt am 1. Juli 2023 vom ASTM International Committee G02 on Wear and Erosion.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Welche Arten und Anwendungsbereiche gibt es von Hartmetallformen ?

Hartmetall (mit Wolframkarbid-Kobalt-System, WC-Co, als Kern) hat eine hohe Härte (HV 1800–2000 ± 30), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate < 0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m), hohe Temperaturbeständigkeit (> 800 °C ± 20 °C) und Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate < 0,01 mm/Jahr ± 0,001 mm/Jahr), was es zu einem idealen Material für die Herstellung von Hochleistungsformen macht. Hartmetallformen werden durch pulvermetallurgische Verfahren (wie Sintern, heißisostatisches Pressen (HIP)) oder additive Fertigungstechnologien (wie selektives Laserschmelzen (SLM)) hergestellt und finden breite Anwendung in Industrieszenarien, die hohe Präzision, lange Lebensdauer und komplexe Geometrien erfordern. Im Folgenden werden Formtypen und Anwendungsbereiche aus professioneller Sicht genauer und detaillierter erläutert und Inhalte zum Thema Fahrzeuge mit neuer Antriebsenergie hinzugefügt.

1. Arten von Hartmetall-Matrizen

Hartmetallformen werden je nach Funktion, Struktur, Verarbeitungsobjekt und Materialverhältnis in verschiedene Typen unterteilt. Jeder Typ wird durch Präzisionsprozesse und Oberflächenbehandlungen optimiert, um spezifische industrielle Anforderungen zu erfüllen. Im Folgenden werden die Arten der Spezialerweiterung beschrieben:

Hartmetall-Stanzwerkzeuge

werden hauptsächlich zum Stanzen, Biegen, Ziehen oder Bördeln von Blechen verwendet. Gängige Verhältnisse sind WC-6%Co (niedriger Kobaltgehalt und hohe Härte) oder WC-10%Co (hohe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Zähigkeit).

Professionelle Funktionen :

Härtebereich HV 1800–1900 $\pm$ 30, Schlagzähigkeit 10–15 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ $\pm$ 1 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$, geeignet für Hochgeschwindigkeitsstanzen (Frequenz > 100 Mal/min $\pm$ 10 Mal/min, Belastung > 500 kN $\pm$ 50 kN).

Die Oberflächenrauheit Ra < 0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m wurde durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP, Druck 5–10 kPa $\pm$ 0,5 kPa) erreicht, und die Schnittgenauigkeit betrug < 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

Verschleißfestigkeit < 0,05 mm³/N $\cdot$ m $\pm$ 0,01 mm³/N $\cdot$ m, Zykluslebensdauer > 10⁶-fach $\pm$ 10⁴-fach, geeignet für hochfeste Stahlplatten (Zugfestigkeit > 1000 MPa $\pm$ 100 MPa).

Herstellungsverfahren :

Um die Kompaktheit (Porosität < 0,1 % $\pm$ 0,01 %, Mikrodefekte < 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m) sicherzustellen, wurde heißisostatisches Pressen (HIP, 1300 °C $\pm$ 10 °C, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) verwendet.

TiN-Beschichtung (Dicke 5–15 μ m $\pm$ 0,1 μ m, Härte HV 2000 $\pm$ 50) reduziert den Reibungskoeffizienten (< 0,2 $\pm$ 0,05).

Elektroerosive Bearbeitung (EDM, Stromstärke 5–20 A $\pm$ 1 A, Genauigkeit < 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm) zur Herstellung komplexer Stempel- und Matrizenkonturen.

Hartmetall-Ziehmatrizen

werden zum Kaltziehen, Tiefziehen oder Drücken von Metalldrähten, -rohren oder -platten verwendet, beispielsweise als Drahtziehmatrizen, Rohrziehmatrizen oder Tiefziehmatrizen. Üblicherweise werden WC-8%Co oder WC-6%Co-Ni (2% $\pm$ 0,5%) verwendet.

Professionelle Funktionen :

Verschleißfestigkeit < 0,05 mm³/N $\cdot$ m $\pm$ 0,01 mm³/N $\cdot$ m, Innenlochgüte Ra < 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m, Stützauszugsspannung > 2000 MPa $\pm$ 100 MPa (wie Edelstahldraht oder Kupferrohr).

Die geometrische Genauigkeitstoleranz beträgt < 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm, der Kegelwinkelfehler beträgt < 0,5° $\pm$ 0,1°, geeignet zum Feindrahtziehen (Durchmesser 0,1–5 mm $\pm$ 0,05 mm).

Thermische Stabilität < 600 °C $\pm$ 20 °C, Wärmeausdehnungskoeffizient < 6 $\times$ 10⁻⁶ /°C $\pm$ 0,5 $\times$ 10⁻⁶ /°C, wodurch die thermische Verformung verringert wird.

Herstellungsverfahren :

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. 1200–2000 $\pm$ 100, Genauigkeit < 0,005 mm $\pm$ 0,001 mm) kombiniert mit Ultraschallpolieren zur Kontrolle von Mikrorissen auf der Oberfläche (< 0,01 μ m $\pm$ 0,001 μ m).

TiC-Beschichtungen (Dicke 5–10 μ m $\pm$ 0,1 μ m, Bindungsstärke > 50 MPa $\pm$ 5 MPa) wurden durch chemische Gasphasenabscheidung (CVD, 800–1000 °C $\pm$ 10 °C, Dampfkonzentration 10–20 Vol.-% $\pm$ 1 Vol.-%) aufgebracht.

Durch die Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung 200–300 W $\pm$ 10 W) wird die gehärtete Schicht im Innenloch (Tiefe 0,05–0,1 mm $\pm$ 0,01 mm) optimiert.

Hartmetall-Kaltstauchgesenke

werden zum Kaltschmieden von Bolzen, Muttern, Nieten oder Befestigungselementen mit Zusammensetzungen wie WC-10 % Co oder WC-15 % Co-TiC (5 % $\pm$ 0,5 %) verwendet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Professionelle Funktionen :

Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Ermüdungsfestigkeit $>10^6\text{-fach} \pm 10^4\text{-fach}$, geeignet für hohe Verformungen ($>50\% \pm 5\%$) und vorübergehende Stoßbelastungen ($>1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$).

Oberflächenhärte HV 1900–2000 ± 30 , Verschleißfestigkeit $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Hohlraumgenauigkeit $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Thermische Stabilität $<500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Restspannung $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, verhindert Kaltrisse.

Herstellungsverfahren :

Durch Funkenplasmasintern (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) wurde eine Korngröße von $0,5\text{--}1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$ erreicht.

Eine Oberflächenhärtung (Laserleistung $300\text{--}500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$, Tiefe $0,1\text{--}0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) in Kombination mit einer VC-Dotierung ($0,1\% \text{--}0,5\% \pm 0,01\%$) verbessert die Rissbeständigkeit.

Zur Beseitigung innerer Spannungen wurde nach der Behandlung ein heißisostatisches Pressen (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) durchgeführt.

Warm Schmiedegesenke aus Hartmetall

werden zum Warm Schmieden von Hochtemperaturmetallen (wie Stahl, Titanlegierungen, Nickelbasislegierungen) mit einer Formulierung wie WC-10 % Co-TiC ($5\% \pm 0,5\%$) oder WC-12 % Co-TaC ($2\% \pm 0,1\%$) verwendet.

Professionelle Funktionen :

Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, Massenverlust $<0,01\% \pm 0,001\%$ bei $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, thermische Ermüdungsbeständigkeit, Zykluslebensdauer $>5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$.

Wärmeleitfähigkeit $>120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, geeignet zum Schmieden bei $900\text{--}1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Beständigkeit gegen thermische Hohlraumrisse (Risswachstumsrate $<0,001 \text{ mm/Zyklus} \pm 0,0001 \text{ mm/Zyklus}$).

Herstellungsverfahren :

HIP ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) mit TaC-Zusatz ($0,5\% \text{--}2\% \pm 0,1\%$) zur Verbesserung der Heißrissbeständigkeit, Porosität $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Die Oberfläche wird mit ZrN ($5\text{--}15 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$, Abscheidungsrate $0,1\text{--}0,5 \text{ }\mu\text{m/min} \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m/min}$) oder Al_2O_3 (Antioxidationsmittel, Dicke $10\text{--}20 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$) besprüht.

Durch Wärmebehandlung ($900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $2\text{--}4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) wird die Gewebegleichmäßigkeit optimiert.

Pressmatrizen aus Hartmetallpulver

werden zum Pressen von pulvermetallurgischen Produkten wie Zahnrädern, Lagern oder magnetischen Materialien verwendet. Üblicherweise werden WC-6%Co-Ni ($2\% \pm 0,5\%$) oder WC-8%Co-Cr ($3\% \pm 0,5\%$) verwendet.

Professionelle Funktionen :

Hohe Drucktragfähigkeit $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Verschleißfestigkeit $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, Hohlraumkomplexität unterstützt Tiefe von $10\text{--}50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Kompressionsverhältnis $>2:1 \pm 0,1$, Gleichmäßigkeit der Pulverfüllung $>95\% \pm 2\%$, Pressgenauigkeit $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Thermische Stabilität $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Beständigkeit gegen Pulverkorrosion ($<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,001 mm/Jahr).

Herstellungsverfahren :

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. 1500–3000 $\pm$ 100) kombiniert mit plasmagespritzter TiAlN-Beschichtung (Dicke 5–10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte HV 2800 $\pm$ 50).

HIP (1300 °C $\pm$ 10 °C, 150 MPa $\pm$ 5 MPa) optimierte Mikrostruktur mit Korngröße von 0,5–1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Durch die Oberflächentexturierung mittels Laser (Tiefe 5–10 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) werden die Fließfähigkeit und die Entformungseigenschaften des Pulvers verbessert.

Hartmetall-Kunststoffformen

werden zum Spritzgießen von Thermoplasten (wie ABS, PC) oder Duroplasten (wie Epoxidharz) mit einer Formel wie WC-8 % Co-Cr (2 % $\pm$ 0,5 %) oder WC-10 % Co-Ni (3 % $\pm$ 0,5 %) verwendet.

Professionelle Funktionen :

Hitzebeständigkeit >400°C $\pm$ 10°C, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr (Korrosionsbeständigkeit durch Kunststoffzusätze), Oberflächengüte Ra <0,2 $\mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

Beständig gegen Hochdruck-Spritzguss (>100 MPa $\pm$ 10 MPa), Hohlraumgenauigkeit <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm, geeignet für komplexe Fließkanalkonstruktionen (Länge 50–200 mm $\pm$ 5 mm).

Der Wärmeausdehnungskoeffizient beträgt $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, wodurch die Verformung durch Wärmezyklen reduziert wird (<0,01 mm $\pm$ 0,001 mm).

Herstellungsverfahren :

Die Formkavität wurde durch Elektrofunkkenbearbeitung (EDM, Stromstärke 10–30 A $\pm$ 1 A, Genauigkeit < 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm) hergestellt.

- Beschichtung aus CrN (5–10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte HV 2000 $\pm$ 50) reduziert die Kunststoffhaftung und wird mit Polieren kombiniert (Ra <0,1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Durch Wärmebehandlung und Anlassen (400°C $\pm$ 10°C, 1–2 h $\pm$ 0,1 h) werden innere Spannungen beseitigt.

Hartmetall-Extrusionsdüsen

werden für die kontinuierliche Extrusion von Metallen oder Kunststoffen, wie beispielsweise Aluminiumprofilen oder Gummidichtungstreifen, mit einer Formulierung wie WC-10 % Co-VC (0,5 % $\pm$ 0,1 %) verwendet.

Professionelle Funktionen :

Verschleißfestigkeit <0,05 mm³ / N $\cdot$ m $\pm$ 0,01 mm³ / N $\cdot$ m, Extrusionsverformungsfestigkeit >2000 MPa $\pm$ 100 MPa, Matrizengenauigkeit <0,02 mm $\pm$ 0,002 mm.

Geeignet für Langstreckenextrusion (>10 m $\pm$ 1 m), Extrusionsgeschwindigkeit 1–5 m/min $\pm$ 0,1 m/min, Temperaturstabilität <500°C $\pm$ 20°C.

Reibungskoeffizient <0,1 $\pm$ 0,01, verringerte Materialhaftung (Haftkraft <0,5 N $\pm$ 0,05 N).

Herstellungsverfahren :

Präzisionsschleifen und HIP (1300 °C $\pm$ 10 °C, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) gewährleisten innere Homogenität mit einer Porosität von <0,1 % $\pm$ 0,01 %.

Oberflächenbeschichtung MoS₂ (1–5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Abscheidungsrate 0,2–0,5 $\mu\text{m} / \text{min} \pm 0,05 \mu\text{m} / \text{min}$) reduziert die Reibung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durch die Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung 200–400 W $\pm$ 10 W) wird die Formhärtungsschicht (Tiefe 0,1–0,2 mm $\pm$ 0,01 mm) optimiert.

Hartmetall-Schneidmatrizen

werden zum Präzisionsschneiden von Metallblechen oder dünnen Blechen verwendet, mit einer Formulierung wie WC-6%Co-TiC (3 % $\pm$ 0,5 %).

Professionelle Funktionen :

Schneidschärfe: Schneidkraft $<0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$, Verschleißlebensdauer $>10^5 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$, Schneidkantenglätte $Ra <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Genauigkeit $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Schlagzähigkeit $10\text{--}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, geeignet zum Stanzen dünner Bleche (Dicke $0,05\text{--}1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Thermische Stabilität $<400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, reduzierte Wärmeeinflusszone ($<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Herstellungsverfahren :

Laserschneiden (Leistung 200–300 W $\pm$ 10 W, Genauigkeit $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) kombiniert mit PVD- ZrN- Beschichtung ($5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP, Druck $5\text{--}10 \text{ kPa} \pm 0,5 \text{ kPa}$) wird die Schneide mit einer Rauheit von $Ra <0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ optimiert.

Durch Niedertemperaturtempern ($300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) wird die Struktur stabilisiert.

Für den Druckguss von Nichteisenmetallen (wie Zink- und Magnesiumlegierungen) werden **Hartmetall-Druckgussformen mit einer Zusammensetzung wie WC-12 % Co-TaC (2 % $\pm$ 0,1 %) verwendet.**

Professionelle Funktionen :

Thermische Ermüdungsbeständigkeit $> 4000\text{--}400$ -fach, Korrosionsbeständigkeit gegenüber geschmolzenem Metall $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, Formhohlraumdruckbeständigkeit $> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Wärmeleitfähigkeit $> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, geeignet für Druckguss bei $600\text{--}800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Die Genauigkeit der Formkavität beträgt $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ und die Oberflächenrauheit beträgt $Ra <0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

Herstellungsverfahren :

$C \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) in Kombination mit einer Mehrlagenbeschichtung aus $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (Dicke $10\text{--}20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, Härte $\text{HV } 3000 \pm 50$).

Elektroerosion (EDM, Genauigkeit $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) werden komplexe Formhohlräume hergestellt, gefolgt von einer Nachbearbeitung und Politur.

Durch Wärmebehandlungsglühen ($700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $2\text{--}3 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) werden Eigenspannungen reduziert.

Hartmetallwalzbacken

werden zum Rollformen von Metallblechen oder -stangen mit einer Zusammensetzung wie WC-10 % Co-Cr (3 % $\pm$ 0,5 %) verwendet.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Professionelle Funktionen :

Rollverschleißfestigkeit $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Ermüdungsfestigkeit $>10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach, Dickentoleranz der Rollgenauigkeit $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, thermische Stabilität $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Walzgeschwindigkeit $1\text{--}10 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$.

Oberflächenhärte HV 1900–2000 ± 30 , reduzierte Walzstruktur (Höhe $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$).

Herstellungsverfahren :

, um die Korngröße ($0,5\text{--}1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) zu optimieren .

Oberflächenhärtung (Laserleistung $400\text{--}600 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$, Tiefe $0,2\text{--}0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

PVD-beschichtetes TiN ($5\text{--}15 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$) verbessert die Haltbarkeit .

2. Anwendungsgebiete von Hartmetallformen

Aufgrund ihrer hervorragenden physikalischen und chemischen Eigenschaften haben Hartmetallformen ein breites Anwendungspotenzial in zahlreichen Industriebereichen gezeigt. Die folgenden Anwendungsbereiche werden professionell erweitert, einschließlich des neu hinzugekommenen Bereichs für Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnologie:

Automobilbau

Anwendungen : Hartmetall-Stanzwerkzeuge werden zum Stanzen von Karosserieteilen (Dicke $0,5\text{--}3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), Kaltstauchwerkzeugen für Schrauben und Muttern (Durchmesser $5\text{--}20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$), Warmschmiedewerkzeugen für Kurbelwellen, Pleuelstangen und Zahnräder (Gewicht $1\text{--}10 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$), Druckgusswerkzeugen für Zylinderblöcke und Getriebegehäuse (Volumen $0,5\text{--}5 \text{ l} \pm 0,1 \text{ l}$), Walzwerkzeugen zum Formen von Stahlblechen (Dicke $1\text{--}5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) verwendet.

Vorteile : Verbesserte Produktionseffizienz ($>20 \% \pm 2 \%$), verlängerte Lebensdauer der Form um das bis zu 10^6 -fache $\pm 10^4$. Reduziert die Anzahl der Hübe und die Wartungskosten ($<5 \% \pm 1 \%$) und unterstützt die Verarbeitung von hochfestem Stahl ($>1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Luft- und Raumfahrtindustrie

Anwendungen : Hartmetall-Warmschmiedegesenke werden zum Formen von Rotorblättern und Strukturteilen aus Titanlegierungen (Temperatur $900\text{--}1100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$), Ziehgesenke zum Verarbeiten von hochfesten Rohren und Wabenstrukturen aus Aluminiumlegierungen (Durchmesser $10\text{--}50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), Extrusionsgesenke zum Herstellen von Verbindungselementen für die Luftfahrt (Länge $20\text{--}100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$) und Druckgussgesenke zum Herstellen von Rumpfteilen aus Magnesiumlegierungen (Gewicht $0,5\text{--}2 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$) verwendet.

Vorteile : Hohe Temperaturermüdungsbeständigkeit (> 5000 -fach ± 500 -fach), hohe Präzision (Toleranz $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), geringes Gewicht (Dichte $< 2,7 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) und hohe Temperaturoxidationsbeständigkeit ($<0,01 \% \pm 0,001 \%$).

Elektronikindustrie

Anwendungen : Pressmatrizen aus Hartmetallpulver werden zum Pressen von Mikromotorkernen (Dicke $0,2\text{--}0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$), Kunststoffformen zur Herstellung von Handygehäusen und -steckern (Größe $100\text{--}150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), Trimmmatrizen zur Verarbeitung von Leiterplatten (Dicke

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,1–0,3 mm $\pm$ 0,01 mm) und Extrusionsmatrizen zur Drahtformung (Durchmesser 0,05–1 mm $\pm$ 0,01 mm) verwendet.

Vorteile : Hochpräzises Formen ($<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), hervorragende Oberflächenqualität ($R_a < 0,2$ μ m $\pm$ 0,02 μ m), kurzer Produktionszyklus (<1 h/Stück $\pm$ 0,1 h) und hohe Nutzungsfrequenz ($>10^4$ -mal $\pm$ 10^3 -mal).

Maschinenbau und Formenbau

Anwendungen : Hartmetall-Ziehmatrizen zum Drahtziehen (Durchmesser 0,1–5 mm $\pm$ 0,05 mm), Stanzmatrizen für die Zahnrad- und Lagerbearbeitung (Hohlraumtiefe 10–30 mm $\pm$ 1 mm), Kaltstauchmatrizen für Präzisionswellen (Durchmesser 2–10 mm $\pm$ 0,1 mm), Walzmatrizen für Stahlstangen (Durchmesser 5–20 mm $\pm$ 0,5 mm), Druckgussmatrizen für komplexe Gussteile (Gewicht 0,1–5 kg $\pm$ 0,1 kg).

Vorteile : Längere Lebensdauer ($>10^6$ m $\pm$ 10^4 m Zuglänge), reduzierte Wechselhäufigkeit (>50 % $\pm$ 5 %), verbesserte Produktionskonsistenz (Abweichung <1 % $\pm$ 0,1 %), Unterstützung für Materialien mit hoher Härte ($>HRC$ 50 $\pm$ 2).

Herstellung medizinischer Geräte

Anwendungen : Hartmetall-Kunststoffformen werden zum Formen von medizinischen Spritzen und Kathetern (Wandstärke 0,1–0,3 mm $\pm$ 0,01 mm), Kaltstauchformen zur Herstellung von orthopädischen Schrauben und Marknägeln (Durchmesser 2–6 mm $\pm$ 0,1 mm), Trimmformen zur Verarbeitung von chirurgischen Klingen (Dicke 0,05–0,1 mm $\pm$ 0,005 mm), Extrusionsformen zum Formen von Kathetern (Innendurchmesser 0,5–2 mm $\pm$ 0,05 mm), Pulverpressformen zur Herstellung künstlicher Gelenkkomponenten (Gewicht 0,1–0,5 kg $\pm$ 0,05 kg) verwendet.

Vorteile : Biokompatible Beschichtung (z. B. Ag, antibakterielle Rate >90 % $\pm$ 2 %), hohe Präzision ($<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), erfüllt Sterilitätsanforderungen (bakterielle Belastung <10 KBE/cm² $\pm$ 1 KBE/cm²), Lebensdauer $>10^5$ -mal $\pm$ 10^4 -mal.

Energie und Schwerindustrie

Anwendungen : Hartmetall-Warmschmiedegesenke werden für Rotorblattverbinder von Windkraftanlagen (Durchmesser >500 mm $\pm$ 10 mm), Pulverpressgesenke für verschleißfeste Teile (wie Pumpenkörper, Gewicht 5–20 kg $\pm$ 1 kg), Extrusionsgesenke für Ölbohrrohre (Durchmesser 50–100 mm $\pm$ 2 mm), Druckgussgesenke für Ventilkörper von Kernkraftwerken (Gewicht 10–50 kg $\pm$ 2 kg) und Walzgesenke für die Schienenverarbeitung (Breite 100–150 mm $\pm$ 2 mm) verwendet.

Vorteile : Hohe Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen ($<0,01$ % $\pm$ 0,001 % bei 800 °C $\pm$ 20 °C), Druckfestigkeit (>4000 MPa $\pm$ 100 MPa), verlängerte Lebensdauer ($>10^4$ h $\pm$ 10^3 h), Unterstützung für extreme Umgebungen (Druck >200 MPa $\pm$ 10 MPa).

Konsumgüterherstellung

Anwendung : Hartmetall-Kunststoffformen werden für Gehäuse von Haushaltsgeräten (z. B. Fernsehgehäuse, Größe 500–1000 mm $\pm$ 10 mm) und Küchengeschirrformen (Dicke 0,5–2 mm $\pm$ 0,1 mm), Beschnittformen für die Verarbeitung von dekorativen Metallteilen (Dicke 0,1–0,5 mm $\pm$ 0,01 mm), Extrusionsformen für die Herstellung von Tür- und Fensterprofilen aus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aluminiumlegierungen (Länge 3–6 m $\pm$ 0,1 m) verwendet.

Vorteile : Hohe Oberflächengüte ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$), hohe Produktionseffizienz (> 50 Stück/h ± 5 Stück/h) und geringe Nacharbeitsrate ($< 2 \% \pm 0,5 \%$).

Gebäude und Infrastruktur

Anwendungen : Hartmetall-Walzmatrizen zum Formen von Stahlstangen (Durchmesser 6–40 mm $\pm 0,5$ mm), Pulverpressmatrizen zur Herstellung von Betonfertigteile-Formteilen (Gewicht 10–30 kg ± 1 kg), Extrusionsmatrizen zur Verarbeitung von Aluminium-Fensterrahmen (Länge 1–3 m $\pm 0,05$ m), Druckgussmatrizen zur Herstellung von Baubeschlägen (Gewicht 0,5–2 kg $\pm 0,1$ kg).

Vorteile : Lebensdauer ($> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$), hohe Präzision ($< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$), Unterstützung für Großserienproduktion (> 1000 Stück/Tag ± 100 Stück).

Verteidigungs- und Militärindustrie

Anwendungen : Hartmetall-Warmschmiedegesenke werden zum Formen von Panzerplatten (Dicke 10–50 mm ± 1 mm), Kaltstauchgesenke zum Herstellen von Granatenhülsen (Durchmesser 20–100 mm ± 2 mm), Ziehgesenke zum Bearbeiten von Raketenhülsen (Länge 0,5–2 m $\pm 0,05$ m) und Druckgussgesenke zum Herstellen von Radarkomponenten (Gewicht 1–5 kg $\pm 0,2$ kg) verwendet.

Vorteile : Hohe Temperaturermüdungsbeständigkeit ($> 10^4$ -fach $\pm 10^3$ -fach), Schlagfestigkeit ($> 500 \text{ J/cm}^2 \pm 50 \text{ J/cm}^2$), entspricht Militärstandards (MIL-STD-810).

Anwendung im Bereich der Fahrzeuge mit neuer Antriebsenergie

Angesichts der rasanten Entwicklung der Branche für Fahrzeuge mit neuer Antriebsenergie (NEV) spielen Hartmetallformen eine unersetzliche Rolle bei der Herstellung von Schlüsselkomponenten für Elektrofahrzeuge.

Hartmetall-Stanzwerkzeuge

Wird zum Stanzen und Formen von Batteriegehäusen (Dicke 0,8–2 mm $\pm 0,1$ mm, wie z. B. Lithium-Eisenphosphat-Batterien oder ternäre Lithium-Batteriegehäuse) und Karosseriestrukturteilen (wie z. B. Fahrgestellschutzplatten, Größe 1000–2000 mm ± 10 mm) verwendet, Stanzkraft $> 1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$.

Hartmetall-Kaltstauchmatrizen

Fertigen Sie Hochspannungssteckverbinder (5–15 mm $\pm 0,2$ mm Durchmesser) und Motorrotorwellen (10–30 mm $\pm 0,5$ mm Durchmesser), unterstützen Sie hochfeste Befestigungselemente ($> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) und eine Verformungsrate von $> 40 \% \pm 5 \%$.

Hartmetall-Warmschmiedegesenk

Wird zum Warmformen von Stromkollektoren für Leistungsbatterien (z. B. Kupfer-/Aluminiumfolie, Dicke 0,1–0,2 mm $\pm 0,01$ mm) und Motorstatorgehäusen (Gewicht 5–15 kg $\pm 0,5$ kg) verwendet, Verarbeitungstemperatur 600–900 °C ± 50 °C, Belastung $> 2000 \text{ kN} \pm 200 \text{ kN}$.

Hartmetall-Strangpressmatrize

Verarbeitung von Batterierahmen aus Aluminiumlegierung (Querschnitt 50–100 mm² ± 2 mm²) und Wärmeableitungsrohren (Länge 1–3 m $\pm 0,05$ m), Extrusionsgeschwindigkeit 0,5–2 m/min $\pm 0,1$ m/min, Druck $> 1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Hartmetall - Druckgussform

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herstellung von Motorgehäusen (Gewicht 10-30 kg $\pm$ 1 kg) und Chargersäulengehäusen (Größe 300-500 mm $\pm$ 5 mm), Druckfestigkeit >1200 MPa $\pm$ 100 MPa, Gießtemperatur 650-750°C $\pm$ 50°C.

Hartmetall-Abgratmatrizen

Wird zum Präzisionsschneiden von Batteriepolstücken (Dicke 0,08–0,15 mm $\pm$ 0,005 mm) und zum Stanzen von Kabelbaumklemmen (Länge 10–50 mm $\pm$ 0,5 mm) verwendet, Schneidkraft $<0,5$ N $\pm$ 0,05 N, Genauigkeit $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm.

Vorteile von Hartmetall-Stanzwerkzeugen

Hohe Präzision und Konsistenz : Formgenauigkeit $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm, wodurch die Montagetoleranz des Batteriemoduls ($<0,05$ mm $\pm$ 0,01 mm) sichergestellt wird, die Energiedichte verbessert wird (>160 Wh /kg $\pm$ 10 Wh /kg) und die Batteriezellenkonsistenz >98 % $\pm$ 1 %.

Verschleißfestigkeit und lange Lebensdauer : Formverschleißlebensdauer $> 10^6$ -mal $\pm 10^4$. Es reduziert die Austauschhäufigkeit (> 60 % ± 5 %), senkt die Produktionskosten (< 10 % ± 1 %) und unterstützt eine kontinuierliche Produktion von > 500 h ± 50 h.

Hohe Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit : Warmschmiedegesenke sind beständig gegenüber Umgebungstemperaturen von 900 °C ± 50 °C, elektrolytkorrosionsbeständig ($<0,01$ mm/Jahr $\pm 0,001$ mm/Jahr, wie etwa Lithiumsalzlösung pH 7–9) und weisen eine verlängerte Lebensdauer ($> 10^4$ h $\pm 10^3$ h) auf.

Leichtbauunterstützung : Durch die Kombination einer hochfesten Aluminiumlegierung (> 300 MPa ± 20 MPa) und einer Magnesiumlegierung (> 200 MPa ± 10 MPa) kann das Gewicht um 10–15 % ± 2 % reduziert, die Reichweite erhöht (> 500 km ± 20 km) und die NEFZ-Standards erfüllt werden .

Effiziente Produktion : Stanz- und Druckgussleistung > 50 Stück/h ± 5 Stück/h, Verkürzung des Produktionszyklus von Fahrzeugteilen für Fahrzeuge mit neuer Energie (< 2 h/Stück $\pm 0,1$ h), Unterstützung der Massenproduktion im großen Maßstab ($> 10^4$ Fahrzeuge/Jahr $\pm 10^3$ Fahrzeuge).

Technische Herausforderungen und Lösungen :

Herausforderungen : Gehäuse von Hochspannungsbatterien neigen beim Stanzen zu Mikrorissen (Länge $<0,1$ mm $\pm 0,01$ mm), thermische Spannungen (>200 MPa ± 20 MPa) beim Warmschmieden führen zu Verformungen und Druckgussformen werden durch geschmolzenes Metall leicht korrodiert (Erosionsrate $<0,02$ mm/Jahr $\pm 0,002$ mm/Jahr).

Lösung : Optimieren Sie die PVD- TiAlN- Beschichtung (Dicke 10–20 μ m $\pm 0,2$ μ m , Härte HV 3200 ± 50) der Stanzform, um die Rissbeständigkeit zu verbessern, verwenden Sie ein vorgewärmtes Substrat (200–400 °C ± 10 °C), um die thermische Spannung zu verringern, und führen Sie nachträglich ein HIP-Verfahren (1300 °C ± 10 °C, 200 MPa ± 5 MPa) durch, um die innere Struktur zu verbessern. Geben Sie der Druckgussform TaC (2 % $\pm 0,1$ %) hinzu, um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern, und verlangsamen Sie die Erosion durch eine Al₂O₃-Beschichtung (Dicke 15–25 μ m $\pm 0,2$ μ m) .

Entwicklungstrend : Mit der Entwicklung der Feststoffbatterie- und Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie müssen Hartmetallformen ihre Hochtemperaturbeständigkeit (> 1000 °C ± 50 °C) und ihre Beständigkeit gegen elektrochemische Korrosion ($< 0,005$ mm/Jahr $\pm 0,001$ mm/Jahr) weiter verbessern. Zudem muss die 3D-Drucktechnologie (SLM, Schichtdicke 20–

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) erforscht werden, um komplexe Batterierahmenformen herzustellen, die ein Gradientendesign mit mehreren Materialien unterstützen (Härtegradient 1800–2200 HV ± 50).

3. Zukünftige Entwicklungsrichtung von Hartmetallformen

Materialoptimierung : Entwicklung von Formulierungen mit niedrigem Kobaltgehalt (z. B. WC-Ni-Cr, Co < 5 % $\pm 0,5$ %) oder Nanokompositen (WC-Partikelgröße < 100 nm ± 10 nm), um die Zähigkeit und Biokompatibilität zu verbessern .

Prozessinnovation : Einführung der 3D-Drucktechnologie (SLM, Schichtdicke 20–50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) zur Herstellung komplexer Formen, kombiniert mit einer HIP-Nachbehandlung (1300 °C ± 10 °C) zur Reduzierung der Porosität (<0,1 % $\pm 0,01$ %).

Intelligent : Integrierte Sensoren überwachen die Formspannung (<50 MPa ± 5 MPa) und Temperatur (<600 °C ± 10 °C) für eine vorausschauende Wartung.

Nachhaltigkeit : Verwendung von recyceltem Hartmetallpulver (Wiederverwendungsrate >90 % ± 2 %) und Verfahren mit geringem Energieverbrauch (Energieverbrauch <10 kWh/kg ± 1 kWh/kg). Die Anwendung von Hartmetallformen in der Industrie nimmt stetig zu. Ihre Hochleistungseigenschaften unterstützen die Anforderungen verschiedener Branchen, von der Automobilindustrie über die Landesverteidigung bis hin zu Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Insbesondere das rasante Wachstum im Bereich der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben hat die Entwicklung der Formentechnologie hin zu hoher Präzision, hoher Effizienz und umweltfreundlicher Fertigung vorangetrieben. In den nächsten fünf bis zehn Jahren werden weitere technologische Durchbrüche erwartet.

4. Relevante Normen für Hartmetallformen

Gemeinsame Industriestandards

Technische Bedingungen und Normen

Die Herstellung und Verwendung von Hartmetallmatrizen erfolgt üblicherweise gemäß den „**Technischen Bedingungen für Hartmetall-Ziehmatrizen**“ (Record No.: 8261-2001), die vom State Machinery Industry Bureau verwaltet werden. Diese Norm legt die Materialeigenschaften, Maßgenauigkeit, Verschleißfestigkeit und Lebensdauer der Ziehmatrizen fest und gilt für die Herstellung und Prüfung von Drahtziehmatrizen.

Anforderungen an die Materialeistung

Hartmetallformen müssen die Anforderungen an hohe Härte (HV 1800–2000 ± 30), hohe Verschleißfestigkeit (Verschleißrate < 0,05 mm³/N·m $\pm 0,01$ mm³/N·m) und hohe Zähigkeit (Bruchzähigkeit 10–15 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}) erfüllen, die in der Industrie weit verbreitet sind.

Nationale oder internationale Normen

Bei der Herstellung von Hartmetallformen wird häufig auf die „**Allgemeinen technischen Bedingungen für Hartmetall GB/T 5242-2006**“ verwiesen, die die Anforderungen an Zusammensetzung, Leistungsprüfung und Qualitätskontrolle von Hartmetallmaterialien abdecken und für die Auswahl der Rohstoffe im Formenbau geeignet sind.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO -Normen : ISO-Normen wie ISO 513 (Klassifizierung von Schneidwerkzeugmaterialien) und ISO 28080 (Eigenschaftsprüfung von Hartmaterialien) können als Referenz für die Konstruktion von Hartmetallformen verwendet werden, insbesondere bei Export- oder internationalen Kooperationsprojekten.

Industrielle Anwendungsstandards

Stanzform Standard

Bei Stanzwerkzeugen aus Hartmetall verweist die Industrie häufig auf die „**Technischen Bedingungen für Stanzwerkzeuge JB/T 8144-2010**“, in denen die Anforderungen an die Konstruktion, den Wärmebehandlungsprozess und die Oberflächenbehandlung des Werkzeugs festgelegt sind, um eine hohe Präzision (Toleranz $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) und lange Lebensdauer ($> 10^6$ -faches $\pm 10^4$ -faches des Impulses) sicherzustellen.

Pulvermetallurgie-Matrizenstandard

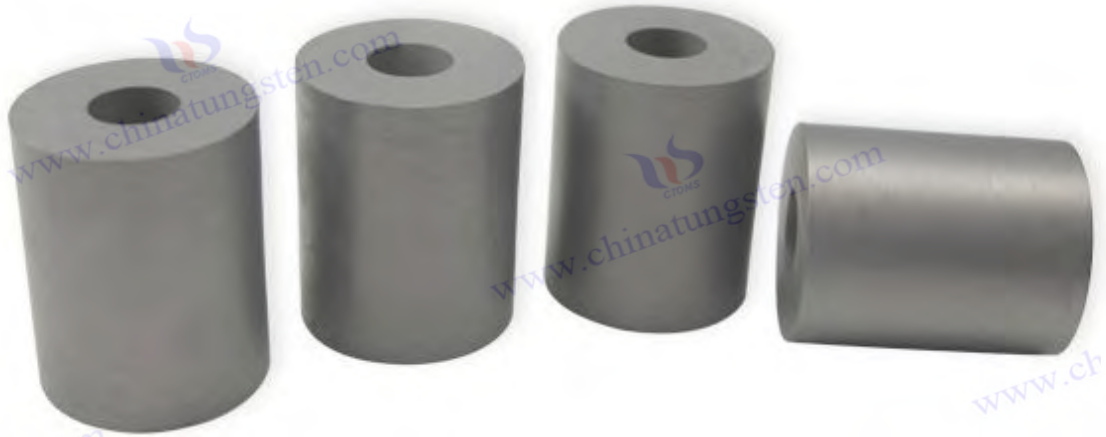
Hartmetallformen im Bereich der Pulvermetallurgie können den „**Technischen Bedingungen für Pulvermetallurgieformen YB/T 5136-2006**“ folgen, wobei die Genauigkeit der Formhohlräume ($< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$) und die Druckfestigkeit ($> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) im Vordergrund stehen.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



JB/T 8144-2010 Technische Anforderungen an Stanzwerkzeuge

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Bedingungen für Stanzwerkzeuge fest, einschließlich Materialauswahl, Konstruktionsanforderungen, Herstellungsprozess, technischer Leistung, Prüfmethoden, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung. Sie gilt für Kaltstanzwerkzeuge für verschiedene Metallplatten (z. B. Stahlplatten, Aluminiumplatten, Edelstahlplatten) und nichtmetallische Werkstoffe (z. B. Kunststoffe und Gummi), einschließlich Einprozesswerkzeugen, Verbundwerkzeugen und Mehrprozesswerkzeugen. Sie wird häufig in der Automobil-, Elektronik-, Luft- und Raumfahrtindustrie und anderen Branchen eingesetzt.

2. Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für alle referenzierten Dokumente mit Datum gelten nachfolgende Änderungen (ausgenommen Korrekturen) oder Überarbeitungen nicht für diese Norm. Es wird jedoch empfohlen, die neue Version des Dokuments entsprechend den Forschungsergebnissen zu übernehmen.

GB/T 5242-2006 Allgemeine Spezifikationen für Hartmetall

GB/T 6110-2021 Ziehsteine - Bauarten und Abmessungen von Hartmetall-Ziehsteinen

《JB/T 3943-2017 Ziehstein Hartmetall-Ziehstein – Technische Daten》

GB/T 1804-2000 Toleranzen und Passungen - Grenzabweichungen und Grundabweichungen von Längenmaßen

3. Begriffe und Definitionen

Stanzform: Ein Werkzeug, mit dem Material durch Druck in die gewünschte Form gebracht wird. Es umfasst eine Matrize, einen Stempel und eine Führung.

Prägelebensdauer: Die Fähigkeit der Form, bei einer bestimmten Anzahl von Prägevorgängen eine stabile Leistung aufrechtzuerhalten.

Montagegenauigkeit: die Passungstoleranz und relative Positionsgenauigkeit zwischen den verschiedenen Komponenten der Form.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4. Materialanforderungen

4.1 Formmaterial

Hartmetallmaterial: WC-Co-System (z. B. WC-6 % Co, WC-10 % Co), Härte HV 1800–2000 $\pm$ 30, Druckfestigkeit $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Stahl: Cr12MoV, D2 oder H13 Stahl, Härte HRC 58-62 $\pm$ 2, vergütet.

Nicht funktionierende Teile: Hergestellt aus 45#-Stahl oder Q235-Stahl, Härte HRC 30–40 $\pm$ 2 nach Wärmebehandlung.

4.2 Leistungsanforderungen

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 GB/T 12444.

Hitzebeständigkeit: Betriebstemperatur $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Ermüdungsbeständigkeit: Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach, Prüfung gemäß GB/T 3075.

4.3 Oberflächenbehandlung

Optionale Beschichtung: TiN, TiC- oder CrN- Beschichtung, Dicke 5–15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte HV 2000–3000 ± 50 , Bindungsfestigkeit $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, im PVD- oder CVD-Verfahren hergestellt.

5. Technische Voraussetzungen

5.1 Designanforderungen

Strukturtyp: einschließlich Einzelprozess-, Verbund- und Folgeverbundwerkzeuge, konstruiert gemäß Standard GB/T 6397.

Toleranzgrad: Die lineare Maßtoleranz entspricht GB/T 1804 IT6-IT8, die geometrische Rundheitstoleranz $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Führungsgenauigkeit: Der Spalt zwischen Führungssäule und Führungshülse beträgt 0,005–0,01 $\text{mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.2 Größe und Genauigkeit

Formgröße: Gemäß den Anforderungen der Teilezeichnung beträgt der maximale Außendurchmesser $\leq 500 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und die Höhe $\leq 300 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Werkstücktoleranz: Stanzspalt 0,01–0,05 $\text{mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, angepasst an die Blechdicke.

Montagegenauigkeit: Relativer Positionsfehler $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

5.3 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Arbeitsoberfläche $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ wird durch Präzisionsschleif- oder Polierverfahren erreicht.

Die Oberfläche weist keine Risse, Poren oder Kratzer auf und die maximale Defektgröße beträgt $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Leistungsindikatoren

Stanzlebensdauer: $> 500.000 \text{ Mal} \pm 10^4 \text{ Mal}$ (abhängig von Material und Stanzbedingungen), Verschleiß $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Stanzgenauigkeit: Teilegrößentoleranz $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, Oberflächenrauheit $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

6. Herstellungsprozess

6.1 Rohstoffaufbereitung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Hartmetallpulver: WC-Partikelgröße $0,5-2\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, Co-Gehaltsfehler $\pm 0,5\%$, gemischt durch Kugelmahlen (Geschwindigkeit $200-300\ \text{U/min} \pm 10\ \text{U/min}$, Zeit $24-48\ \text{h} \pm 1\ \text{h}$).

Stahlvorbehandlung: Glühen zum Abbau von Eigenspannungen, Härte HRC $20-25 \pm 2$.

6.2 Formgebungsprozess

Hartmetall: Kaltisostatisches Pressen (CIP, $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) oder Spritzguss, Grünkörperdichte $>60\% \pm 2\%$ der theoretischen Dichte.

Stahl: geschmiedet oder gegossen, Schmiedeverhältnis $\geq 4:1$.

6.3 Sintern und Wärmebehandlung

Hartmetall: Heißisostatisches Pressen (HIP, $1300-1400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$), Porosität $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Stahl: Abschrecken ($1000-1050\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, Ölkühlung) + Anlassen ($200-250\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, $2-3\ \text{h} \pm 0,1\ \text{h}$), Härte HRC $58-62 \pm 2$.

6.4 Fertigstellung

Die Herstellung der Arbeitsteile erfolgt durch Funkenerosion (EDM, Stromstärke $5-20\ \text{A} \pm 1\ \text{A}$) mit einer Genauigkeit von $<0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$.

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. $1200-3000 \pm 100$) oder Ultraschallpolieren, Oberflächenrauheit $R_a <0,2\ \mu\text{m} \pm 0,02\ \mu\text{m}$ kontrollieren.

6.5 Montage

Die Führung ist eingepresst, mit einem Spiel von $0,005-0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ und einem Schraubenanzugsdrehmoment von $50-100\ \text{N}\cdot\text{m} \pm 5\ \text{N}\cdot\text{m}$.

7. Prüfmethoden

7.1 Maße und Genauigkeit

Die Toleranz entspricht der Klasse GB/T 1182 IT6-IT8 bei Prüfung mit einem Koordinatenmessgerät (CMM).

7.2 Materialeigenschaften

Der Härtetest erfolgt gemäß GB/T 231.1, der Druckfestigkeitstest gemäß GB/T 3852 und der Verschleifestigkeitstest gemäß GB/T 12444.

Die Wärmeleitfähigkeit entspricht ASTM E1461 und der Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht ISO 17864.

7.3 Oberflächenqualität

Die Defekte wurden mittels optischer Mikroskopie (Vergrößerung $500\times \pm 50\times$) oder Rasterelektronenmikroskopie (SEM) berprft, wobei die maximale Defektgröße $<0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ betrug.

7.4 Stempellebensdauer

Der Test wurde auf einer Standard-Stanzmaschine unter Verwendung von Standardmaterialien (z. B. 1 mm dicke SPCC-Stahlplatte, Stanzgeschwindigkeit $20-50\ \text{Mal/min} \pm 2\ \text{Mal/min}$) durchgeführt und die Anzahl der Schläge wurde aufgezeichnet, bis der Verschleiß $0,1\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$ erreichte.

8. Testbedingungen

Temperatur der Testumgebung: $20-25\ ^\circ\text{C} \pm 2\ ^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $50-70\% \pm 5\%$.

Stanzkraft: $500-2000\ \text{kN} \pm 50\ \text{kN}$, angepasst an die Formspezifikationen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

9.1 Logo

Das Typenschild auf der Formoberfläche gibt an: Formnummer, Spezifikation (Außendurchmesser $\times$ Höhe in mm), Stanztonnage, Herstellungsdatum, Herstellername und die Zeichenhöhe beträgt $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

9.2 Verpackung

Verwenden Sie zum Verpacken stoßfesten Schaumstoff und Rostschutzpapier, legen Sie es in Holz- oder Metallkisten und kennzeichnen Sie die Innenseite der Kiste mit „Vorsicht“ und „Feuchtigkeitsbeständig“.

9.3 Transport

Vermeiden Sie starke Vibrationen und hohe Temperaturen ($> 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Das Transportfahrzeug muss mit Stoßdämpfern ausgestattet sein.

9.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort bei einer Temperatur von $0-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $<60 \% \pm 5 \%$ lagern. Kontakt mit sauren oder alkalischen Substanzen vermeiden.

10. Nutzung und Wartung

10.1 Nutzungsvoraussetzungen

Um einen Thermoschock zu vermeiden, heizen Sie die Form vor dem Stanzen auf $50-100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Verwenden Sie Stanzöl, das GB/T 7326 entspricht und eine Viskosität von $20-50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$ aufweist.

10.2 Wartung

Überprüfen Sie den Verschleiß der Arbeitsfläche regelmäßig alle $10^4 \pm 10^3$ Schläge.

Wenn der Verschleiß $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, polieren oder ersetzen Sie es rechtzeitig.

10.3 Verschrottungsstandards

Wenn der Verschleiß der Arbeitsfläche $>0,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ oder die Risslänge $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, wird das Teil als Ausschuss eingestuft.

11. Qualitätssicherung

Die Probenahmerate jeder Formcharge beträgt $\geq 5 \% \pm 1 \%$, und die qualifizierte Rate beträgt $> 95 \% \pm 2 \%$.

Stellen Sie Materialzertifikate und Inspektionsberichte bereit, einschließlich Leistungstestdaten und Aufzeichnungen zur Maßprüfung.

12. Anhang (Informativ)

Referenz der Stanzprozessparameter

Stanzgeschwindigkeit: $20-100 \text{ Mal/min} \pm 2 \text{ Mal/min}$.

Stanzspalt: Bei einer Plattendicke von $0,5-2 \text{ mm}$ beträgt der Spalt $0,01-0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$.

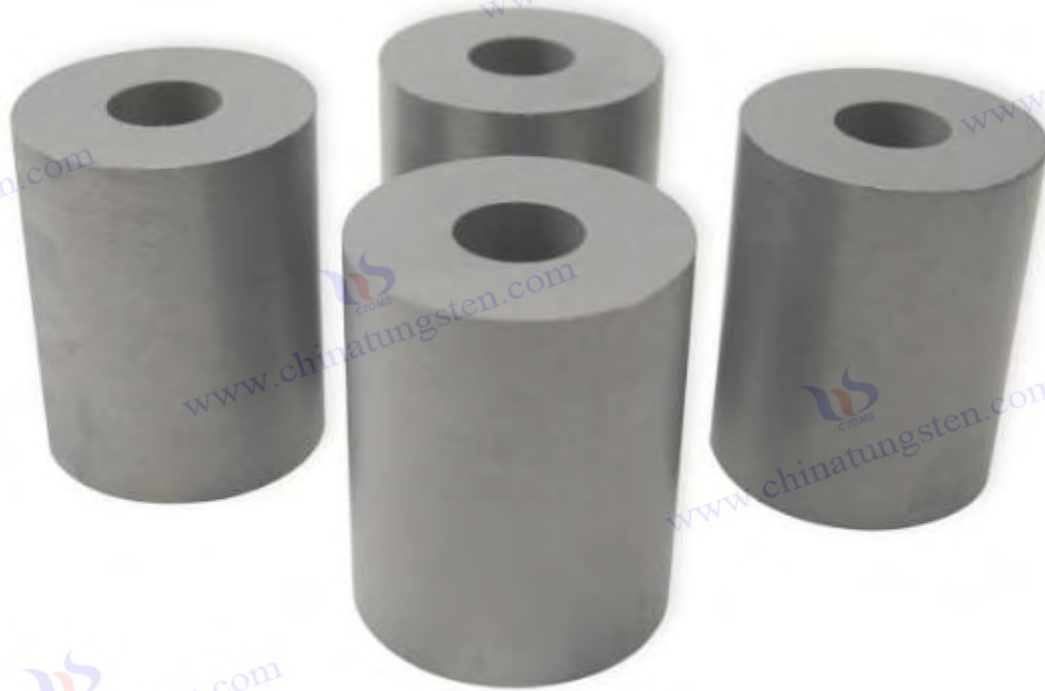
Typische Defekte und Lösungen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Riss: Passen Sie die Wärmebehandlungstemperatur an oder erhöhen Sie die Abschreckkühlrate.

Deformation: Formdesign optimieren und Führungsgenauigkeit erhöhen.

Diese technische Bedingung spiegelt die Kernanforderungen von „JB/T 8144-2010“ vollständig wider, kombiniert die Eigenschaften von Hartmetall und anderen Materialien und gewährleistet die Leistung von Stanzwerkzeugen im Hinblick auf hohe Präzision, lange Lebensdauer und hohe Zuverlässigkeit.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Hartmetall-Ziehsteine Technische Bedingungen

Die vollständigen, umfassenden und detaillierten „Technischen Bedingungen für Hartmetall-Ziehsteine“ basieren auf aktuellen Normen (wie „JB/T 3943-2017 Technische Bedingungen für Hartmetall-Ziehsteine“ und verwandten Branchenspezifikationen) und Branchenpraktiken. Diese technischen Bedingungen dienen der Standardisierung der Materialauswahl, des Herstellungsprozesses, der Leistungsanforderungen, der Prüfmethoden und der Wartungsanforderungen von Hartmetall-Ziehsteinen, um deren hohe Leistung und Zuverlässigkeit im Drahtziehprozess zu gewährleisten.

1. Geltungsbereich

Diese technische Bedingung gilt für die Herstellung, Prüfung und Verwendung von Ziehsteinen aus Hartmetall und umfasst Ziehsteine, die zum Kaltziehen von Metalldrähten (wie Stahldraht, Kupferdraht, Edelstahldraht usw.) verwendet werden, und ist auf Ziehsteine mit einem Durchmesserbereich von 0,1 mm bis 20 mm $\pm$ 0,05 mm anwendbar.

2. Normative Verweisungen

Die Bestimmungen der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser technischen Bedingung zu Bestimmungen dieser technischen Bedingung. Für alle referenzierten Dokumente mit Datum gelten nachfolgende Änderungen (ausgenommen Korrekturen) oder Überarbeitungen nicht für diese technische Bedingung. Es wird jedoch empfohlen, die neue Version des Dokuments entsprechend den Forschungsergebnissen zu übernehmen.

GB/T 5242-2006 Allgemeine Spezifikationen für Hartmetall

《JB/T 3943-2017 Ziehstein Hartmetall-Ziehstein – Technische Daten》

GB/T 6110-2021 Ziehsteine - Bauarten und Abmessungen von Hartmetall-Ziehsteinen

3. Begriffe und Definitionen

Ziehmatrize: Eine ringförmige oder konische Matrize aus Hartmetall, die zum Reduzieren des Durchmessers von Metalldrähten im Ziehprozess verwendet wird.

Arbeitskegelwinkel: Der Winkel des konischen Teils der inneren Formöffnung, der die Zugkraft und die Oberflächenqualität beeinflusst.

Lebensdauer: Die Fähigkeit einer Matrize, innerhalb einer bestimmten Ziehlänge oder Anzahl von Malen eine stabile Leistung aufrechtzuerhalten.

4. Materialanforderungen

4.1 Materialzusammensetzung

Die Formmatrix besteht aus einem Wolframkarbid-Kobalt-System (WC-Co). Das empfohlene Verhältnis ist WC-6 % Co, WC-8 % Co oder WC-10 % Co. Der Kobaltgehaltsfehler beträgt $\pm$ 0,5 %. Abhängig von den Eigenschaften des gezogenen Materials (z. B. Kohlenstoffstahl oder Kupferlegierung) kann eine geringe Menge an Verstärkungsphasen wie TiC (0,5 % – 2 % $\pm$ 0,1 %) oder TaC (0,5 % – 1 % $\pm$ 0,1 %) hinzugefügt werden, um die Verschleißfestigkeit und Wärmebeständigkeit zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4.2 Physikalische Eigenschaften

Härte: HV 1800–2000 $\pm$ 30. Die Testmethode entspricht GB/T 3850.

Dichte: 14,5–15,0 g/cm³ $\pm$ 0,2 g/cm³, Prüfverfahren gemäß GB/T 3851.

Druckfestigkeit: >4000 MPa $\pm$ 100 MPa, Prüfverfahren gemäß GB/T 3852.

Bruchzähigkeit: 10-15 MPa·m^{1/2} $\pm$ 1 MPa·m^{1/2}, Prüfverfahren gemäß GB/T 21068.

4.3 Chemische Stabilität

Korrosionsbeständigkeit: Eingetaucht in 0,9 % NaCl-Lösung für 24 h $\pm$ 1 h, Korrosionsrate <0,01 mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr.

Oxidationsbeständigkeit: Masseverlust <0,01 % $\pm$ 0,001 % bei 800 °C $\pm$ 20 °C.

5. Technische Voraussetzungen

5.1 Maße und Toleranzen

Form : 10–50 mm $\pm$ 0,1 mm, Höhe: 5–30 mm $\pm$ 0,1 mm.

Arbeitslochdurchmesser: 0,1–20 mm $\pm$ 0,01 mm, Kegelwinkel: 6°–15° $\pm$ 0,5°, gemäß den in GB/T 6110-2021 angegebenen Typen und Abmessungen.

Geometrische Toleranzen: Rundheit <0,005 mm $\pm$ 0,001 mm, Zylindrizität <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

5.2 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Arbeitsoberfläche Ra <0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m wird durch Präzisionsschleifen oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP) erreicht.

Es sind keine Risse, Poren oder Einschlüsse auf der Oberfläche vorhanden und die maximale Defektgröße beträgt <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

5.3 Leistungsanforderungen

Verschleißlebensdauer: Ziehlänge > 10⁶ m $\pm$ 10⁴ m (abhängig vom Ziehmaterial), Verschleißrate < 0,05 mm³ / N · m $\pm$ 0,01 mm³ / N · m.

Thermische Stabilität: Betriebstemperatur <600°C $\pm$ 20°C, Wärmeausdehnungskoeffizient <6 $\times$ 10⁻⁶ /°C $\pm$ 0,5 $\times$ 10⁻⁶ /°C.

Ziehgenauigkeit: Drahtdurchmessertoleranz $\leq \pm 0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm, Oberflächenrauheit Ra <0,4 μ m $\pm$ 0,05 μ m.

5.4 Beschichtung (optional)

Zinn, TiC- oder CrN-Beschichtungen können durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) mit einer Dicke von 5–15 μ m $\pm$ 0,1 μ m, einer Härte von HV 2000–3000 $\pm$ 50 und einer Bindungsstärke von > 50 MPa $\pm$ 5 MPa aufgetragen werden.

6. Herstellungsprozess

6.1 Rohstoffaufbereitung

hochreines WC-Pulver (Partikelgröße 0,5–2 μ m $\pm$ 0,1 μ m) und Co-Pulver verwendet und die Mischungsgleichmäßigkeit betrug >95 % $\pm$ 2 %, was durch Kugelmahlen (Geschwindigkeit 200–300 U/min $\pm$ 10 U/min, Zeit 24–48 h $\pm$ 1 h) erreicht wurde.

6.2 Formgebungsprozess

Es wird kalisostatisches Pressen (CIP, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) oder Spritzgießen verwendet und die Grünkörperdichte beträgt >60 % $\pm$ 2 % der theoretischen Dichte.

6.3 Sinterprozess

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Heißisostatisches Pressen (HIP, 1300–1400 °C $\pm$ 10 °C, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) oder feldunterstütztes Sintern (SPS, 1350 °C $\pm$ 10 °C, 50 MPa $\pm$ 1 MPa), um eine Porosität von $<0,1\% \pm 0,01\%$ und eine Korngröße von $0,5\text{--}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ sicherzustellen .

6.4 Fertigstellung

Elektroerosion (EDM, Stromstärke 5–20 A $\pm$ 1 A) mit einer Genauigkeit von $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ hergestellt .

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. 1200–3000 $\pm$ 100) oder Ultraschallpolieren, Oberflächenrauheit Ra $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ kontrollieren .

6.5 Wärmebehandlung

Durch Glühen (400–600 °C $\pm$ 10 °C, 2–4 h $\pm$ 0,1 h) werden die inneren Spannungen beseitigt und die Restspannung beträgt $<100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$.

7. Prüfmethoden

7.1 Maß- und Formgenauigkeit

Die Toleranz entspricht dem in GB/T 1182 angegebenen IT6-Level bei Prüfung mit einem Koordinatenmessgerät (CMM).

7.2 Werkstoffeigenschaften

Die Härteprüfung erfolgt gemäß GB/T 3850, die Dichte gemäß GB/T 3851 und die Druckfestigkeit gemäß GB/T 3852.

Die Bruchzähigkeit entspricht GB/T 21068 und die Wärmeleitfähigkeit entspricht ASTM E1461.

7.3 Oberflächenqualität

Die Überprüfung der Defekte erfolgte mit einem optischen Mikroskop (Vergrößerung $500\times \pm 50\times$) oder einem Rasterelektronenmikroskop (REM), wobei die maximale Defektgröße $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ betrug.

7.4 Lebensdauer

Testen Sie auf einer Standardziehmaschine mit Standardziehmaterialien (z. B. Stahldraht mit 1 mm Durchmesser, Ziehgeschwindigkeit $1\text{--}5\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$) und zeichnen Sie die Ziehlänge auf, bis der Verschleiß $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ erreicht.

8. Testbedingungen

Temperatur der Testumgebung: $20\text{--}25\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $50\text{--}70\% \pm 5\%$.

Auszugsprüflast: $500\text{--}2000\text{ N} \pm 50\text{ N}$, angepasst gemäß Formspezifikationen.

9. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

9.1 Logo

Das Typenschild auf der Formoberfläche enthält Angaben zu Formnummer, Spezifikation (Durchmesser $\times$ Höhe in mm), Herstellungsdatum und Herstellername. Die Schrifthöhe beträgt $3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ und ist deutlich sichtbar.

9.2 Verpackung

Verwenden Sie zum Verpacken stoßfesten Schaumstoff und Korrosionsschutzpapier, legen Sie die Gegenstände in Holz- oder Plastikkisten und kennzeichnen Sie die Innenseite der Kiste mit „Vorsicht“.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3 Transport

Vermeiden Sie starke Vibrationen und hohe Temperaturen ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Das Transportfahrzeug muss mit Stoßdämpfern ausgestattet sein.

9.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort bei einer Temperatur von $0-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $<60\text{ } \% \pm 5\text{ } \%$ lagern. Kontakt mit sauren oder alkalischen Substanzen vermeiden.

10. Nutzung und Wartung

10.1 Nutzungsvoraussetzungen

Um einen Thermoschock zu vermeiden, heizen Sie die Matrize vor dem Ziehen auf $50-100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Als Ziehschmiermittel wird Ziehöl nach GB/T 7326 mit einer Viskosität von $20-50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$ verwendet.

10.2 Wartung

Überprüfen Sie den Verschleiß der Arbeitslöcher regelmäßig alle $10^5\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$ Zuglänge.

Wenn der Verschleiß $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, polieren oder ersetzen Sie es rechtzeitig.

10.3 Verschrotungsstandards

Wenn der Durchmesser des Arbeitslochs um $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ zunimmt oder die Oberflächenrisslänge $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, wird dies als Ausschuss beurteilt.

11. Qualitätssicherung

Die Probenahmerate jeder Formcharge beträgt $\geq 5\text{ } \% \pm 1\text{ } \%$, und die qualifizierte Rate beträgt $> 95\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$.

Stellen Sie Materialzertifikate und Inspektionsberichte bereit, einschließlich Leistungstestdaten und Aufzeichnungen zur Maßprüfung.

12. Anhang (Informativ)

Referenz der Zeichenprozessparameter

Zuggeschwindigkeit: $1-10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$.

Reduktionsrate: $10\text{ } \% - 25\text{ } \% \pm 2\text{ } \%$, je nach Material.

Typische Defekte und Lösungen

Risse: Sintertemperatur anpassen oder HIP-Druck erhöhen. Porosität: Pulvermischung optimieren oder Sinterdichte verbessern.

Diese technische Bedingung integriert aktuelle Standards (wie JB/T 3943-2017) und Branchenpraktiken, um sicherzustellen, dass Ziehsteine aus Hartmetall eine hohe Zuverlässigkeit und Konsistenz in Leistung, Herstellung und Verwendung aufweisen.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YB/T 5136-2006

Technische Anforderungen an pulvermetallurgische Formen

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Bedingungen für pulvermetallurgische Formen fest, einschließlich Materialauswahl, Konstruktionsanforderungen, Herstellungsprozess, technischer Leistung, Prüfmethoden, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung. Sie gilt für Formen, die in pulvermetallurgischen Pressprozessen verwendet werden, einschließlich Hartmetall- oder Stahlformen zum Pressen von Zahnrädern, Lagern, magnetischen Materialien und anderen Produkten. Sie wird häufig in den Bereichen Automobil, Elektronik, Maschinenbau usw. eingesetzt.

2. Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für alle referenzierten Dokumente mit Datum gelten nachfolgende Änderungen (ausgenommen Korrekturen) oder Überarbeitungen nicht für diese Norm. Es wird jedoch empfohlen, die neue Version des Dokuments entsprechend den Forschungsergebnissen zu übernehmen.

GB/T 5242-2006 Allgemeine Spezifikationen für Hartmetall

GB/T 6110-2021 Ziehsteine - Bauarten und Abmessungen von Hartmetall-Ziehsteinen

《JB/T 3943-2017 Ziehstein Hartmetall-Ziehstein – Technische Daten》

GB/T 1804-2000 Toleranzen und Passungen - Grenzabweichungen und Grundabweichungen von Längenmaßen

3. Begriffe und Definitionen

Pulvermetallurgieform: Ein Werkzeug zum Formen von Metallpulver oder Verbundpulver durch Hochdruckpressen, bestehend aus einer oberen Form, einer unteren Form und einer Formhülse.

Presslebensdauer: Die Fähigkeit einer Form, über eine bestimmte Anzahl von Presszyklen hinweg eine stabile Leistung aufrechtzuerhalten.

Gleichmäßigkeit der Füllung: Die Verteilungskonsistenz des Pulvers im Formhohlraum wirkt sich direkt auf die Dichte des Produkts aus.

4. Materialanforderungen

4.1 Formmaterial

Hartmetallwerkstoff: WC-Co-System (z. B. WC-6 % Co, WC-8 % Co oder WC-10 % Co), Härte HV 1800–2000 $\pm$ 30, Druckfestigkeit > 4000 MPa $\pm$ 100 MPa.

Stahl: Cr12MoV, D2 oder H13 Stahl, Härte HRC 58-62 $\pm$ 2, vergütet.

Nicht funktionierende Teile: Hergestellt aus 40Cr- oder 45#-Stahl, Härte HRC 30-40 $\pm$ 2 nach Wärmebehandlung.

4.2 Leistungsanforderungen

Verschleißfestigkeit: Verschleißrate $< 0,05$ mm³/N·m $\pm$ 0,01 mm³/N·m, geprüft nach GB/T 12444.

Druckbeständigkeit: Maximaldruck > 3000 MPa $\pm$ 100 MPa, geprüft nach GB/T 3852.

Ermüdungsbeständigkeit: Ermüdungslebensdauer $> 10^6$ -fach $\pm$ 10^4 -fach, Prüfung gemäß GB/T 3075.

4.3 Oberflächenbehandlung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Optionale Beschichtung: TiN , TiC- oder Al₂O₃ -Beschichtung, Dicke 5–15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Härte HV 2000–3000 ± 50 , Bindungsfestigkeit $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, im PVD- oder CVD-Verfahren hergestellt.

5. Technische Voraussetzungen

5.1 Designanforderungen

Strukturtyp: einschließlich Einwegpressform, Zweiwegpressform und Mehrkavitätenform, konstruiert gemäß Standard GB/T 6406.

Toleranzgrad: Die lineare Maßtoleranz entspricht GB/T 1804 IT6-IT8, die geometrische Toleranzparallelität beträgt $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Führungsgenauigkeit : Der Spalt zwischen Führungssäule und Führungshülse beträgt 0,005–0,015 $\text{mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.2 Größe und Genauigkeit

Formgröße : Gemäß den Anforderungen der Teilezeichnung beträgt der maximale Außendurchmesser $\leq 400 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und die Höhe $\leq 250 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Hohlraummaße: Toleranz $< \pm 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, Tiefe 10–50 $\text{mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Montagegenauigkeit: relativer Positionsfehler $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

5.3 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Arbeitsoberfläche $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ wird durch Präzisionsschleif- oder Polierverfahren erreicht .

Es sind keine Risse, Poren oder Einschlüsse auf der Oberfläche vorhanden und die maximale Defektgröße beträgt $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Leistungsindikatoren

Presslebensdauer: $> 500.000 \text{ mal} \pm 10^4 \text{ mal}$ (abhängig von Pulvermaterial und Druck), Verschleiß $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Pressgenauigkeit: Produktdichtetoleranz $\pm 2 \% \pm 0,5 \%$, Größentoleranz $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$.

Füllgleichmäßigkeit: $> 95 \% \pm 2 \%$, geprüft nach YB/T 5120.

6. Herstellungsprozess

6.1 Rohstoffaufbereitung

Hartmetallpulver: WC-Partikelgröße $0,5\text{--}2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Co-Gehaltsfehler $\pm 0,5 \%$, gemischt durch Kugelmahlen (Geschwindigkeit 200–300 U/min $\pm 10 \text{ U/min}$, Zeit 24–48 h $\pm 1 \text{ h}$) .

Stahlvorbehandlung: Glühen zum Abbau von Eigenspannungen, Härte HRC 20–25 ± 2 .

6.2 Formgebungsprozess

Hartmetall: Kaltisostatisches Pressen (CIP, 200 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$) oder Spritzguss, Grünkörperdichte $> 60 \% \pm 2 \%$ der theoretischen Dichte.

Stahl: geschmiedet oder gegossen, Schmiedeverhältnis $\geq 4:1$.

6.3 Sintern und Wärmebehandlung

Hartmetall: Heißisostatisches Pressen (HIP, 1300–1400 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$, 200 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$) , Porosität $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$.

Stahl: Abschrecken (1000–1050 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$, Ölkühlung) + Anlassen (200–250 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$, 2–3 h $\pm 0,1 \text{ h}$) , Härte HRC 58–62 ± 2 .

6.4 Fertigstellung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Die Formkavität wurde durch Elektroerosion (EDM, Stromstärke 5–20 A $\pm$ 1 A) mit einer Genauigkeit von $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ hergestellt.

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. 1200–3000 $\pm$ 100) oder Ultraschallpolieren, Oberflächenrauheit $R_a < 0,2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,02 \text{ } \mu\text{m}$ kontrollieren.

6.5 Montage

Die Führung ist eingepresst, mit einem Spiel von $0,005\text{--}0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ und einem Schraubenanzugsdrehmoment von $50\text{--}80 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$.

7. Prüfmethoden

7.1 Maße und Genauigkeit

Die Toleranz entspricht der Klasse GB/T 1182 IT6-IT8 bei Prüfung mit einem Koordinatenmessgerät (CMM).

7.2 Werkstoffeigenschaften

Der Härtestest erfolgt gemäß GB/T 231.1, der Druckfestigkeitstest gemäß GB/T 3852 und der Verschleißfestigkeitstest gemäß GB/T 12444.

Die Wärmeleitfähigkeit entspricht ASTM E1461 und der Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht ISO 17864.

7.3 Oberflächenqualität

Die Defekte wurden mittels optischer Mikroskopie (Vergrößerung $500\times \pm 50\times$) oder Rasterelektronenmikroskopie (SEM) überprüft, wobei die maximale Defektgröße $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ betrug.

7.4 Lebensdauer der Presse

Der Test wurde auf einer Standard-Pulvermetallurgiepresse unter Verwendung von Standard-Eisenpulver (z. B. ASC 100.29, Druck $500\text{--}1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) durchgeführt und die Anzahl der Pressvorgänge aufgezeichnet, bis der Verschleiß $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ erreichte.

8. Testbedingungen

Temperatur der Testumgebung: $20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $50\text{--}70 \% \pm 5 \%$.

Presskraft: $500\text{--}2000 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$, angepasst an die Formspezifikationen.

9. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

9.1 Logo

Das Typenschild auf der Formoberfläche gibt an: Formnummer, Spezifikation (Außendurchmesser $\times$ Höhe in mm), Presstonnage, Herstellungsdatum, Herstellername und die Zeichenhöhe beträgt $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

9.2 Verpackung

Verwenden Sie zum Verpacken stoßfesten Schaumstoff und Rostschutzpapier, legen Sie es in Holz- oder Metallkisten und kennzeichnen Sie die Innenseite der Kiste mit „Vorsicht“ und „Feuchtigkeitsbeständig“.

9.3 Transport

Vermeiden Sie starke Vibrationen und hohe Temperaturen ($> 50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$). Das Transportfahrzeug muss mit Stoßdämpfern ausgestattet sein.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort bei einer Temperatur von $0-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $<60\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ lagern. Kontakt mit sauren oder alkalischen Substanzen vermeiden.

10. Nutzung und Wartung

10.1 Nutzungsvoraussetzungen

Um einen Thermoschock zu vermeiden, heizen Sie die Form vor dem Pressen auf $50-100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Verwenden Sie Pressöl, das GB/T 7326 entspricht, mit einer Viskosität von $20-50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$.

10.2 Wartung

Überprüfen Sie den Verschleiß der Matrizenkavität regelmäßig alle $10^4 \pm 10^3$ Pressungen.

Wenn der Verschleiß $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, polieren oder ersetzen Sie es rechtzeitig.

10.3 Verschrottungsstandards

Wenn der Hohlraumverschleiß $>0,2\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$ oder die Risslänge $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, wird es als Ausschuss beurteilt.

11. Qualitätssicherung

Die Probenahmerate jeder Formcharge beträgt $\geq 5\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$, und die qualifizierte Rate beträgt $> 95\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$.

Stellen Sie Materialzertifikate und Inspektionsberichte bereit, einschließlich Leistungstestdaten und Aufzeichnungen zur Maßprüfung.

12. Anhang (Informativ)

Referenz der Pressprozessparameter

Pressdruck: $500-1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$.

Kompressionsverhältnis: $2:1$ bis $4:1 \pm 0,1$, abhängig von den Pulvereigenschaften.

Typische Defekte und Lösungen

Riss: Sintertemperatur anpassen oder HIP-Druck erhöhen.

Ungleichmäßige Dichte: Optimieren Sie den Pulverfüllvorgang und erhöhen Sie die Vibrationszeit ($10-20\text{ s} \pm 1\text{ s}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 6110-2021

Ziehstein

Hartmetall-Ziehsteine

Bauart und Größe

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt den Konstruktionstyp, die Maßangaben und die damit verbundenen technischen Anforderungen an Hartmetall-Ziehwerkzeuge fest. Sie gilt für Ziehwerkzeuge, die beim Kaltziehen von Metalldrähten (wie Stahldraht, Kupferdraht, Edelstahldraht usw.) verwendet werden. Sie umfasst Ziehwerkzeuge mit einem Durchmesserbereich von 0,1 mm bis 20 mm $\pm$ 0,05 mm und findet breite Anwendung in der Metallverarbeitung, der Elektronikindustrie, der Automobilindustrie und anderen Branchen.

2. Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für alle referenzierten Dokumente mit Datum gelten nachfolgende Änderungen (ausgenommen Korrekturen) oder Überarbeitungen nicht für diese Norm. Es wird jedoch empfohlen, die neue Version des Dokuments entsprechend den Forschungsergebnissen zu übernehmen.

GB/T 5242-2006 Allgemeine Spezifikationen für Hartmetall

《JB/T 3943-2017 Ziehstein Hartmetall-Ziehstein – Technische Daten》

GB/T 1804-2000 Toleranzen und Passungen - Grenzabweichungen und Grundabweichungen von Längenmaßen

3. Begriffe und Definitionen

Ziehmatrize: Eine ringförmige oder konische Matrize aus Hartmetall, die zum Reduzieren des Durchmessers von Metalldrähten im Ziehprozess verwendet wird.

Arbeitskegelwinkel: Der Winkel des konischen Teils der inneren Formöffnung, der die Zugkraft und die Oberflächenqualität beeinflusst.

Führungsbereich: Der Bereich innerhalb der Matrizenöffnung, der zur Führung des Drahtes dient, um die Ziehstabilität zu gewährleisten.

4. Strukturtyp

4.1 Grundstruktur

Ziehsteine bestehen üblicherweise aus folgenden Funktionsbereichen:

Eintrittsbereich: Draht in die Matrize einführen, Länge 0,5-1 mm $\pm$ 0,1 mm, Konuswinkel 20°-30° $\pm$ 2°.

Schmierbereich: Dient zur Speicherung von Schmierstoff, Länge 0,5–1,5 mm $\pm$ 0,1 mm, Kegelwinkel 10°–20° $\pm$ 1°.

Arbeitskegelbereich: der Hauptziehverformungsbereich, Länge 0,5–2 mm $\pm$ 0,1 mm, Kegelwinkel 6°–15° $\pm$ 0,5°.

Kalibrierzone: Kontrolle des Enddurchmessers, Länge 0,2–0,8 mm $\pm$ 0,05 mm, Durchmessertoleranz $\pm$ 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Austrittszone: Schutz der Drahtoberfläche, Länge $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, Kegelwinkel $30^\circ-45^\circ \pm 2^\circ$.

4.2 Klassifizierung

Einzellochmatrize: Einzelnes Arbeitsloch, geeignet für kleine Chargen oder Einzelspezifikationszeichnungen, maximaler Durchmesser $20 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Mehrlochmatrize: Mehrere Arbeitslöcher, geeignet für kontinuierliches Ziehen, Lochabstand $\geq 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Kombimatrize: modularer Aufbau, austauschbare Arbeitsteile, anpassbar an verschiedene Drahtspezifikationen.

5. Abmessungen

5.1 Abmessungen

Außendurchmesser: $10 - 50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, empfohlene Spezifikationen sind 15 mm , 20 mm , 25 mm , 30 mm , 40 mm .

Höhe: $5 - 30 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, empfohlene Spezifikationen sind 10 mm , 15 mm , 20 mm , 25 mm .

Dicke: $3-15 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, je nach Durchmesser und Anwendung.

5.2 Innenlochgröße

Minimale Öffnung: $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, maximale Öffnung $20 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Arbeitskegellänge: $0,5-2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, Längen-Öffnungs-Verhältnis 1:1 bis 1:5.

Kalibrierzonlänge: $0,2-0,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, Längen-Öffnungs-Verhältnis 1:2 bis 1:10.

5.3 Toleranzen und Passungen

Lineare Maßtoleranz: Gemäß GB/T 1804 IT6-IT8-Klasse, Öffnungstoleranz $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Geometrische Toleranzen: Rundheit $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Zylindrizität $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Kegelwinkeltoleranz: $\pm 0,5^\circ \pm 0,1^\circ$.

5.4 Besondere Spezifikationen

Mikroform (Öffnung $\leq 0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$): Kalibrierzonlänge $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, Kegelwinkel $8^\circ-12^\circ \pm 0,5^\circ$.

Große Formen (Öffnung $> 10 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$): Arbeitskegellänge $1,5-2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, Kegelwinkel $10^\circ-15^\circ \pm 0,5^\circ$.

6. Technische Voraussetzungen

6.1 Materialanforderungen

Es wird WC-Co-Hartmetall verwendet. Das empfohlene Verhältnis ist WC-6 % Co, WC-8 % Co oder WC-10 % Co. Der Kobaltgehaltsfehler beträgt $\pm 0,5 \%$.

Härte HV $1800-2000 \pm 30$, Druckfestigkeit $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Porosität $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$.

6.2 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Arbeitsoberfläche beträgt $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, durch Präzisionsschleifen oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP).

Es sind keine Risse, Poren oder Einschlüsse auf der Oberfläche vorhanden und die maximale Defektgröße beträgt $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

6.3 Leistungsindikatoren

Lebensdauer: Auszugslänge $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$, Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 /$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

N · m .

Thermische Stabilität: Betriebstemperatur $<600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $<6 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Ziehgenauigkeit: Drahtdurchmessertoleranz $\leq \pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Oberflächenrauheit $R_a < 0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

6.4 Beschichtung (optional)

Zinn , Mittels PVD- oder CVD-Technologie können TiC- oder CrN -Beschichtungen mit einer Schichtdicke von $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, einer Härte von $\text{HV } 2000-3000 \pm 50$ und einer Haftfestigkeit von $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ aufgebracht werden.

7. Herstellungsprozess

7.1 Rohstoffaufbereitung

hochreines WC-Pulver (Partikelgröße $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und Co-Pulver verwendet und die Mischungsgleichmäßigkeit betrug $>95 \% \pm 2 \%$, was durch Kugelmahlen (Geschwindigkeit $200-300 \text{ U/min} \pm 10 \text{ U/min}$, Zeit $24-48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) erreicht wurde.

7.2 Formgebungsprozess

Kaltisostatisches Pressen (CIP, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) oder Spritzguss, Grünkörperdichte $>60 \% \pm 2 \%$ der theoretischen Dichte.

7.3 Sinterprozess

Heißisostatisches Pressen (HIP, $1300-1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) oder feldunterstütztes Sintern (SPS, $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), um eine Korngröße von $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ sicherzustellen .

7.4 Fertigstellung

Elektroerosion (EDM, Stromstärke $5-20 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$) mit einer Genauigkeit von $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ hergestellt .

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. $1200-3000 \pm 100$) oder Ultraschallpolieren, Oberflächenrauheit $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ kontrollieren .

8. Prüfmethoden

8.1 Maße und Genauigkeit

Die Toleranz entspricht der Klasse GB/T 1182 IT6-IT8 bei Prüfung mit einem Koordinatenmessgerät (CMM).

8.2 Werkstoffeigenschaften

Die Härteprüfung erfolgt gemäß GB/T 3850, die Dichte gemäß GB/T 3851 und die Druckfestigkeit gemäß GB/T 3852.

Die Wärmeleitfähigkeit entspricht ASTM E1461 und der Wärmeausdehnungskoeffizient entspricht ISO 17864.

8.3 Oberflächenqualität

Die Defekte wurden mittels optischer Mikroskopie (Vergrößerung $500\times \pm 50\times$) oder Rasterelektronenmikroskopie (SEM) überprüft, wobei die maximale Defektgröße $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ betrug.

8.4 Lebensdauer

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Testen Sie auf einer Standardziehmaschine mit Standardziehmaterialien (z. B. Stahldraht mit 1 mm Durchmesser, Ziehgeschwindigkeit $1-5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$) und zeichnen Sie die Ziehlänge auf, bis der Verschleiß $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ erreicht.

9. Testbedingungen

Temperatur der Testumgebung: $20-25 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Luftfeuchtigkeit $50-70 \% \pm 5 \%$.

Auszugsprüflast: $500-2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$, angepasst gemäß Formspezifikationen.

10. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

10.1 Logo

Das Typenschild auf der Formoberfläche enthält Angaben zu Formnummer, Spezifikation (Durchmesser $\times$ Höhe in mm), Herstellungsdatum und Herstellername. Die Schriftgröße beträgt $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und ist deutlich sichtbar.

10.2 Verpackung

Verwenden Sie zum Verpacken stoßfesten Schaumstoff und Korrosionsschutzpapier, legen Sie die Gegenstände in Holz- oder Plastikkisten und kennzeichnen Sie die Innenseite der Kiste mit „Vorsicht“.

10.3 Transport

Vermeiden Sie starke Vibrationen und hohe Temperaturen ($> 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Das Transportfahrzeug muss mit Stoßdämpfern ausgestattet sein.

10.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort bei einer Temperatur von $0-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $<60 \% \pm 5 \%$ lagern. Kontakt mit sauren oder alkalischen Substanzen vermeiden.

11. Nutzung und Wartung

11.1 Nutzungsvoraussetzungen

Um einen Thermoschock zu vermeiden, heizen Sie die Matrize vor dem Ziehen auf $50-100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Verwenden Sie Drahtziehöl, das GB/T 7326 entspricht, mit einer Viskosität von $20-50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$.

11.2 Wartung

Überprüfen Sie den Verschleiß der Arbeitslöcher regelmäßig alle $10^5 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$ Zuglänge. Wenn der Verschleiß $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, polieren oder ersetzen Sie es rechtzeitig.

11.3 Verschrottungsstandards

Wenn der Durchmesser des Arbeitslochs um $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ zunimmt oder die Oberflächenrisslänge $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ beträgt, wird dies als Ausschuss beurteilt.

12. Qualitätssicherung

Die Probenahmerate jeder Formcharge beträgt $\geq 5 \% \pm 1 \%$, und die qualifizierte Rate beträgt $> 95 \% \pm 2 \%$.

Stellen Sie Materialzertifikate und Inspektionsberichte bereit, einschließlich Leistungstestdaten und Aufzeichnungen zur Maßprüfung.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

13. Anhang (Informativ)

Referenz der Zeichenprozessparameter

Zuggeschwindigkeit: $1-10 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$.

Reduktionsrate: $10 \% - 25 \% \pm 2 \%$, je nach Material.

Typische Defekte und Lösungen

Riss: Sintertemperatur anpassen oder HIP-Druck erhöhen.

Porosität: Pulvermischung optimieren oder Sinterdichte verbessern.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

JB/T 3943-2017

Ziehstein

Hartmetall-Ziehsteine

Technische Bedingungen

1. Geltungsbereich

Diese Norm legt die technischen Bedingungen für Materialauswahl, Herstellungsprozess, technische Leistung, Prüfmethoden, Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung von Hartmetall-Ziehwerkzeugen fest. Sie gilt für Ziehwerkzeuge, die beim Kaltziehen von Metalldrähten (wie Stahldraht, Kupferdraht, Edelstahldraht usw.) verwendet werden. Sie umfasst Ziehwerkzeuge mit einem Durchmesserbereich von 0,1 mm bis 20 mm $\pm 0,05$ mm und findet breite Anwendung in der Metallverarbeitung, der Elektronik- und Automobilindustrie sowie in anderen Branchen.

2. Normative Verweisungen

Die Abschnitte der folgenden Dokumente werden durch Verweis in dieser Norm zu Abschnitten dieser Norm. Für alle referenzierten Dokumente mit Datum gelten nachfolgende Änderungen (ausgenommen Korrekturen) oder Überarbeitungen nicht für diese Norm. Es wird jedoch empfohlen, die neue Version des Dokuments entsprechend den Forschungsergebnissen zu übernehmen.

GB/T 5242-2006 Allgemeine Spezifikationen für Hartmetall

GB/T 6110-2021 Ziehsteine - Bauarten und Abmessungen von Hartmetall-Ziehsteinen

GB/T 1804-2000 Toleranzen und Passungen - Grenzabweichungen und Grundabweichungen von Längenmaßen

3. Begriffe und Definitionen

Ziehmatrize: Eine ringförmige oder konische Matrize aus Hartmetall, die zum Reduzieren des Durchmessers von Metalldrähten im Ziehprozess verwendet wird.

Arbeitskegelwinkel: Der Winkel des konischen Teils der inneren Formöffnung, der die Zugkraft und die Oberflächenqualität beeinflusst.

Lebensdauer: Die Fähigkeit einer Matrize, innerhalb einer bestimmten Ziehlänge oder Anzahl von Malen eine stabile Leistung aufrechtzuerhalten.

4. Materialanforderungen

4.1 Materialzusammensetzung

Die Formmatrix besteht aus einem Wolframkarbid-Kobalt-System (WC-Co). Das empfohlene Verhältnis ist WC-6 % Co, WC-8 % Co oder WC-10 % Co. Der Kobaltgehaltsfehler beträgt $\pm 0,5$ %. Abhängig von den Eigenschaften des gezogenen Materials (z. B. Kohlenstoffstahl oder Kupferlegierung) kann eine geringe Menge an Verstärkungsphasen wie TiC (0,5 % – 2 % $\pm 0,1$ %) oder TaC (0,5 % – 1 % $\pm 0,1$ %) hinzugefügt werden, um die Verschleißfestigkeit und Wärmebeständigkeit zu verbessern.

4.2 Physikalische Eigenschaften

Härte: HV 1800-2000 ± 30 , Prüfverfahren gemäß GB/T 3850.

Dichte: 14,5–15,0 g/cm³ $\pm 0,2$ g/cm³, Prüfverfahren gemäß GB/T 3851.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Druckfestigkeit: $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Prüfverfahren gemäß GB/T 3852.

Bruchzähigkeit: $10\text{--}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, Prüfverfahren gemäß GB/T 21068.

4.3 Chemische Stabilität

Korrosionsbeständigkeit: Eingetaucht in 0,9 % NaCl-Lösung für $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$.

Oxidationsbeständigkeit: Masseverlust $<0,01 \% \pm 0,001 \%$ bei $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

5. Technische Voraussetzungen

5.1 Strukturtyp

Die Formstruktur entspricht GB/T 6110-2021, einschließlich Einlassbereich, Schmierbereich, Arbeitskegelbereich, Kalibrierbereich und Auslassbereich.

Kegelwinkel im Eintrittsbereich: $20^\circ\text{--}30^\circ \pm 2^\circ$, Länge $0,5\text{--}1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Arbeitskegelwinkel: $6^\circ\text{--}15^\circ \pm 0,5^\circ$, Länge $0,5\text{--}2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Kalibrierzonlänge: $0,2\text{--}0,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, Durchmesserstoleranz $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.2 Maße und Toleranzen

Außendurchmesser: $10\text{--}50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, empfohlene Spezifikationen sind 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm.

Höhe: $5\text{--}30 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, empfohlene Spezifikationen sind 10 mm, 15 mm, 20 mm und 25 mm.

Arbeitslochdurchmesser: $0,1\text{--}20 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, Toleranz gemäß GB/T 1804 IT6-IT8.

Geometrische Toleranzen: Rundheit $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Zylindrizität $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.3 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Arbeitsoberfläche beträgt $R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, durch Präzisionsschleifen oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP).

Es sind keine Risse, Poren oder Einschlüsse auf der Oberfläche vorhanden und die maximale Defektgröße beträgt $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Leistungsanforderungen

Verschleißlebensdauer: Ziehlänge $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$ (abhängig vom Ziehmaterial), Verschleißrate $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Thermische Stabilität: Betriebstemperatur $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Ziehgenauigkeit: Drahtdurchmesserstoleranz $\leq \pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Oberflächenrauheit $R_a <0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Beschichtung (optional)

Zinn, TiC- oder CrN-Beschichtungen können durch physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) oder chemische Gasphasenabscheidung (CVD) mit einer Dicke von $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, einer Härte von HV 2000–3000 ± 50 und einer Bindungsstärke von $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ aufgetragen werden.

6. Herstellungsprozess

6.1 Rohstoffaufbereitung

hochreines WC-Pulver (Partikelgröße $0,5\text{--}2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) und Co-Pulver verwendet und die Mischungsgleichmäßigkeit betrug $>95 \% \pm 2 \%$, was durch Kugelmahlen (Geschwindigkeit 200–300 U/min $\pm 10 \text{ U/min}$, Zeit 24–48 h $\pm 1 \text{ h}$) erreicht wurde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2 Formgebungsprozess

Kaltisostatisches Pressen (CIP, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) oder Spritzguss, Grünkörperdichte $>60\% \pm 2\%$ der theoretischen Dichte.

6.3 Sinterprozess

Heißisostatisches Pressen (HIP, 1300–1400 °C $\pm$ 10 °C, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) oder feldunterstütztes Sintern (SPS, 1350 °C $\pm$ 10 °C, 50 MPa $\pm$ 1 MPa), um eine Porosität von $<0,1\% \pm 0,01\%$ und eine Korngröße von 0,5–1 $\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$ sicherzustellen.

6.4 Fertigstellung

Elektroerosion (EDM, Stromstärke 5–20 A $\pm$ 1 A) mit einer Genauigkeit von $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ hergestellt.

Präzisionsschleifen (Körnung Nr. 1200–3000 $\pm$ 100) oder Ultraschallpolieren, Oberflächenrauheit Ra $<0,1\mu\text{m} \pm 0,01\mu\text{m}$ kontrollieren.

6.5 Wärmebehandlung

Durch Glühen (400–600 °C $\pm$ 10 °C, 2–4 h $\pm$ 0,1 h) werden die inneren Spannungen beseitigt und die Restspannung beträgt $<100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$.

7. Prüfmethoden

7.1 Maß- und Formgenauigkeit

Die Toleranz entspricht der Klasse GB/T 1182 IT6-IT8 bei Prüfung mit einem Koordinatenmessgerät (CMM).

7.2 Materialeigenschaften

Die Härteprüfung erfolgt gemäß GB/T 3850, die Dichte gemäß GB/T 3851 und die Druckfestigkeit gemäß GB/T 3852.

Die Bruchzähigkeit entspricht GB/T 21068 und die Wärmeleitfähigkeit entspricht ASTM E1461.

7.3 Oberflächenqualität

mit einem optischen Mikroskop (Vergrößerung $500\times \pm 50\times$) oder einem Rasterelektronenmikroskop (REM), wobei die maximale Defektgröße $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ beträgt.

7.4 Lebensdauer

Testen Sie auf einer Standardziehmaschine mit Standardziehmaterialien (z. B. Stahldraht mit 1 mm Durchmesser, Ziehgeschwindigkeit 1–5 m/s $\pm$ 0,1 m/s) und zeichnen Sie die Ziehlänge auf, bis der Verschleiß 0,05 mm $\pm$ 0,01 mm erreicht.

8. Testbedingungen

Temperatur der Testumgebung: 20–25 °C $\pm$ 2 °C, Luftfeuchtigkeit 50–70 % $\pm$ 5 %.

Auszugsprüflast: 500–2000 N $\pm$ 50 N, angepasst gemäß Formspezifikationen.

9. Kennzeichnung, Verpackung, Transport und Lagerung

9.1 Logo

Das Typenschild auf der Formoberfläche enthält Angaben zu Formnummer, Spezifikation (Durchmesser $\times$ Höhe in mm), Herstellungsdatum und Herstellername. Die Schriftgröße beträgt 3 mm $\pm$ 0,1 mm und ist deutlich sichtbar.

9.2 Verpackung

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Verwenden Sie zum Verpacken stoßfesten Schaumstoff und Korrosionsschutzpapier, legen Sie die Gegenstände in Holz- oder Plastikkisten und kennzeichnen Sie die Innenseite der Kiste mit „Vorsicht“.

9.3 Transport

Vermeiden Sie starke Vibrationen und hohe Temperaturen ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Das Transportfahrzeug muss mit Stoßdämpfern ausgestattet sein.

9.4 Lagerung

An einem trockenen und belüfteten Ort bei einer Temperatur von $0\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $<60\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$ lagern. Kontakt mit sauren oder alkalischen Substanzen vermeiden.

10. Nutzung und Wartung

10.1 Nutzungsvoraussetzungen

Um einen Thermoschock zu vermeiden, heizen Sie die Matrize vor dem Ziehen auf $50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor.

Verwenden Sie Drahtziehöl gemäß GB/T 7326 mit einer Viskosität von $20\text{--}50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$.

10.2 Wartung

Überprüfen Sie den Verschleiß der Arbeitslöcher regelmäßig alle $10^5\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$ Zuglänge.

Wenn der Verschleiß $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, polieren oder ersetzen Sie es rechtzeitig.

10.3 Verschrottungsstandards

Wenn der Durchmesser des Arbeitslochs um $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ zunimmt und die Oberflächenrisslänge $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ beträgt, wird das Teil als Ausschuss beurteilt.

11. Qualitätssicherung

Die Probenahmerate jeder Formcharge beträgt $\geq 5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$, und die qualifizierte Rate beträgt $> 95\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$.

Stellen Sie Materialzertifikate und Inspektionsberichte bereit, einschließlich Leistungstestdaten und Aufzeichnungen zur Maßprüfung.

12. Anhang (Informativ)

Referenz der Zeichenprozessparameter

Ziehgeschwindigkeit: $1\text{--}10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$. Reduktionsrate: $10\text{--}25\text{ }\% \pm 2\text{ }\%$, je nach Material.

Typische Defekte und Lösungen

Riss: Sintertemperatur anpassen oder HIP-Druck erhöhen.

Porosität: Pulvermischung optimieren oder Sinterdichte verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Was sind die Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Wärmeableitungssubstraten aus Hartmetall?

Wärmeableitende Substrate aus Hartmetall basieren auf dem Wolframkarbid-Kobalt-System (WC-Co), kombiniert mit Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit (wie Siliziumkarbid SiC, Aluminiumnitrid AlN oder Bornitrid BN) und weiteren Verstärkungsphasen (wie Titankarbid TiC oder Tantalcarbid TaC) und werden durch pulvermetallurgische Verfahren (wie heißisostatisches Pressen HIP, Sintern oder feldunterstütztes Sintern SPS) oder additive Fertigungstechnologien (wie selektives Laserschmelzen SLM oder Elektronenstrahlschmelzen EBM) hergestellt. Diese Substrate vereinen die hohe Härte, Verschleißfestigkeit und das ausgezeichnete Wärmemanagement von Hartmetall und finden breite Anwendung in Hightech-Bereichen, in denen effiziente Wärmeableitung, mechanische Festigkeit und Umwelthanpassungsfähigkeit erforderlich sind. Im Folgenden werden die verschiedenen Arten von Wärmeableitenden Substraten aus Hartmetall, professionellere und detailliertere Beschreibungen sowie Anwendungsszenarien aus drei Blickwinkeln erläutert: Arten, Eigenschaften und Anwendungsbereiche.

1. Arten von Hartmetall-Kühlkörpersubstraten

Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall werden je nach Materialzusammensetzung, Wärmeleitfähigkeitsmechanismus und Anwendungsanforderungen in verschiedene Typen unterteilt. Jeder Typ wird durch spezifische Verhältnisse und Prozesse optimiert, um die Wärmemanagementanforderungen verschiedener Szenarien zu erfüllen:

Wärmeableitungssubstrat aus reinem Wolfram-Kobalt-Hartmetall (WC-Co)

Zusammensetzung : Wolframkarbid (WC) als Hartphase, Kobalt (Co) als Bindephase, typisches Verhältnis ist WC-6 % Co, WC-10 % Co oder WC-15 % Co.

Professionelle Funktionen :

Wärmeleitfähigkeit $\sim 100-150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, hängt von der Leitfähigkeit der Co-Phase (spezifischer Widerstand $\sim 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$) und dem Phononenbeitrag von WC ab.

Härte HV 1800–2000 ± 30 , Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Porosität $<0,1 \% \pm 0,01 \%$, Korngröße $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Hohe Temperaturbeständigkeit $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, Massenverlust $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$ bei $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Herstellungsverfahren : HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) sorgt für Dichte, Präzisionsschleifen (Korngröße Nr. 1200–2000 ± 100) kontrolliert die Oberflächenrauheit $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Siliziumkarbid (WC-Co- SiC)

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit SiC ($10 \% - 30 \% \pm 2 \%$), SiC- Partikelgröße $0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$, zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturwechselbeständigkeit.

Professionelle Funktionen :

Wärmeleitfähigkeit $200-300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, SiC -Beitrag $\sim 270 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, Wärmediffusionskoeffizient $>60 \text{ mm}^2 / \text{s} \pm 5 \text{ mm}^2 / \text{s}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte HV 1900–2200 ± 30, Thermoschockbeständigkeit ($\Delta T > 500\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$, Risswachstumsrate $< 0,001\text{ mm/Zyklus} \pm 0,0001\text{ mm/Zyklus}$).

Korrosionsbeständigkeit $< 0,005\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ (in saurer oder alkalischer Lösung), Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 4,5 \times 10^{-6} / \text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / \text{°C}$.

Herstellungsverfahren : SPS ($1400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) zur Erzielung einer gleichmäßigen SiC- Verteilung , Laser-Oberflächenbehandlung (Leistung $200\text{--}400\text{ W} \pm 10\text{ W}$) zur Optimierung des Wärmeleitungspfad.

Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Aluminiumnitrid (WC-Co- AlN) Isolier-Wärmeableitungssubstrat

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit AlN ($15\text{--}25\text{ \%} \pm 2\text{ \%}$), AlN- Partikelgröße $0,5\text{--}2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, bietet elektrische Isolierung.

Professionelle Funktionen :

Wärmeleitfähigkeit $150\text{--}250\text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/ m}\cdot\text{K}$, spezifischer Widerstand $> 10^6\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, Durchschlagfestigkeit $> 15\text{ kV/mm} \pm 1\text{ kV/mm}$.

Härte HV 1800–2100 ± 30, Biegefestigkeit $> 2200\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 4,8 \times 10^{-6} / \text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / \text{°C}$, gute Übereinstimmung mit Si-Chips ($< 3\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$).

Hohe Temperaturbeständigkeit $> 900\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$, Masseverlust $< 0,01\text{ \%} \pm 0,001\text{ \%}$ bei $900\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$.

Herstellungsverfahren : CVD ($800\text{--}1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) Abscheidung einer AlN- Schicht (Dicke $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) , HIP ($1350\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) zur Verbesserung der Schnittstellenbindung.

Wärmeableitungssubstrat aus Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Bornitrid (WC-Co-BN)-Verbundwerkstoff

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit hexagonalem Bornitrid (h-BN, $5\text{ \%--}15\text{ \%} \pm 1\text{ \%}$), h-BN-Schichtdicke $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, zur Verbesserung der Selbstschmierung und Wärmeleitfähigkeit.

Professionelle Funktionen :

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt $180\text{--}280\text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/ m}\cdot\text{K}$. Die Wärmeleitfähigkeit von h-BN entlang der Ebene beträgt $\sim 300\text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/ m}\cdot\text{K}$ und in vertikaler Richtung $\sim 30\text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/ m}\cdot\text{K}$.

Härte HV 1700–2000 ± 30, Reibungskoeffizient $< 0,1 \pm 0,01$, Verschleißfestigkeit $< 0,03\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

Korrosionsbeständigkeit $< 0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5 \times 10^{-6} / \text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / \text{°C}$.

Herstellungsverfahren : Kugelmahlen (Geschwindigkeit $200\text{--}300\text{ U/min} \pm 10\text{ U/min}$, Zeit $24\text{--}48\text{ h} \pm 1\text{ h}$), um eine gleichmäßige Verteilung von h-BN zu gewährleisten, SPS-Sintern ($1300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $40\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) .

Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Titankarbid-Tantalkarbid (WC-Co- TiC- TaC) Mehrphasen-Wärmeableitungssubstrat

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit TiC ($5\text{--}10\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) und TaC ($2\text{--}5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Partikelgröße $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, zur Verbesserung der Hochtemperaturleistung.

Professionelle Funktionen :

Wärmeleitfähigkeit $120-200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, hohe Temperaturbeständigkeit $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, Masseverlust $<0,01\% \pm 0,001\%$ bei $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Härte HV 2000–2300 ± 30 , thermische Ermüdungsbeständigkeit ($> 6000\text{-fach} \pm 500\text{-fach}$), Druckfestigkeit $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Korrosionsbeständigkeit $<0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Herstellungsverfahren : HIP ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $250 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) kombiniert mit Plasmaspritzen einer TiC-TaC- **Beschichtung** (Dicke $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) .

WC-Co-Graphen-Nanokomposit-Wärmeableitungssubstrat

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit Graphen ($1\%-5\% \pm 0,5\%$), Graphenschichtdicke $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$, Länge $1-10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Professionelle Funktionen :

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt $250-350 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, Graphen trägt $\sim 5000 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 500 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bei (entlang der Ebene).

Härte HV 1900–2200 ± 30 , Biegezugfestigkeit $>2300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Temperaturleitfähigkeit $>80 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Korrosionsbeständigkeit $<0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Herstellungsverfahren : Flüssigphasen-Ultraschalldispersion (Leistung $200-400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Zeit $1-2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) gemischtes Graphen, SPS-Sinterung ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $60 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) .

Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Borcarbid (WC-Co-B4C) hochfestes Wärmeableitungssubstrat

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit Borcarbid (B4C, $5\% - 15\% \pm 1\%$), B4C - Partikelgröße $0,5 - 2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit.

Professionelle Funktionen :

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt $150-250 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, wobei B4C etwa $200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ beiträgt .

Härte HV 2000–2400 ± 30 , Verschleißfestigkeit $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Druckfestigkeit $>5000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Hohe Temperaturbeständigkeit $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Masseverlust $<0,01\% \pm 0,001\%$ bei $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Herstellungsverfahren : HIP ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) kombiniert mit B4C-Vordispersierung (Ultraschall $30-60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$), Oberflächengüte $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Verschleißfestes Wärmeableitungssubstrat aus Wolfram-Kobalt-Hartmetall-Titannitrid (WC-Co- TiN)

Zusammensetzung : WC-Co-Matrix dotiert mit Titannitrid (TiN , $5\%-10\% \pm 0,5\%$), TiN- Partikelgröße $0,5-1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeleitfähigkeit.

Professionelle Funktionen :

Wärmeleitfähigkeit $120-200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, TiN trägt $\sim 20 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bei (Hilfseffekt).

Härte HV $1900-2200 \pm 30$, Verschleißfestigkeit $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, Biegefestigkeit $> 2100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Korrosionsbeständigkeit $< 0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, Hochtemperaturbeständigkeit $> 850^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Herstellungsverfahren : SPS ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) kombiniert mit PVD- TiN-Beschichtung (Dicke $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), Präzisionsschleifen zur Optimierung der Oberfläche.

2. Eigenschaften des Wärmeableitungssubstrats aus Hartmetall

Die Leistungsfähigkeit von Hartmetall-Kühlkörpergrundplatten wird durch Materialdesign und Prozessoptimierung erreicht. Ihre Eigenschaften bieten erhebliche Vorteile bei hoher thermischer Belastung, mechanischer Beanspruchung und in korrosiven Umgebungen:

Hohe Wärmeleitfähigkeit

Bereich: $100-350 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (je nach Typ), Graphen- oder SiC- verstärkte Typen können $300-350 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ erreichen .

Mechanismus: Die Phonon-Elektron-Kopplung von WC-Co (mittlere freie Weglänge der Phononen $\sim 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) und die Gitterwärmeleitfähigkeit von SiC /h-BN (Phononengeschwindigkeit $\sim 10^4 \text{ m/s} \pm 10^3 \text{ m/s}$) wirken synergistisch.

Vorteile: Thermische Reaktionszeit $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, Wärmestromdichteunterstützung $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$, geeignet für Hochleistungselektronik.

Hohe Temperaturstabilität

Bereich: $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ (Typ TiC -TaC oder B4C $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), thermische Zykluslebensdauer $> 5000\text{-mal} \pm 500\text{-mal}$.

Mechanismus: Die hochtemperaturstabile Phase von WC (Schmelzpunkt $\sim 2870^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) und der plastische Puffer der Co-Phase (Streckgrenze $\sim 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) widerstehen gemeinsam thermischer Belastung.

Vorteile: Gute Anpassung der Wärmeausdehnung ($< 5 \% \pm 1 \%$ bei SiC / AlN), reduzierte thermische Ermüdungsrisse (Länge $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Hervorragende mechanische Eigenschaften

Härte: HV $1700-2400 \pm 30$, Druckfestigkeit $4000-5000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Biegefestigkeit $2000-2300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Mechanismus: Dispersionsverfestigung von Nanokörnern ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und Verstärkungsphasen (wie TiC , B4C), Bruchzähigkeit $10-15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Vorteile: Beständig gegen mechanische Stöße ($> 1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$), Vibrationstoleranz $> 50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, geeignet für Umgebungen mit hoher Belastung.

Chemische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsrate: $< 0,005-0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, TiC-TaC- oder Graphentyp $< 0,005$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm/Jahr $\pm$ 0,001 mm/Jahr.

Mechanismus: Die Oberflächenpassivierungsschicht (Dicke $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) und die inerte Phase (Elektronenaffinität $\sim 0,87 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$) widerstehen Säure- und Alkalikorrosion.

Vorteile: Geeignet für Elektrolyt- (pH 7-9) oder Meerwasserumgebung, Ionenmigration $<0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Elektrische Eigenschaften (optionale Isolierung)

Spezifischer Widerstand: $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (reines WC-Co), $>10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ (Typ AlN oder TiN).

Mechanismus: AlN -Bandlücke $\sim 6,2 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$ oder TiN- Halbleitereigenschaften (Bandlücke $\sim 3,4 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) sorgen für Isolierung, Durchschlagfestigkeit $>15 \text{ kV/mm} \pm 1 \text{ kV/mm}$.

Vorteile: Unterstützt Hochspannungsgeräte ($>1000 \text{ V} \pm 100 \text{ V}$), elektromagnetische Abschirmeffizienz $>90 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$.

Verarbeitung und Anpassung

Genauigkeit: $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, Oberflächenrauheit $R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Mechanismus: SLM (Schichtdicke $20\text{--}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) oder EDM (Genauigkeit $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) zur Erzielung von Mikrostrukturen (z. B. Mikrokanäle $0,1\text{--}0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$).

Vorteile: Unterstützt Sonderformen (komplexer Oberflächenfehler $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$), Gewichtsoptimierung $12\text{--}15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$.

3. Anwendungsgebiete von Hartmetall-Wärmeableitungssubstraten

Kühlkörpersubstrate aus Hartmetall werden aufgrund ihrer umfassenden Eigenschaften zunehmend bei hoher Wärmebelastung und in rauen Umgebungen eingesetzt:

Anwendung im Bereich der Fahrzeuge mit neuer Antriebsenergie

Leistungsbatteriemodul: Größe $200\text{--}500 \text{ mm} \times 200\text{--}300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, Temperaturbereich $30\text{--}60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, Wärmestrom $>50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$.

Motorsteuerung: unterstützt IGBT (Leistung $>100 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$), Sperrschichttemperatur $<125^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, Wärmewiderstand $<0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$.

Ladesäule: Hochspannungsmodul (Strom $>200 \text{ A} \pm 20 \text{ A}$, Spannung $>500 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$), Wärmeableitungseffizienz $>90\% \pm 2\%$.

Wasserstoff-Brennstoffzellen: Unterstützung für Protonenaustauschmembran (PEM, Temperatur $60\text{--}80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), Wärmemanagementleistung $>20 \text{ W/cm}^2 \pm 2 \text{ W/cm}^2$.

Vorteile :

Durch die schnelle Wärmeableitung wird das Risiko eines thermischen Durchgehens verringert (Temperaturgradient $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$) und die Zykluslebensdauer beträgt $>1000\text{-mal} \pm 100\text{-mal}$.

Vibrationsfestigkeit $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, entspricht Automobilnormen (ISO 16750), mechanische Lebensdauer $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$.

Elektrolytkorrosion $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, IP67-Schutz, Gewichtsreduzierung $10\text{--}15\% \pm 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Luft- und Raumfahrttelektronik

Anwendung :

Radarsysteme: Hochfrequenzverstärker (Leistung $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$), -40°C bis $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

Satellitenkomponenten: Wärmekontrollplatten ($100\text{--}300 \text{ mm} \times 100\text{--}200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$),
Raumwärmestrom $>10 \text{ W/m}^2 \pm 1 \text{ W/m}^2$.

Flugsteuerungseinheit: Unterstützungsprozessor (Leistung $>30 \text{ W} \pm 3 \text{ W}$), Vibration $>20 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$.

Vorteile :

Temperaturschwankung $\Delta T >200^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, Wärmeausdehnung passend zur Invar-Legierung $<5\% \pm 1\%$.

Vakuumkorrosionsbeständigkeit $<0,005 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, Gewicht $<1 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$.

5G-Kommunikationsausrüstung

Anwendung :

HF-Modul der Basisstation: Leistung $>100 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Wärmestrom $>30 \text{ W/cm}^2 \pm 3 \text{ W/cm}^2$.

Antennenarray: Mehrkanalplatine ($300\text{--}600 \text{ mm} \times 200\text{--}400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), Frequenz $3\text{--}5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$.

Miniaturisierter Repeater: unterstützt dichte Bereitstellung (Leistung $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$), Temperatur $<70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Vorteile :

Wärmeleitfähigkeit $>200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, Lebensdauer $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$.

Elektromagnetische Störungen $>90 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$, Integrationsdichte $>100 \text{ Chips/m}^2 \pm 10 \text{ Chips/m}^2$.

Industrielle Leistungselektronik

Anwendung :

Wechselrichter: MOSFET/IGBT (Leistung $>200 \text{ kW} \pm 20 \text{ kW}$), Wärmewiderstand $<0,2 \text{ K/W} \pm 0,02 \text{ K/W}$.

Transformator: Hochfrequenz-Grundplatte ($200\text{--}400 \text{ mm} \times 200\text{--}300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), Frequenz $10\text{--}50 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$.

Gleichrichter: Unterstützt Hochstrommodule ($>300 \text{ A} \pm 30 \text{ A}$), Temperatur $<100^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Vorteile :

Hochspannungsfestigkeit $>1000 \text{ V} \pm 100 \text{ V}$, Isolierung $>10^6 \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5 \Omega\cdot\text{cm}$.

Vibrationsfestigkeit $>100 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$, Dauerbetrieb $>10^5 \text{ h} \pm 10^4 \text{ h}$.

Hochwertige Fertigungsanlagen

Anwendung :

Laser: Hochleistungsdiode (Leistung $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$), Wärmestrom $>20 \text{ W/cm}^2 \pm 2 \text{ W/cm}^2$.

CNC-Maschine: Spindelplatte ($300\text{--}500 \text{ mm} \times 200\text{--}400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), Geschwindigkeit $>10.000 \text{ U/min} \pm 1.000 \text{ U/min}$.

Halbleiterausüstung: Unterstützung von Ätzheizplatten (Temperatur $200\text{--}400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), thermische Gleichmäßigkeit $<2^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Vorteile :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Härte HV 1800–2300 ± 30, Verschleißfestigkeit <0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m.

Thermische Stabilität >800°C ± 20°C, Lebensdauer >10⁴ h ± 10³ h.

Medizinische elektronische Geräte

Anwendung :

MRT-Magnete: Unterstützung der supraleitenden Magnetkühlung (Temperatur <20 K ± 2 K), Wärmefluss >10 W/cm² ± 1 W/cm².

Radiofrequenzablatores: Wärmemanagementplatte (Größe 100–200 mm × 100–150 mm ± 5 mm), Leistung > 50 W ± 5 W.

Vorteile :

Biokompatible Beschichtung (TiN , antibakterielle Wirkung >90 % ± 2 %), Wärmeleitfähigkeit >150 W/ m·K ± 10 W/ m · K.

Strahlungsbeständig (<0,01 Gy/h ± 0,001 Gy/h), Genauigkeit <0,01 mm ± 0,001 mm.

Anlagen für erneuerbare Energien

Anwendung :

Photovoltaik-Wechselrichter: unterstützt Hochleistungsmodule (Leistung >150 kW ± 15 kW), Temperatur <90°C ± 5°C.

Windkraft-Steuergerät: Wärmemanagementplatte (Größe 300–600 mm × 200–400 mm ± 5 mm), Vibration > 30 g ± 3 g.

Vorteile :

Wärmeleitfähigkeit >200 W/ m·K ± 10 W/ m · K , Lebensdauer >10⁴ h ± 10³ h.

Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr ± 0,001 mm/Jahr, geeignet für den Außenbereich (Schutzart IP65).

4. Zukünftige Entwicklungsrichtung des Wärmeableitungssubstrats aus Hartmetall

Materialoptimierung : Entwicklung eines WC- SiC - AlN -Graphen-Vierphasenkomposits (SiC 20–30 % ± 2 %, AlN 10–20 % ± 2 % , Graphen 1–5 % ± 0,5 %), Wärmeleitfähigkeit > 400 W/ m·K ± 10 W/ m · K .

Prozessinnovation : Herstellung mehrskaliger Mikrokanäle mittels EBM (Strahlstromdichte >10⁴ A/m² ± 10³ A/m²), Wärmewiderstand <0,02 K/W ± 0,01 K/W.

Intelligent : Integriertes Thermoelement (Genauigkeit <0,05 °C ± 0,01 °C) und KI-Algorithmus optimieren die Wärmeableitungseffizienz >95 % ± 2 %.

Nachhaltigkeit : Recycling von WC-Co-Pulver (Recyclingrate >95 % ± 2 %) und Grünsintern (Energieverbrauch <6 kWh/kg ± 1 kWh/kg).

Wärmeableitende Hartmetallsubstrate bieten großes Anwendungspotenzial in Hightech-Bereichen. Ihre Nachfrage in Fahrzeugen mit alternativer Antriebstechnologie, der Luft- und Raumfahrt sowie der 5G-Kommunikation wächst stetig. Durch mehrphasige Verbundwerkstoffe und intelligente Fertigung werden die Wärmemanagementleistung und die Marktwettbewerbsfähigkeit künftig weiter verbessert.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Zugehörige Normen für Wärmeableitungssubstrate aus Hartmetall

Ein vollständig einheitliches und allgemein anerkanntes internationales System konnte bisher nicht etabliert werden. Dies liegt vor allem an den vielfältigen Anwendungsbereichen (z. B. Fahrzeuge mit alternativer Antriebstechnik, Luft- und Raumfahrt, 5G-Kommunikation usw.) und der rasanten technologischen Entwicklung. Nachfolgend finden Sie eine Übersicht über die Normen, die auf Hartmetall-Wärmeableitungssubstrate anwendbar sein können, basierend auf bestehenden Branchenpraktiken und relevanten Materialnormen:

Allgemeine Werkstoffnormen

Allgemeine technische Anforderungen an Hartmetall

Beachten Sie die chinesische nationale Norm „GB/T 5242-2006 Allgemeine technische Bedingungen für Hartmetall“, in der die Zusammensetzung, Eigenschaften (wie Wärmeleitfähigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit) und Qualitätskontrollanforderungen von Hartmetall festgelegt sind und die als Grundlage für die Auswahl der Rohstoffe für Wärmeableitungssubstrate verwendet werden kann.

Eigenschaften des Wärmemanagementmaterials

Wärmeableitende Substrate müssen eine hohe Wärmeleitfähigkeit ($> 100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) und mechanische Festigkeit (Härte HV 1800–2000 ± 30) aufweisen, was in der Industrie weit verbreitet ist.

Industrielle anwendungsbezogene Standards

Standards für elektronische Verpackungen

Informationen zu Hartmetall-Wärmeableitungssubstraten, die in elektronischen Geräten verwendet werden, finden Sie in der „IPC-4101 Laminate Material Specification“, die die Anforderungen an die Wärmeleistung und Dimensionsstabilität von Substratmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit umfasst und für das Wärmeableitungsdesign in mikroelektronischen Verpackungen geeignet ist.

Bereich der Fahrzeuge mit neuer Energie

Das Wärmeableitungssubstrat muss möglicherweise den „Technischen Bedingungen für Wärmemanagementkomponenten von Batterien für Elektrofahrzeuge“ von QC/T 1073-2020 entsprechen, die bestimmte Anforderungen an den Wärmewiderstand ($< 0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$), die Temperaturbeständigkeit ($> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) und die Vibrationsbeständigkeit ($> 50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$) von Wärmemanagementmaterialien stellen.

Luft- und Raumfahrtstandards

Informationen zur thermischen Stabilität und Wärmeleitfähigkeit von Materialien in Hochtemperaturumgebungen, die für Kühlkörpersubstrate in der Avionik geeignet sind, finden Sie in der AMS 2750-Spezifikation zur Wärmebehandlung oder in ähnlichen Militärstandards.

Internationale Referenzstandards

ISO-Normen

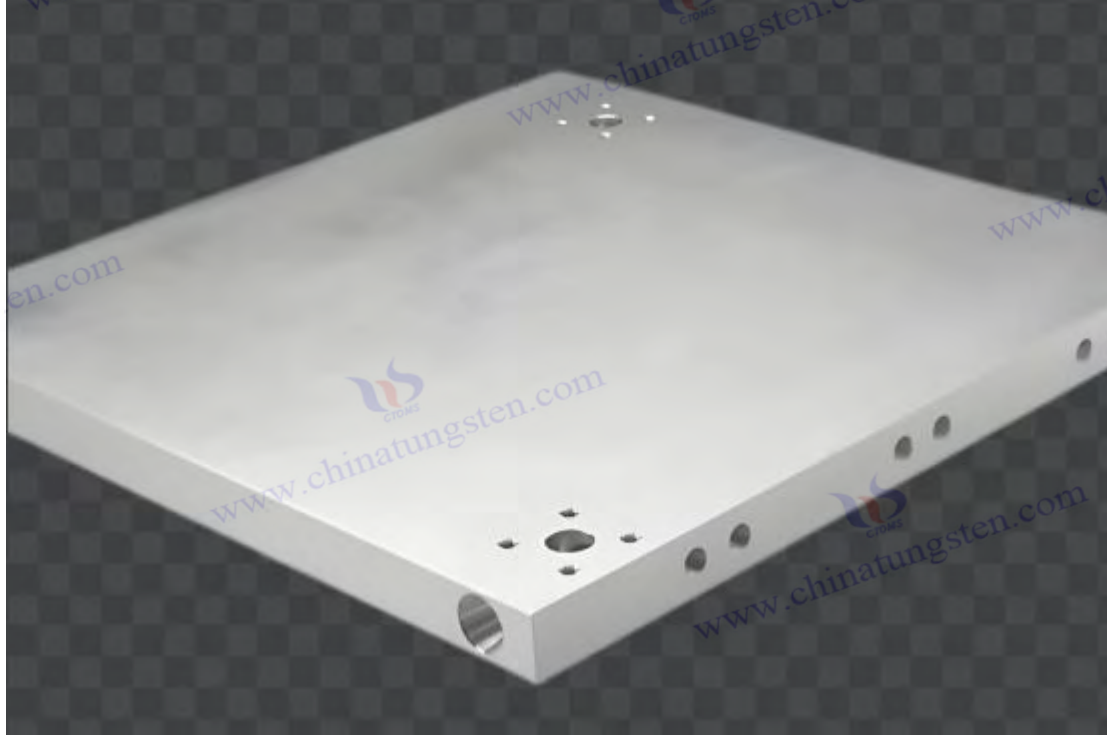
ISO 18514 (Wärmeleitfähigkeitsprüfung von Keramik- und Metallverbundwerkstoffen) kann zur Bewertung der Wärmeleitfähigkeit von Kühlkörpersubstraten aus Hartmetall verwendet werden; ISO 17864 (Wärmeausdehnungsprüfung von Hochleistungskeramik) kann als Leitfaden für

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Wärmeausdehnungsanpassungsprüfungen dienen.

ASTM-Normen

ASTM E1461 (Messung der Wärmeleitfähigkeit) kann verwendet werden, um die Wärmemanagementeffizienz von Kühlkörpersubstraten für Hochleistungsanwendungen zu überprüfen.



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

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

Welche Anwendungen gibt es für Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung?

Als traditioneller Hochleistungswerkstoff hat Hartmetall (mit dem Wolframkarbid-Kobalt-System WC-Co als Kern) in den letzten Jahren zunehmend Einzug in die Anwendungsforschung der Katalyse und Energiespeicherung gehalten, insbesondere im Kontext der rasanten Entwicklung der Energieumwandlungs- und -speichertechnologie. Dank seiner hervorragenden mechanischen Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturstabilität und einzigartigen elektronischen Struktureigenschaften hat Hartmetall großes Potenzial in den Bereichen Elektrokatalyse, Thermokatalyse, Brennstoffzellen, Superkondensatoren und Wasserstoffspeicherung gezeigt, insbesondere in Kombination mit Hochentropielegierungen (HEA), Nanotechnologie und Oberflächenfunktionalisierungstechnologie. Obwohl die Anwendung im biomedizinischen Bereich bereits weiter fortgeschritten ist, steht die Erforschung von Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung weiterhin im Vordergrund und umfasst multidisziplinäre Schnittstellen, darunter Materialwissenschaften, Elektrochemie, physikalische Chemie und Computersimulation. Im Folgenden werden die spezifischen Anwendungen von Hartmetall in diesen Bereichen erläutert und die neuesten Forschungsergebnisse und technischen Details kombiniert, um das Wissenssystem umfassend zu erweitern.

Anwendungen in der Katalyse

Elektrokatalytische Reaktion:

Die Anwendung von Hartmetall in der Elektrokatalyse konzentriert sich hauptsächlich auf die katalytische Optimierung wichtiger Prozesse elektrochemischer Reaktionen wie Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR), Wasserstoffentwicklungsreaktion (HER) und Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER). Diese Reaktionen bilden die Grundlage für Wasserstoffenergie, Brennstoffzellen und Wasserelektrolyse. Herkömmliche Edelmetallkatalysatoren (wie Platin Pt, Iridium Ir und Ruthenium Ru) sind aufgrund ihrer hohen Kosten und Ressourcenknappheit eingeschränkt. Hartmetall (insbesondere WC und seine Derivate) hingegen hat sich aufgrund seiner Pt-ähnlichen d-Band-Elektronenstruktur und seiner hervorragenden chemischen Stabilität zu einem potenziellen Ersatz für Nichtelegierungen entwickelt.

Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) : WC-Co-basiertes Hartmetall verbessert die katalytische Leistung der ORR erheblich, wenn es mit Hochentropielegierungen (wie PtPdFeCoNi) kombiniert wird. Der Entropiestabilisierungseffekt und die Gitterverzerrung von Hochentropielegierungen verbessern die Freilegung aktiver Stellen und die Effizienz des Elektronentransfers. Studien haben beispielsweise gezeigt, dass die Massenaktivität und die spezifische Aktivität von PtPdFeCoNi-Nanopartikeln bei 0,9 V vs. RHE 0,25 A/mg Pt bzw. 0,12 mA/cm² betragen und damit 6,2-mal bzw. 4,9-mal höher sind als beim kommerziellen 20 % Pt/C-Katalysator. Darüber hinaus kann WC als Träger die Agglomeration und Oxidation von Pt-Nanopartikeln verhindern. Haltbarkeitstests zeigen, dass es nach 10.000 Zyklen immer noch über 90 % Aktivität behält, was besser ist als 70–80 % von Pt/C.

Wasserstoffentwicklungsreaktion (HER) und Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER) : Nanostrukturen aus Carbide (z. B. Ni₂₀Fe₂₀Mo₁₀Co₃₅Cr₁₅ HEA) weisen in der HER eine niedrige

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Überspannung (ca. 107 mV bei 10 mA/cm²) und Tafel-Steigung (<50 mV/dec) auf, was auf eine schnelle Reaktionskinetik hindeutet. Für die OER haben Materialien auf WC-Co-Basis durch Oberflächendotierung (z. B. Ni oder Fe) eine optimierte freie Adsorptionsenergie (ΔG_{H^*} nahe 0 eV), mit einer Überspannung von ca. 300 mV bei einer Stromdichte von 10 mA/cm² in einem alkalischen Elektrolyten (1 M KOH) und einer Stabilität von bis zu 50 Stunden, wodurch sie für die Wasserelektrolyse im großen Maßstab zur Herstellung von Wasserstoff geeignet sind.

Anwendungen : Diese Katalysatoren werden häufig in Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs), alkalischen Elektrolyseuren und Wasserstoffproduktionssystemen verwendet, die auf erneuerbaren Energien basieren.

Wasserspaltung und Wasserstoffproduktion

Die vollständige Wasserspaltung ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$) ist eine Kerntechnologie für die nachhaltige Wasserstoffproduktion und Hartmetall hat in diesem Bereich bifunktionales elektrokatalytisches Potenzial gezeigt. In der Studie wurden aus Hartmetall gewonnene hohle CoS₂-Nanoröhren-Arrays durch Flüssigphasenabscheidungs- und Schwefelungsprozesse als bifunktionale Katalysatoren für Kathode (HER) und Anode (OER) hergestellt. In 1,5 M KOH-Elektrolyt betrug die Zellspannung 1,67 V bei einer Stromdichte von 10 mA/cm², was viel niedriger ist als beim herkömmlichen IrO₂/Pt-Paar (1,8 V), und der Faradaysche Wirkungsgrad lag nach 20 Stunden Dauerbetrieb immer noch über 95 %. Die hervorragende Leistung dieses Materials ist auf seine große spezifische Oberfläche (>100 m²/g) und die zahlreichen aktiven Randstellen zurückzuführen. Darüber hinaus wird die Leitfähigkeit und Stabilität des WC-Co-basierten Katalysators durch die Verbindung mit Kohlenstoffnanoröhren (CNT) oder Graphen weiter verbessert, sodass er sich für solarbetriebene Wasserspaltgeräte eignet.

CO₂-Reduktionsreaktion (CO₂RR) Die

CO₂-Reduktion ist ein wichtiges Mittel zum Kohlenstoffrecycling. Hartmetallähnliche Materialien zeigen Potenzial in der CO₂RR durch Anpassung der elektronischen Struktur und der Oberflächenadsorptionsenergie. Durch die Kombination von Hochentropielegierungen (wie CuFeCoNiZn) mit WC wird das Adsorptions-/Desorptionsgleichgewicht von CO₂-Molekülen und Zwischenprodukten optimiert und C₂⁺-Kohlenwasserstoffe (wie Ethanol und Ethylen, Faraday-Effizienz > 60 %) werden mit hoher Selektivität erzeugt. Dichtefunktionaltheorie (DFT)-Berechnungen zeigen, dass die Abwärtsverschiebung des d-Bandzentrums der Cu-Stelle die *CO-Kopplungsreaktion verstärkt, während die Leitfähigkeit von WC (> 100 S/cm) den Elektronentransfer fördert. Im Jahr 2025 hat dieser Katalysator mit der Weiterentwicklung der Ziele der Kohlenstoffneutralität große Aussichten für die CO₂-Abscheidung und -Umwandlung im industriellen Maßstab.

Anwendung in der Energiespeicherung

Batterietechnologie Der Einsatz von

Hartmetall-basierten Werkstoffen in neuen Batteriesystemen spiegelt sich vor allem in der Entwicklung von Elektrodenmaterialien wider, insbesondere in Lithium-Luft-Batterien, Zink-Luft-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien.

Lithium-Luft- Batterien : Hochentropische Spinelloxide (wie FeCoNiMnPtIr) als Kathodenkatalysatoren reduzieren die Wiederaufladeüberspannung deutlich (<0,5 V vs. Li/Li⁺) und

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gewährleisten bei einer Stromdichte von 1000 mA/g eine Kapazitätserhaltung von 80 % (500 Zyklen). Der synergistische Multielementeffekt optimiert die Bildungs-/Zersetzungskinetik von O_2^- und Li_2O_2 und eignet sich daher für Energiespeicher mit hoher Energiedichte.

Zink-Luft- Batterien : Nanopartikel aus WC-Co weisen durch Oberflächenmodifizierung (wie N-Dotierung) verbesserte ORR- und OER-Aktivitäten auf, mit einer Leerlaufspannung von 1,45 V und einer Lebensdauer von mehr als 200 Stunden, wodurch sie sich für die Notstromversorgung von Elektrofahrzeugen eignen.

Lithium-Ionen -Batterien : Hochentropielegierungen auf Hartmetallbasis (wie TiNbTaZrHf) als Materialien für die negative Elektrode weisen eine hohe spezifische Kapazität ($> 500 \text{ mAh/g}$) und eine ausgezeichnete Zyklenstabilität (Kapazitätsabfall $< 10 \%$ nach 1000 Zyklen) auf, und ihr Hochentropieeffekt hemmt die Volumenausdehnung.

Aus Hartmetall gewonnene Nano-Hochentropielegierungen für Superkondensatoren (wie NiFeCoCuMn) wurden aufgrund ihrer porösen Struktur (Porosität $50\text{--}70 \pm 5 \%$) und hohen spezifischen Oberfläche ($> 200 \text{ m}^2/\text{g}$) als Elektrodenmaterialien für Superkondensatoren entwickelt. Im Elektrolyten $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ kann die Kapazität 300 F/g erreichen, die Energiedichte liegt bei 20 Wh/kg , die Leistungsdichte bei 500 W/kg und die Zyklenstabilität bei bis zu 10.000-fach (Kapazitätserhaltungsrate $> 90 \%$). Die hervorragende Leistung ist auf den Ladungstransfer und die Gitterverzerrung zwischen mehreren Elementen zurückzuführen, wodurch die Ionendiffusion des Elektrolyten und die Ladungsspeicherkapazität verbessert werden. Daher eignet es sich für die sofortige Energiefreisetzung in Hybridfahrzeugen.

Materialien, die Hartmetall mit hochentropischen Legierungen zur Wasserstoffenergiespeicherung kombinieren (wie etwa Verbundwerkstoffe auf CoCrFeNiTi -Basis), zeigen eine hohe Wasserstoffspeicherfähigkeit ($> 2 \text{ Gew.} \%$) und strukturelle Stabilität bei der Wasserstoffenergiespeicherung im festen Zustand . WC-Co-basierte Materialien optimieren die Dissoziation und Diffusion von Wasserstoffmolekülen durch Oberflächenmodifizierung (wie etwa Pd-Beschichtung, Dicke $10\text{--}20 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$), mit einem Betriebstemperaturbereich von $25\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Wasserstoffabsorptions-/Dehydrierungszykluslebensdauer von mehr als 100-mal. In Kombination mit einer nanoporösen Struktur (Porengröße $5\text{--}20 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) eignet sich dieses Material für mobile Energiespeichergeräte und Wasserstoffspeichertanks für Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) und befindet sich 2025 in der industriellen Pilotphase.

Technische Vorteile und Herausforderungen

Vorteile :

Mechanische und chemische Stabilität : Die hohe Härte ($\text{HV } 1800\text{--}2000 \pm 30$) und Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $< 0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) des WC-Co-Systems sorgen für eine gute Leistung in rauen Umgebungen.

Kosteneffizienz : Durch die Kombination von Hartmetall mit einer Legierung mit hoher Entropie kann die Menge der verwendeten Edelmetalle erheblich reduziert werden (Pt-Beladung auf bis zu $5 \pm 1 \%$), wodurch die Katalysatorkosten gesenkt werden .

Abstimmbarkeit : Die elektronische Struktur und die Oberflächeneigenschaften von Hartmetall können durch Elementdotierung (wie TiC , TaC) oder Oberflächentechnik.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herausforderung :

Komplexität der Synthese : Die Herstellung von Legierungen und Nanostrukturen mit hoher Entropie erfordert eine präzise Kontrolle der Zusammensetzung und der Wärmebehandlungsbedingungen (z. B. SPS $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, HIP $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und die Prozesskosten sind hoch.

Begrenzung der aktiven Stelle : Die Oberflächenträgheit von WC begrenzt seine inhärente katalytische Aktivität und es muss auf Nanoskalierung oder Komposit zurückgegriffen werden, um die spezifische Oberfläche ($<100\text{ m}^2/\text{g}$) zu erhöhen.

Forschungsdefizite : Es werden mehr Daten benötigt , um die Langzeitstabilität von Hochentropielegierungen in komplexen atomaren Umgebungen zu belegen, und DFT-Simulation und maschinelles Lernen müssen weiter überprüft werden.

Zukünftige Entwicklungsrichtung

Mit der Beschleunigung der Energiewende im Jahr 2025 wird sich die Anwendung von Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung auf folgende Richtungen konzentrieren:

Nanoengineering : Entwicklung ultrafeiner Nanopartikel ($<10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) und poröser Strukturen zur Erhöhung der aktiven Zentrumsdichte.

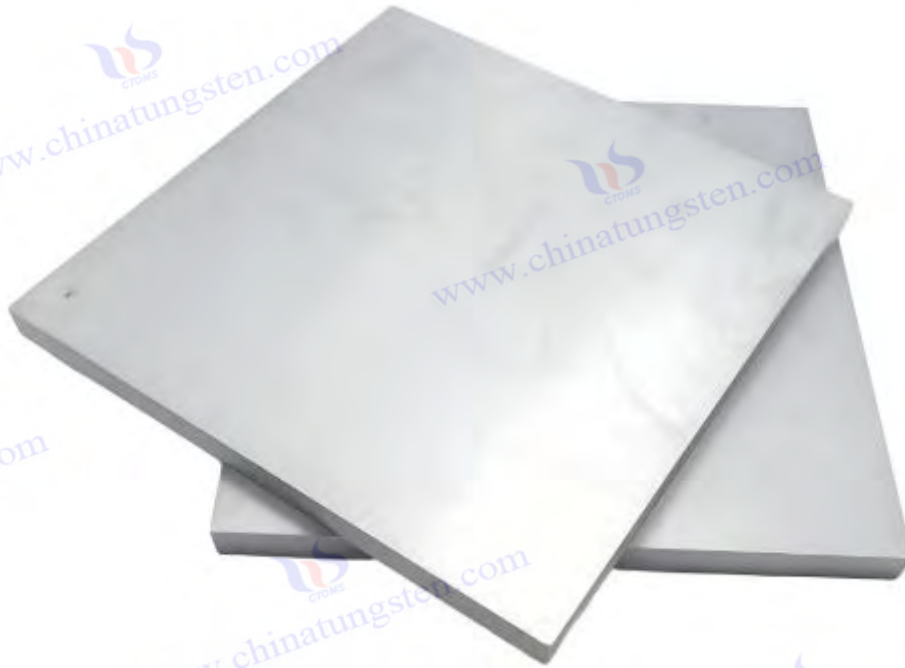
Intelligentes Design : Beschleunigen Sie die Materialoptimierung, indem Sie maschinelles Lernen verwenden, um die optimale Legierungszusammensetzung und Oberflächenmodifizierungsschemata vorherzusagen.

Nachhaltigkeit : Entwicklung von Hartmetallformulierungen mit niedrigem oder keinem Kobaltgehalt, die den Umweltstandards RoHS und REACH entsprechen.

Integrierte Anwendung : Integrieren Sie Karbidkatalysatoren in Energiespeichersysteme (wie etwa Brennstoffzellen-Superkondensator-Hybridsysteme), um die Gesamteffizienz zu verbessern.

Das Potenzial von Hartmetall in den Bereichen Katalyse und Energiespeicherung wird durch multidisziplinäre Forschungsk Kooperationen schrittweise erschlossen. Insbesondere im Hinblick auf die Ziele der Wasserstoffwirtschaft und der CO₂- Neutralität gewinnt seine Rolle als Brückenwerkstoff zwischen traditionellen Industrien und neuen Energietechnologien zunehmend an Bedeutung.

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

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

Welche Anwendungen gibt es für Hartmetall im medizinischen Bereich?

Als technischer Hochleistungswerkstoff erregt Hartmetall (dargestellt durch das Wolframkarbid-Kobalt-System WC-Co) aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften, seiner chemischen Stabilität und seiner potenziellen Biokompatibilität im medizinischen Bereich zunehmend die Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Industrie. Hartmetall ist bekannt für seine ultrahohe Härte (Härtebereich HV 1800–2000 $\pm$ 30, etwa 9–10 auf der Mohs-Härteskala), ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), Korrosionsbeständigkeit (Korrosionsrate $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) und Leistungsanpassbarkeit durch Oberflächentechnik und Elementdotierung, was es zu einem zentralen Werkstoff in der Orthopädie, Zahnmedizin, Herz-Kreislauf- und Neurochirurgie und anderen Bereichen macht. In den letzten Jahren hat sich der Anwendungsbereich von Hartmetall mit dem Fortschritt fortschrittlicher Fertigungstechnologien (wie additiver Fertigung und Nanotechnologie) und der Oberflächenfunktionalisierung von traditionellen chirurgischen Instrumenten auf Implantate und Gerüste für die Gewebezüchtung erweitert. Dies zeigt einen erheblichen klinischen Nutzen und großes wissenschaftliches Forschungspotenzial. Im Folgenden wird die Anwendung von Hartmetall im medizinischen Bereich umfassend und detailliert erläutert, und zwar aus der Perspektive von Anwendungsszenarien, technischen Anforderungen, Herstellungsprozessen, materialwissenschaftlichen Grundlagen und zukünftigen Forschungsrichtungen aus einer hochwissenschaftlichen und professionellen Perspektive.

Anwendung von Hartmetall in orthopädischen Implantaten

In der Orthopädie wird Hartmetall hauptsächlich in Hüftprothesen, Knieprothesen, Wirbelsäulenfixierungssystemen und Gelenkfusionssystemen eingesetzt und dient klinischen Anforderungen wie der Frakturfixierung, dem Gelenkersatz, der Wirbelsäulenkorrektur und der Knochenrekonstruktion. Das Design dieser Implantate muss biomechanische Kompatibilität, Langzeitstabilität und eine nahtlose Integration in das Wirtsgewebe gewährleisten.

Hartmetall-Hüftprothesen

Hartmetall-Hüftprothesen werden zur Behandlung von fortgeschrittener Arthrose, aseptischer Nekrose des Femurkopfes, Deformitäten nach Hüftfrakturen oder angeborener Hüft dysplasie durch eine totale Hüftarthroplastik (THA) verwendet. Zu seinen Kernkomponenten gehören der Femurschaft und die Hüftgelenkspfanne, die üblicherweise aus der WC-6Co-Formel (Kobaltgehalt $6 \% \pm 1 \%$, Wolframgehalt $94 \% \pm 1 \%$) durch Funkenplasmasintern (SPS, $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder heißisostatisches Pressen (HIP, $1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) hergestellt werden, um eine hohe Dichte (Porosität $<0,1 \% \pm 0,01 \%$) und eine gleichmäßige Nanokornstruktur ($0,5\text{--}1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$) zu erreichen.

Technische Anforderungen :

Mechanische Eigenschaften: Verschleißfestigkeit ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), um langfristigen zyklischen Belastungen standzuhalten ($>1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, wie z. B. Gehen für etwa $10^6 - 10^7$ Zyklen, entsprechend 10–15 Jahren täglicher Aktivitäten) und Druckfestigkeit $>4000 \text{ MPa} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

100 MPa, um der axialen Kraft des Schenkelhalses standzuhalten.

Chemische Stabilität: Korrosionsbeständigkeit ($<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$) widersteht elektrochemischer Korrosion durch Chloridionen (Cl^- , Konzentration etwa 100-150 mM) in Körperflüssigkeiten, Proteinen und Enzymen.

Biokompatibilität: Zellebensfähigkeit $>95\% \pm 2\%$ (In-vitro-Zytotoxizitätstest gemäß ISO 10993-5), Knochenintegration $>95\% \pm 2\%$ (durch Hydroxylapatit, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, Beschichtung bzw. poröse Struktur, Porengröße $100\text{--}400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$, fördert Osteoblastenanhaftung und Knocheneinwuchs).

TiN-Beschichtung (Dicke $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) verringerte den Reibungskoeffizienten ($<0,2 \pm 0,05$), reduzierte die Abriebpartikel der Polyethylen-Auskleidung ($<0,001 \text{ mm}^3/\text{Zyklus} \pm 0,0001 \text{ mm}^3/\text{Zyklus}$) und verringerte die periprotetische Entzündung (IL-6-Werte $<10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$).

Lebensdauer: $>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$, ca. 10^6 Gehzyklen, geeignet für ältere Patienten im Alter von 60-80 Jahren oder Personen mit hohem Aktivitätsniveau.

Anwendungsszenarien: Wird häufig bei älteren Patienten mit Osteoporose (Knochendichte-T-Score $<-2,5 \text{ SD}$) oder jungen Patienten mit hoher Aktivität (z. B. Sportler) verwendet, insbesondere in Szenarien mit hoher Hüftbelastung ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$).

Hartmetall-Kniegelenkersatz

Der Hartmetall-Kniegelenkersatz ist ein Verfahren zur Behandlung von Osteoarthritis, rheumatoider Arthritis oder schweren Knie-traumata (wie z. B. einem Meniskusriss) durch Ersatz des unteren Endes des Femurs, der Tibiagelenkfläche und der Patellaoberfläche.

Technische Anforderungen:

Mechanische Eigenschaften: Hält dynamischen Belastungen stand ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, wie etwa beim Hocken oder Treppensteigen), die Verschleißfestigkeit ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) reduziert die jährliche Verschleißrate der Polyethylen-Auskleidung ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) und die Ermüdungsfestigkeit ($>10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach) bewältigt etwa 1 Million Beuge- und Streckzyklen pro Jahr.

Biokompatibilität: Zellebensfähigkeit $>95\% \pm 2\%$, Knochenintegration $>95\% \pm 2\%$ (verbessert durch poröse Oberfläche oder Wachstumsfaktoren wie BMP-2).

Oberflächenoptimierung: Nanokörner ($0,5\text{--}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) verbessern die Mikrogleichmäßigkeit, PVD-ZrN-Beschichtung ($5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) erhöht die Oberflächenhärte ($> \text{HV } 1900 \pm 30$), chemisch-mechanisches Polieren (CMP) kontrolliert die Rauheit ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) und reduziert die Entzündungsreaktion ($\text{IL-6} < 10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$).

Lebensdauer: $>10 \text{ Jahre} \pm 1 \text{ Jahr}$, geeignet für aktive Menschen im Alter von 50-70 Jahren oder stark adipöse Patienten ($\text{BMI} >30 \text{ kg/m}^2$).

Anwendungsszenarien: Geeignet für Patienten mit schwerer Knie-degeneration (Kellgren-Lawrence - Grad III-IV) oder posttraumatischer Deformität.

den Hartmetall-Wirbelsäulenfixierungsgeräten

gehören Pedikelschrauben und Stabsysteme, die zur Skoliosekorrektur, zur Fixierung von Wirbelkompressionsfrakturen oder zur Wirbelsäulenfusion (z. B. Lendenwirbelfusion) verwendet werden.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Technische Anforderungen :

Mechanische Eigenschaften: Druckfestigkeit ($> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), Unterstützung der Wirbelsäule, Verschleißfestigkeit ($< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) zur Verringerung des Verschleißes zwischen Gewinde und Knochengewebe und Ermüdungsbeständigkeit ($> 10^6 - 10^4$ -fach), um dynamischer Beanspruchung ($> 2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$) standzuhalten.

Biokompatibilität: Knochenintegrationsrate $>95 \% \pm 2 \%$ (Fusionszeit 3–6 Monate ± 1 Monat).

Oberflächenbehandlung: Der HIP-Prozess ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) gewährleistet eine Porosität von $<0,1 \% \pm 0,01 \%$ (Mikroporen $<0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), die ZrC-Dotierung ($0,1 \% - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) verbessert die Oxidationsbeständigkeit ($<0,01 \% \pm 0,001 \%$) und die Oberflächenpolitur ($R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) erhöht die Festigkeit der Grenzflächenbindung ($> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).

Lebensdauer: >10 Jahre ± 1 Jahr.

Anwendungsszenarien : Geeignet für Patienten im Alter von 20–60 Jahren mit Wirbelsäulenerkrankungen, wie z. B. idiopathischer Skoliose im Jugendalter (Cobb-Winkel $> 40^\circ$) oder osteoporotischen Frakturen bei älteren Menschen .

Hartmetall-Gelenkfusionsgeräte

werden zur Fusion von Handgelenk-, Knöchel- oder Wirbelsäulenfacetten Gelenken verwendet, um Ankylose, schwere degenerative Arthritis oder traumatische Instabilität zu behandeln.

Technische Anforderungen :

Biokompatibilität: Knochenintegrationsrate $>95 \% \pm 2 \%$ (Fusionszeit 6–12 Monate ± 1 Monat).

Mechanische Eigenschaften: Verschleißfestigkeit ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) , Ermüdungsfestigkeit ($>10^6$ -fach $\pm 10^4$ -fach) und lokale Druckfestigkeit ($>1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$).

$C \pm 10^\circ\text{C}$) kombiniert mit Ag-Nanobeschichtung ($2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Ag^+ -Freisetzung $<0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) $\pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) zur Verbesserung der antibakteriellen Eigenschaften ($>90\% \pm 2\%$) und der Biokompatibilität.

Lebensdauer: >10 Jahre ± 1 Jahr.

Anwendungsszenario : Geeignet für Patienten im Alter von 30–60 Jahren mit Gelenkerkrankungen wie Handgelenksankylose oder Knöchelinstabilität.

Anwendung von Hartmetall in Zahnimplantaten

Hartmetall-Zahnimplantate werden verwendet, um den Verlust einzelner oder mehrerer Zähne oder die vollständige Zahnlosigkeit zu reparieren. Sie ersetzen natürliche Zahnwurzeln und stützen so Kronen, Implantatbrücken oder Vollprothesen.

Technische Anforderungen :

Mechanische Präzision: Bearbeitungsabweichungen $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ (Gewindespiel $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) gewährleisten einen engen Sitz am Alveolarknochen.

Chemische Stabilität: Korrosionsbeständigkeit $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$, beständig gegen Säure und bakterielle Metaboliten im oralen Speichel (pH 5-7).

Biokompatibilität: Zelllebensfähigkeit $>95\% \pm 2\%$ (Osteoblasten- und Fibroblastentest), antibakteriell $>90\% \pm 2\%$ (durch Ag^+ -Freisetzung $<0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ hemmt parodontale Pathogene).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Strukturoptimierung: Der SPS-Prozess ($1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) kontrolliert die Porosität $<0,1\% \pm 0,01\%$ (poröse Oberflächenporengröße $50\text{--}200\text{ }\mu\text{m} \pm 20\text{ }\mu\text{m}$), um das Einwachsen von Knochen zu fördern.
Lebensdauer: $>10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$, bei Kaubelastung ($>500\text{ N} \pm 10\text{ N}$).

Anwendungsszenario : Geeignet für Personen im Alter von 30–60 Jahren mit fehlenden Zähnen, z . B. Einzelzahnverlust aufgrund von Parodontitis oder vollständiger Zahnlosigkeit bei älteren Menschen.

Anwendung von Hartmetall in kardiovaskulären Implantaten

Karbid-Kardiovaskularstents werden zur Behandlung koronarer atherosklerotischer Herzerkrankungen oder akuter Myokardinfarkte sowie zur Unterstützung des Lumens bei perkutanen Koronarinterventionen (PCI) eingesetzt.

Technische Anforderungen :

Chemische Stabilität: Korrosionsbeständigkeit $<0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$ (Verhinderung der Freisetzung von Co- oder W-Ionen $<0,1\text{ }\mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g/cm}^2$), getestet in Blut bei $\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $37\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Biokompatibilität: Zellebensfähigkeit $>95\% \pm 2\%$, geringes Thromboserisiko ($\text{IL-6} <10\text{ pg/ml} \pm 1\text{ pg/ml}$).

Oberflächentechnik: TaC -Dotierung ($0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$) erhöht die Korrosionsbeständigkeit ($<0,008\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$), PVD- TiN-Beschichtung ($5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) verbessert die Integrationsrate der Gefäßwand ($>95\% \pm 2\%$).

Lebensdauer: $>10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$, Stentwandstärke $0,08\text{--}0,12\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$.

Anwendungsszenario : Geeignet für Patienten mit Herz-Kreislauf-Erkrankungen im Alter von 40–70 Jahren, mit einem Stentdurchmesser von 2–4 mm, zur Behandlung von Koronararterienläsionen mit einer Stenose $>70\%$.

Anwendung von Hartmetall in neurochirurgischen Implantaten

Hartmetall-Schädelreparaturplatten werden zur Rekonstruktion traumatischer Schädeldefekte, Tumorsektion oder angeborener Defekte verwendet.

Technische Anforderungen :

Biokompatibilität: Zellebensfähigkeit $>95\% \pm 2\%$, wodurch Entzündungen des Hirngewebes oder Gliannarbenbildung vermieden werden.

Thermische Stabilität: Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient ($<6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) entspricht dem Schädel ($7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), TiC -Dotierung ($2\%\text{--}5\% \pm 0,5\%$) verbessert die Hochtemperaturstabilität ($>600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$).

Chemische Stabilität: Korrosionsbeständigkeit $<0,01\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$, Beständigkeit gegenüber Elektrolyten in der Zerebrospinalflüssigkeit.

Oberflächenoptimierung: PVD-Beschichtung (z. B. TiN, $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) mit kontrollierter Rauheit ($\text{Ra} <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) zur Verringerung der Gewebearhaftung.

Lebensdauer: $>10\text{ Jahre} \pm 1\text{ Jahr}$, unterstützt 3D-Druck-Anpassung (Dicke $0,5\text{--}2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$).

Anwendungsszenario : Geeignet für Patienten im Alter von 10–70 Jahren mit Schädelverletzungen,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beispielsweise Schädeldefekten durch Autounfälle.

Anwendung von Hartmetall in chirurgischen Instrumenten

Eine weitere wichtige Anwendung von Hartmetall in der Medizin ist die Herstellung von chirurgischen Hochleistungsinstrumenten wie Knochenbohrern, Knochensägen, Schneidwerkzeugen, minimalinvasiven chirurgischen Instrumenten (wie endoskopischen Scheren), neurochirurgischen Elektroden und zahnärztlichen Schnitzmessern. Diese Instrumente werden in vielen Bereichen breit eingesetzt, beispielsweise in der Orthopädie, Neurochirurgie, Zahnmedizin und allgemeinen Chirurgie, und decken die vielfältigen Anforderungen von der Frakturfixierung bis zur minimalinvasiven Chirurgie ab. Dank seiner hervorragenden Härte, Verschleißfestigkeit, Ermüdungsbeständigkeit und antibakteriellen Wirkung ist Hartmetall zu einem idealen alternativen Material für herkömmliche Instrumente aus Edelstahl (Güte 304, HV 200–400 ± 20) oder Titanlegierungen (Ti-6Al-4V, HV 300–350 ± 20) geworden, insbesondere bei komplexen chirurgischen Eingriffen, die hohe Präzision, lange Lebensdauer und antibakterielle Eigenschaften erfordern. Im Folgenden werden die technischen Eigenschaften, der Herstellungsprozess, die materialwissenschaftlichen Grundlagen, Anwendungsszenarien und künftigen Forschungsrichtungen näher erläutert.

Technische Anforderungen und Leistungsmerkmale von chirurgischen Hartmetallinstrumenten

Um sicherzustellen, dass sie in medizinischen Umgebungen mit hoher Intensität und Hochfrequenz gute Leistungen erbringen und den Anforderungen der menschlichen physiologischen Umgebung entsprechen, müssen chirurgische Instrumente aus Hartmetall die folgenden strengen technischen Standards erfüllen:

Hohe Härte: Der Härtebereich liegt bei HV 1800–2000 ± 30 und wird durch das WC-Co-System (Co-Gehalt 6 %–8 % ± 1 %) erreicht. Dies kommt der Härte von Diamant (HV 7000–8000 ± 500) nahe, ist deutlich besser als Edelstahl oder Titanlegierungen und kann kortikalen Knochen (Härte HV 500–700 ± 50) oder hartes Gewebe (wie Zahnschmelz, HV 300–400 ± 20) effektiv schneiden.

Hohe Präzision: Die Verarbeitungsabweichung wird auf <0,01 mm ± 0,001 mm kontrolliert, wodurch bei chirurgischen Eingriffen eine Präzision im Mikrometerbereich gewährleistet wird, wie beispielsweise bei der Positionierung neurochirurgischer Elektroden im Gehirngewebe (Fehler <0,05 mm ± 0,01 mm) oder der Feingravur von zahnärztlichen Schnitzmessern (Schnitttiefe <0,1 mm ± 0,01 mm).

das 10⁶-fache ± 10⁴-fache, optimiert durch Nanokörner (0,5–1 µm ± 0,01 µm) und eine Mehrphasenstruktur (WC-Partikel eingebettet in die Co-Phase), geeignet für wiederholten Hochfrequenzgebrauch, wie z. B. Langzeitbetrieb von Knochenbohrern bei hoher Rotationsgeschwindigkeit (>1000 U/min, Drehmoment >0,5 N·m ± 0,05 N·m), Ermüdungsgrenze >1000 MPa ± 50 MPa.

Antibakterielle Eigenschaft: Bakterielle Hemmrates >90 % ± 2 %, durch Oberflächenauftrag einer Ag-Nanobeschichtung (Dicke 2–5 µm ± 0,1 µm, Ag⁺-Freisetzung <0,01 µg/cm² ± 0,001 µg/cm²)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oder TiN- Beschichtung wird das Wachstum von Staphylococcus aureus und Escherichia coli gehemmt und das Risiko einer postoperativen Infektion ($<1\% \pm 0,5\%$) verringert, im Einklang mit den antimikrobiellen Testnormen ISO 22196.

Schärfe: Schneidkraft $<0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$, Kantenrauigkeit ($R_a <0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) wird durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) kontrolliert, um eine geringe Schädigung des Weichgewebes (Elastizitätsmodul $0,1\text{--}1\text{ MPa} \pm 0,1\text{ MPa}$) beim Schneiden und eine Schnittglätte $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ sicherzustellen.

Wärmemanagement: Wärmeleitfähigkeit $>120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ (viel höher als Edelstahl $16\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2\text{ W/m}\cdot\text{K}$), Wärmewiderstand durch Kornoptimierung und PVD-Beschichtung reduziert ($<0,1\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$), bei $50\text{ W/cm}^2 \pm 5\text{ W/cm}^2$ Oberflächentemperaturgleichmäßigkeit unter Last $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, um thermische Gewebeschäden zu vermeiden ($>43^\circ\text{C}$ können zu Proteindenaturierung führen).

Arten und Anwendungen von medizinisch-chirurgischen Instrumenten aus Hartmetall

Hartmetall-Knochenbohrer

Anwendung: Zur Frakturfixierung oder zum Einsetzen orthopädischer Implantate, Bohren in Kortikalis (Dicke $2\text{--}5\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$) oder Spongiosa (Porosität $50\text{--}90\% \pm 5\%$) bei hoher Drehzahl ($>1000\text{ U/min}$, Drehmoment $>0,5\text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,05\text{ N}\cdot\text{m}$).

Eigenschaften: WC-6Co-Formel, Härte $\text{HV } 1850 \pm 30$, Bohrerdurchmesser $1,5\text{--}6\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, Bearbeitungsgenauigkeit $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, antibakterielle Beschichtung (wie Ag, Dicke $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) reduziert wirksam das Risiko einer Osteomyelitis (Infektionsrate $<1\% \pm 0,5\%$) und thermischer Schäden.

Szenario: Bohren und Fixieren von Femurschäften bei Hüftersatzoperationen oder Platzierung von Pedikelschrauben bei Wirbelsäulenoperationen (Gewindetiefe $30\text{--}40\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$).

Hartmetall-Knochensäge

Anwendung: Zur Knochenresektion oder -umformung, wie z. B. Osteotomie (Schnittgeschwindigkeit $1\text{--}2\text{ mm/s} \pm 0,1\text{ mm/s}$) oder Tumorsektion (Resektionsvolumen $>10\text{ cm}^3 \pm 1\text{ cm}^3$).

Eigenschaften: Sägezahn-Design, Schneidkraft $<0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$, Verschleißfestigkeit $<0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, PVD ZrN- Beschichtung ($5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) verbessert die Haltbarkeit (>500 Anwendungen ± 50 -mal), geeignet zum Schneiden von Knochengewebe mit Härte $\text{HV } 600 \pm 50$.

Szenario: Neuformung der Tibiakopffläche bei Kniegelenkersatz oder Notfallamputation während einer Unfallchirurgie (Schnittzeit $<5\text{ Min.} \pm 0,5\text{ Min.}$).

Hartmetall-Schneidwerkzeuge

Anwendung: Wird bei der Resektion von Weichgewebe oder bei empfindlicher Formgebung angewendet, wie etwa bei der Resektion von Hirntumoren (Schnitttiefe $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) oder bei der Gewebeentnahme (Probenvolumen $0,5\text{--}1\text{ cm}^3 \pm 0,1\text{ cm}^3$).

Eigenschaften: Schärfe der Schneide $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, Ermüdungsbeständigkeit $>10^6$ -fach $\pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10⁴-fach, antibakterielle Ag-Beschichtung >90 % ± 2 % (Hemmrate gegen MRSA >95 % ± 1 %), Schneidkraft <0,5 N ± 0,05 N.

Szenario: Neurochirurgische Gliomresektion oder plastisch-chirurgische Lappenpräparation (Dicke 0,2–0,5 mm ± 0,05 mm).

Minimalinvasive chirurgische Instrumente aus Hartmetall (z. B. endoskopische Scheren)

Anwendung: Zur Gewebetrennung und Resektion (z. B. Leberdurchtrennung oder Bändertrimmung) bei laparoskopischen oder arthroskopischen Operationen.

Eigenschaften: Länge 20–40 cm ± 1 cm, Spitzengenauigkeit <0,01 mm ± 0,001 mm, Korrosionsbeständigkeit <0,01 mm/Jahr ± 0,001 mm/Jahr (getestet in 0,9 % NaCl-Lösung), TiN-Beschichtung reduziert Reibung (<0,2 ± 0,05), geeignet für den Betrieb bei 37 °C ± 1 °C Körpertemperatur (thermische Stabilität >200 °C ± 10 °C).

Szenario: Arthroskopische Meniskustrimmung (Schnittlänge 10–20 mm ± 1 mm) oder laparoskopische Appendektomie (Operationsdauer < 15 min ± 1 min).

Hartmetall-Elektroden für die Neurochirurgie

Anwendung: Zur Tiefenhirnstimulation (DBS) zur Behandlung der Parkinson-Krankheit oder Epilepsie oder zur Aufzeichnung neuronaler Signale (Abtastrate > 1 kHz ± 0,1 kHz).

Eigenschaften: Durchmesser 0,5–1 mm ± 0,05 mm, Leitfähigkeit > 100 S/cm (spezifischer Widerstand < 0,01 Ω·cm ± 0,001 Ω·cm), Biokompatibilität (Zelllebensfähigkeit > 95 % ± 2 %, Neuronenanhaftung > 90 % ± 2 %), Oberflächenrauheit Ra < 0,1 µm ± 0,01 µm, reduziert Entzündungen im Hirngewebe (IL-6 < 10 pg/ml ± 1 pg/ml).

Szenario: DBS-Implantation bei Patienten mit Parkinson-Krankheit (Elektrodentiefe 5–10 mm ± 0,5 mm) oder Lokalisierung eines epileptischen Herdes (räumliche Auflösung < 0,1 mm ± 0,01 mm).

Dental-Schnitzmesser aus Hartmetall

Anwendung: Für Zahnrestorationen (wie etwa Harzfüllungen) oder zur periimplantären Gewebeformung (Schnitttiefe <0,2 mm ± 0,02 mm).

Eigenschaften: Schneidkantengenauigkeit <0,01 mm ± 0,001 mm, Schneidkraft <0,5 N ± 0,05 N, antibakterielle Eigenschaft der Ag-Beschichtung >90 % ± 2 % (hemmt den Parodontitis-Erreger Porphyromonas gingivalis), Kaubelastungsbeständigkeit (>500 N ± 10 N).

Szenario: Kronenrandgestaltung oder Implantatbettpräparation (Durchmesser 3–5 mm ± 0,1 mm).

Herstellungsverfahren und Oberflächenbehandlung

Herstellungsverfahren : Chirurgische Instrumente aus Hartmetall werden üblicherweise im SPS- (1400 °C ± 10 °C, 50 MPa ± 1 MPa) oder HIP-Verfahren (1300 °C ± 10 °C, 200 MPa ± 5 MPa) hergestellt, um eine Korngröße von 0,5–1 µm ± 0,01 µm und eine Porosität von <0,1 % ± 0,01 % (Mikrodefekte <0,05 µm ± 0,01 µm) zu gewährleisten. Additive Fertigung (Selective Laser Melting, SLM, Schichtdicke 20–50 µm ± 1 µm, Laserleistung 200–400 W ± 10 W) unterstützt die individuelle Anpassung komplexer Geometrien, wie etwa das gekrümmte Design minimalinvasiver Instrumente oder die mikroporöse Struktur von Elektroden.

Oberflächenbehandlung: Eine TiN-, ZrN- oder Ag-Beschichtung (Dicke 2–15 µm ± 0,1 µm) wird

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durch PVD ($400\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Abscheidungsrate $0,1\text{--}0,5\text{ }\mu\text{m}/\text{min} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$) oder CVD ($800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dampfkonzentration $10\text{--}20\text{ Vol.}\% \pm 1\text{ Vol.}\%$) aufgetragen und die Rauheit wird durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP, Druck $5\text{--}10\text{ kPa} \pm 0,5\text{ kPa}$) kontrolliert ($R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), um Schärfe und antibakterielle Eigenschaften zu optimieren. Durch Plasmareinigung ($500\text{ W} \pm 50\text{ W}$, $5\text{--}10\text{ min} \pm 0,5\text{ min}$, Ar/O_2 -Atmosphäre) wird die Oxidschicht ($<0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$) entfernt und die Oberflächenreinheit und Haftfestigkeit ($>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) verbessert.

Grundlagen der Materialwissenschaft

Mikrostruktur: WC-Partikel (Härte $\text{HV } 2200 \pm 50$) eingebettet in die Co-Phase (Zähigkeitsmodul $200\text{--}300\text{ GPa} \pm 20\text{ GPa}$), wodurch ein Verbundverstärkungseffekt entsteht, Korngrenzenenergie $<0,5\text{ J/m}^2 \pm 0,05\text{ J/m}^2$. Erhöhte Rissbeständigkeit.

Elektronische Struktur: Das d-Bandzentrum von WC liegt nahe dem Fermi-Niveau ($-1,5\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), ähnlich wie beim Edelmetall Pt, was ihm eine potenzielle biologische Inertheit verleiht.

Oberflächenchemie: Durch die Ag^+ -Freisetzung werden antibakterielle Eigenschaften durch Ionenaustausch erreicht (Diffusionskoeffizient $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$), und die TiN-Beschichtung bildet Ti-O-Bindungen (Bindungsenergie $460\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$), um die Korrosionsbeständigkeit zu verbessern.

Anwendungsszenarien und klinische Vorteile

Orthopädische Chirurgie: Knochenbohrer und Knochensägen verkürzen die Schnittzeit ($<5\text{ Min.} \pm 0,5\text{ Min./Mal}$), verbessern die chirurgische Effizienz ($>20\% \pm 2\%$) und reduzieren intraoperative thermische Schäden ($<40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) bei Hüft- und Kniegelenkersatz und Wirbelsäulenkorrektur.

Neurochirurgie: Elektroden und minimalinvasive Instrumente unterstützen die DBS-Genauigkeit ($<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, räumliche Auflösung $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) und verringern das Risiko einer Nervenverletzung ($<1\% \pm 0,5\%$).

$3\text{--}6\text{ Monate} \pm 0,5\text{ Monate}$) bei der Implantatinstallation.

Vorteile: Im Vergleich zu herkömmlichen Werkzeugen haben Hartmetallwerkzeuge eine 2-3-mal längere Lebensdauer ($>500\text{ Anwendungen} \pm 50\text{-mal}$), antibakterielle Eigenschaften reduzieren die Infektionsrate ($<1\% \pm 0,5\%$) und eignen sich für risikoreiche Operationen (wie die Reparatur offener Frakturen).

Zukünftige Forschungsrichtungen

Nano-Verbesserung: Entwicklung von Nanokanten $<10\text{ nm}$ (Oberfläche $>200\text{ m}^2/\text{g} \pm 20\text{ m}^2/\text{g}$), wodurch die Schneidleistung ($>30\% \pm 2\%$) und die Haltbarkeit ($>1000\text{-fach} \pm 50\text{-fach}$) verbessert werden.

Intelligent: Integrierter Temperatursensor (Genauigkeit $<0,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, Reaktionszeit $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) überwacht thermische Effekte und optimiert die Operationssicherheit.

Optimierung der Biokompatibilität: Reduzieren Sie den Co-Gehalt ($<5\% \pm 0,5\%$) und ersetzen Sie ihn durch Ni (Toxizitätsschwelle $<0,1\text{ mg/l} \pm 0,01\text{ mg/l}$) oder Cr (Antioxidans $<0,01\% \pm 0,001\%$), um die Umweltstandards RoHS und REACH einzuhalten.

Anpassung: Nutzen Sie die 3D-Drucktechnologie (Schichtdicke $10\text{--}30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Druckgenauigkeit $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), um personalisierte Werkzeuge herzustellen, die sich an komplexe anatomische Strukturen anpassen (wie z. B. Elektrodenpfade im tiefen Gehirn).

Nachhaltigkeit: Entwicklung kohlenstoffarmer Prozesse (Reduktion des Energieverbrauchs $> 10 \% \pm 2 \%$, CO₂-Emissionen $< 5 \text{ kg/Stück} \pm 0,5 \text{ kg/Stück}$), angetrieben durch Solar- oder Windenergie.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten von Hartmetall im medizinischen Bereich

Gerüste für das Tissue Engineering

Die poröse Struktur von Hartmetall (Porosität $30\text{--}50 \% \pm 5 \%$, Porengröße $100\text{--}500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) kann als Gerüst für die Knochengewebezüchtung verwendet werden, kombiniert mit Knochenmorphogenetischem Protein (BMP-2, Konzentration $10\text{--}50 \mu\text{g/ml} \pm 5 \mu\text{g/ml}$) oder vaskulärem endotheliale Wachstumsfaktor (VEGF), um die Knochenregeneration zu fördern (neue Knochenmasse $> 70 \% \pm 5 \%$).

Wirkstofffreisetzungsträger

Nach der Oberflächenmodifizierung können Antibiotika (wie Vancomycin, Freisetzungsrates $0,1\text{--}0,5 \mu\text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \mu\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$) oder entzündungshemmende Medikamente (wie Dexamethason, Freisetzungsdauer $> 7 \text{ d} \pm 1 \text{ d}$) zur Behandlung von Infektionen oder Entzündungen mit verzögerter Freisetzung (Hemmrate $> 90 \% \pm 2 \%$) aufgebracht werden.

Herstellungsverfahren und Oberflächenbehandlung von Hartmetall

Verfahren : SPS und HIP gewährleisten eine hohe Dichte (Porosität $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, Dichte $> 99 \% \pm 0,5 \%$), additive Fertigung (SLM, Schichtdicke $20\text{--}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, Scangeschwindigkeit $500\text{--}1000 \text{ mm/s} \pm 50 \text{ mm/s}$) unterstützt kundenspezifisches Design.

Beschichtung : PVD/CVD-beschichtetes TiN, ZrN- oder Ag-Beschichtung (Dicke $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Abscheidungsrate $0,1\text{--}0,5 \mu\text{m/min} \pm 0,05 \mu\text{m/min}$) mit optimierter Biokompatibilität (Zelladhäsionsrate $> 95 \% \pm 2 \%$) und antibakteriellen Eigenschaften (Hemmrate $> 90 \% \pm 2 \%$).

Zukünftige Entwicklungsrichtung medizinischer Hartmetallanwendungen

Nanooptimierung : Entwicklung von Nanopartikeln $< 10 \text{ nm}$ (Oberfläche $> 200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$) zur Steigerung der Oberflächenaktivität von Implantaten und Werkzeugen.

Verbesserte Biokompatibilität : Reduzierter Co-Gehalt ($< 5 \% \pm 0,5 \%$), ersetzt durch Ni oder Cr, reduzierte Freisetzung von Schwermetallionen ($< 0,1 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$).

Intelligent : Integrierte Sensoren überwachen die Implantatspannung ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) oder die Werkzeugtemperatur ($< 40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) für Echtzeit-Feedback.

Nachhaltigkeit : Entwicklung von Prozessen mit geringem CO₂-Ausstoß (Reduktion des Energieverbrauchs $> 10 \% \pm 2 \%$, CO₂-Fußabdruck $< 5 \text{ kg CO}_2 \text{ e/Stück} \pm 0,5 \text{ kg CO}_2 \text{ e/Stück}$), angetrieben durch Solar- oder Windenergie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Arten, Eigenschaften, Leistung und Probleme von 3D-Druck-Hartmetallmaterialien

3D-Drucktechnologie (Additive Manufacturing) bietet ein revolutionäres Fertigungsverfahren für die Verarbeitung von Hartmetall (mit Wolframkarbid-Kobalt-System, WC-Co, als Kern) und durchbricht die Grenzen traditioneller Pulvermetallurgieverfahren (wie Sintern, heißisostatisches Pressen und Kaltpressen-Sintern). Durch fortschrittliche Verfahren wie selektives Laserschmelzen (SLM), Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Binder Jetting (BJ) oder direkte Energieabscheidung (DED) können Hartmetallmaterialien komplexe Geometrien, hohe Präzision und kundenspezifische Produktion erreichen. Diese Technologien verwenden energiereiche Strahlen (wie Laserleistung 200–1000 W $\pm$ 20 W oder Elektronenstrahlstrom 10–50 mA $\pm$ 1 mA), um Metallpulver schichtweise zu schmelzen oder zu verbinden, und finden breite Anwendung in Hightech-Branchen, beispielsweise in der Medizintechnik (z. B. Schädelreparatur, Hüftersatz und Zahnimplantate), der Luft- und Raumfahrt (Turbinenschaufeln, Leichtbaustrukturen und Wärmedämmschichten), dem Formenbau (Präzisionsziehwerkzeuge, Stanzwerkzeuge und hochverschleißfeste Schneidwerkzeuge) und der Energiebranche (Hochtemperatur-Gasturbinenkomponenten und Kernreaktorstrukturen). Im Folgenden werden der aktuelle Status, die Herausforderungen und die künftige Entwicklungsrichtung des 3D-Drucks von Hartmetall im Hinblick auf Materialarten, Eigenschaften, Leistung und bestehende Probleme detailliert beschrieben, kombiniert mit den neuesten Anwendungsdaten aus Materialwissenschaft und -technik, um Wissen und Professionalität zu erweitern.

1. Arten von Hartmetallmaterialien für den 3D-Druck

Hartmetallwerkstoffe für den 3D-Druck basieren hauptsächlich auf dem Phasensystem Hartmetall-Binder. Je nach Anwendungsanforderungen, Druckverfahren und Umgebungsanpassung sind sie vielfältig und entwickeln sich ständig weiter. Dazu gehören unter anderem:

Hartmetall auf Wolframkarbid-Kobalt-Basis (WC-Co)

Zusammensetzung : Wolframkarbid (WC) als Hartphase, Kobalt (Co) als Bindephase, typische Verhältnisse sind WC-6 % Co, WC-10 % Co oder WC-15 % Co, Pulverpartikelgrößenbereich 10–50 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Anwendung : Weit verbreitet in medizinischen Implantaten (wie Hüftprothesen und Knieschienen, die den ASTM F1537-Standards entsprechen müssen), Schneidwerkzeugen (wie Drehwerkzeugen, Fräsern und Bohrern, die den ISO 513-Anforderungen entsprechen) und verschleißfesten Beschichtungsformen (wie Zieh- und Stanzwerkzeuge).

Eigenschaften : Hohe Härte (HV 1800–2000 $\pm$ 30), mittlere Zähigkeit (Bruchzähigkeit 10–15 MPa $\cdot$ m $^{1/2} \pm 1$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$), Wärmeleitfähigkeit $\sim 100\text{--}150$ W/ m $\cdot$ K ± 5 W/ m $\cdot$ K, Wärmeausdehnungskoeffizient $\sim 5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, geeignet für hohe Belastungen und Umgebungen mit mittleren und hohen Temperaturen ($< 600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$).

Hartmetall auf Basis von Wolframkarbid-Nickel/Chrom (WC-Ni/Cr)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zusammensetzung : Nickel (Ni) oder Chrom (Cr) werden verwendet, um Kobalt (Co) ganz oder teilweise zu ersetzen und so die biologische Toxizität zu verringern oder die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen. Gängige Zusammensetzungen sind WC-8%Ni, WC-5%Ni-3%Cr oder WC - 10%Cr₃C₂. Die Pulverpartikelgröße beträgt 15–45 µm ± 5 µm .

Anwendung : Geeignet für kardiovaskuläre Stents (entsprechend den Biokompatibilitätsstandards ISO 10993-1), Kabelummantelungen für Meeresumgebungen (wie etwa U-Boot-Kommunikationskabel) und korrosionsbeständige Drahtziehwerkzeuge (wie etwa zum Ziehen von Kupferlegierungsdrähten).

Eigenschaften : Korrosionsbeständigkeit ist besser als bei WC-Co (Korrosionsrate <0,008 mm/Jahr ± 0,001 mm/Jahr, getestet in 3,5%iger NaCl-Lösung), Oxidationsbeständigkeit ist <0,01 % ± 0,001 % Massenverlust bei 600 °C ± 20 °C, Leitfähigkeit ~10⁻⁵ Ω·cm ± 10⁻⁶ Ω·cm , geeignet für elektrische Kontaktmaterialien.

Wolframkarbid-Titankarbid/Tantalkarbid (WC- TiC / TaC) Verbundkarbid

Zusammensetzung : Die Hochtemperaturleistung und Oxidationsbeständigkeit werden durch Dotierung mit Titankarbid (TiC) oder Tantalkarbid (TaC), wie z. B. WC-5%TiC- 5% Co, WC-3%TaC-7%Co oder WC-2%TiC-2%TaC-6%Co, mit einer Pulverpartikelgröße von 10–40 µm ± 5 µm , verbessert .

Anwendung : Geeignet für chirurgische Instrumente mit hohen Temperaturen (wie orthopädische Bohrer und Schneidklingen, die 800 °C ± 20 °C standhalten müssen), Luftfahrtteile (wie Triebwerksdüsen und Brennkammerauskleidungen) und Hochtemperaturformen (wie Warmschmiedegesenke).

Eigenschaften : Hohe Temperaturbeständigkeit (> 800 °C ± 20 °C, Schmelzpunkt nahe 2870 °C ± 50 °C), ausgezeichnete thermische Stabilität (Wärmeausdehnungskoeffizient ~ 4,8 × 10⁻⁶/°C ± 0,5 × 10⁻⁶/°C), Wärmeermüdungsbeständigkeit > 5000-fach ± 500-fach, Härte HV 1900–2200 ± 30.

Hartmetall mit hoher Entropie (WC auf HEA-Basis)

Zusammensetzung : Kombinieren Sie hochentropische Legierungen (wie CoCrFeNiTi , TiZrHfNbTa) mit Wolframkarbid (WC) zu Mehrelement-Verbundwerkstoffen, wie WC-10% (CoCrFeNi), WC-15% (TiZrHfNb) oder WC-20% (CrFeNiMo) , mit einer Pulverpartikelgröße von 20–60 µm ± 5 µm .

Anwendungen : Geeignet für medizinische Geräte, die in extremen Umgebungen eingesetzt werden (wie Strahlentherapieformen und Implantate zur Krebsbehandlung), Komponenten für Tiefseeausrüstung (wie U-Boot-Ventile) und Strukturen für die Luft- und Raumfahrt (wie Wärmekontrollpaneele für Satelliten).

Eigenschaften : Entropiestabilisierungseffekt (Konfigurationsentropie > 1,5 R ± 0,1 R, R ist die Gaskonstante 8,314 J/ mol· K) verbessert die Phasenstabilität, Härte HV 1700-1900 ± 30, Korrosionsbeständigkeit <0,005 mm/Jahr ± 0,001 mm/Jahr (in saurer Lösung), Strahlungsbeständigkeit <0,01 Gy/h ± 0,001 Gy/h.

Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co)-Nanokomposit

Zusammensetzung : Nanoskaliges Wolframkarbidpulver (WC) (Partikelgröße <100 nm ± 10 nm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

gemischt mit Kobalt (Co), wie z. B. WC-5 % Co (Nanoskala) oder WC-8 % Co (nanoverstärkt), mit einer spezifischen Pulveroberfläche von $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$.

Anwendung : Geeignet für hochpräzise Mikroimplantate (wie Zahnimplantate und Mikrosensoren), mikroelektronische Steckverbinder (wie Halbleiter-Leiterrahmen) und Präzisionsdrahtziehwerkzeuge (wie ultrafeine Kupferdrahtziehwerkzeuge).

Eigenschaften : Hohe spezifische Oberfläche ($>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), Härte HV 1900-2100 $\pm$ 30, Korngröße $<0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{m}$, verbesserte mikrostrukturelle Homogenität (Korngrenzendichte $>10^{15} \text{ m}^{-2} \pm 10^{14} \text{ m}^{-2}$), Ermüdungsbeständigkeit $>10^6$ Zyklen $\pm 10^4$ Zyklen.

Wolframkarbid-Borcarbid (WC-B₄C)-Verbundhartmetall

Zusammensetzung : Borcarbid (B₄C) wird zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit und Schlagfestigkeit dotiert, beispielsweise WC-10%Co-5%B₄C oder WC-8%Co-3%B₄C, Pulverpartikelgröße 15–50 $\mu\text{m} \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$.

Anwendung : Geeignet für Hochleistungsstanzwerkzeuge (z. B. zum Formen von Autoteilen), Hochgeschwindigkeitsziehwerkzeuge (z. B. zum Drahtziehen) und verschleißfeste Beschichtungen (z. B. Arbeitsflächen von Schleifmaschinen).

Eigenschaften : Härte HV 2000-2200 $\pm$ 30, Verschleißfestigkeit $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, Druckfestigkeit $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, Hochtemperaturbeständigkeit $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Wolframkarbid-Titannitrid (WC- TiN) -Verbundkarbid

Zusammensetzung : Dotiert mit Titannitrid (TiN) zur Verbesserung der Oberflächenhärte und Oxidationsbeständigkeit, beispielsweise WC-5%TiN-5%Co oder WC-3%TiN-7%Co, Pulverpartikelgröße 10–40 $\mu\text{m} \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$.

Anwendung : Geeignet für verschleißfeste Schneidwerkzeuge (wie Hartmetalleinsätze), Luftfahrtbeschichtungen (wie Antioxidationsschutzschichten) und Hochtemperatur-Elektronikverpackungen.

Eigenschaften : Härte HV 1900–2300 $\pm$ 30, Oxidationsbeständigkeit bei 1000 $^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, Massenverlust $<0,01 \text{ \%} \pm 0,001 \text{ \%}$, spezifischer Widerstand $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$.

2. Eigenschaften von 3D-gedruckten Hartmetallmaterialien

Die einzigartigen Eigenschaften von 3D-gedruckten Hartmetallmaterialien resultieren aus der schichtweisen Abscheidung, den lokalisierten Schmelz- oder Bindungsmechanismen der additiven Fertigung und einer fortschrittlichen Prozesskontrolle:

Komplexes geometrisches Formdesign

Mithilfe der Technologien des selektiven Laserschmelzens (SLM) oder Elektronenstrahlschmelzens (EBM) können innere poröse Strukturen (Porosität 30–50 $\text{\%} \pm 5 \text{ \%}$, Porengröße 100–500 $\mu\text{m} \pm 50 \text{ } \mu\text{m}$) oder Mikrokanäle (Durchmesser 0,1–0,5 $\text{mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) hergestellt werden, um die Anforderungen an das Knocheneinwachsen bei medizinischen Implantaten (wie künstlichen Knochengerüsten, die eine Anheftungsrate von Knochenzellen von $>90 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$ fördern), leichten Flugzeugteilen (wie Wabenstrukturen, Gewichtsreduzierung von 20–30 $\text{\%} \pm 2 \text{ \%}$) und Kühlkanälen

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

in Formen zu erfüllen.

Hohe Präzision und individuelle Anpassung

Die Druckgenauigkeit kann $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ (Schichtdicke) erreichen und unterstützt personalisierte medizinische Geräte (wie Schädelreparaturplatten, maßgeschneiderte Prothesen, mit einem Fehler von $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), komplexe Teile in der Luft- und Raumfahrt (wie Turbinenschaufeln, mit einer Oberflächenrauheit von $R_a < 5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$) und Mikrostrukturen in elektronischen Verpackungen.

Materialgradient und Funktionalisierung

Durch Mehrmaterialdruck oder Gradientenabscheidung kann eine Gradientenporosität (von 10 % bis $60\text{ }\pm 5\text{ }\%$) oder eine Oberflächenbeschichtung (wie TiN, $5\text{--}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$; CrN, Dicke $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) erreicht werden, wodurch die Biokompatibilität (Zelllebensfähigkeit $> 95\text{ }\pm 2\text{ }\%$), die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit $> 300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) und die Korrosionsbeständigkeit ($< 0,005\text{ mm/Jahr} \pm 0,001\text{ mm/Jahr}$) verbessert werden, sodass es für funktionelle Implantate und Formen geeignet ist, die extremen Umgebungen standhalten.

Abfallreduzierung und Ressourceneffizienz

Im Vergleich zum herkömmlichen Schneiden reduziert der 3D-Druck den Materialabfall ($< 5\text{ }\pm 1\text{ }\%$) und erreicht eine Pulverrückgewinnungsrate von $> 90\text{ }\pm 2\text{ }\%$, was dem Trend zur nachhaltigen Fertigung entspricht. Wirtschaftliche Vorteile ergeben sich insbesondere bei der Herstellung hochwertiger Luftfahrtkomponenten (Titanlegierungsersatz reduziert die Kosten um $15\text{--}20\text{ }\pm 2\text{ }\%$) und medizinischer Geräte.

Schnelles Prototyping und Iteration

Der Druckzyklus ist kurz ($2\text{--}10\text{ Stunden} \pm 1\text{ Stunde}$ für ein einzelnes Stück, abhängig von der Komplexität), was die Designüberprüfung und Chargenanpassung erleichtert. Es eignet sich für den Formenbau für Märkte mit schneller Reaktion (die Iterationszeit für die Form wird um $50\text{ }\pm 5\text{ }\%$ verkürzt), für medizinische Notfälle (wie etwa maßgeschneiderte Prothesen) und für die Prototypenprüfung in der Luftfahrt.

Multiskalige Strukturkontrolle

Durch die Anpassung der Druckparameter (wie Schichtdicke $20\text{--}100\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$, Scanstrategie) kann eine Strukturkontrolle vom Nanomaßstab (Korn $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) bis zum Makromaßstab (Komponentengröße $100\text{--}500\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) erreicht werden, um Anwendungsanforderungen in mehreren Bereichen zu erfüllen.

3. Leistung von 3D-gedruckten Hartmetallmaterialien

Die Leistung von 3D-gedrucktem Hartmetall variiert je nach Verfahren (z. B. SLM, EBM), Materialverhältnis und Nachbearbeitung, weist jedoch im Allgemeinen die folgenden, durch wissenschaftliche Daten gestützten Eigenschaften auf:

Mechanische Eigenschaften

Härte: HV $1600\text{--}1900 \pm 30$ (etwas niedriger als das herkömmliche Sintermaterial HV $1800\text{--}2000 \pm 30$). Aufgrund der mikroskopischen Poren ($< 0,1\text{ }\pm 0,01\text{ }\%$) und der unvollständigen Dichte (Dichte $95\text{--}98\text{ }\pm 1\text{ }\%$) ist eine HIP-Nachbehandlung erforderlich, um HV 1900 ± 20 zu erreichen.
Druckfestigkeit: $> 3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, geeignet für hochbelastbare Implantate (z. B.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Hüftprothesen, Belastungen $>2000 \text{ N} \pm 100 \text{ N}$) und Formen (z. B. Stanzwerkzeuge, Drücke $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Bruchzähigkeit: $8\text{--}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, niedriger als bei herkömmlichen Materialien ($10\text{--}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), was mit Porosität ($0,5\% \text{--}2\% \pm 0,5\%$) und Korngrenzendefekten (Dichte $> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) zusammenhängt.

Chemische Stabilität

Korrosionsbeständigkeit: $<0,01 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ (in $0,9\%$ NaCl-Lösung, pH 7–9), durch Dotierung mit TiC oder TaC kann sie weiter auf $<0,008 \text{ mm/Jahr} \pm 0,001 \text{ mm/Jahr}$ gesenkt werden, geeignet für Komponenten in der Meeresumwelt (wie etwa Stützen für Meerwasserpipelines).

Oxidationsbeständigkeit: Massenverlust bei $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ist $<0,01\% \pm 0,001\%$, bei $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ ist $<0,05\% \pm 0,005\%$, geeignet für Hochtemperatursterilisation oder Hochtemperaturteile in der Luftfahrt (wie Düsen).

Biokompatibilität

Zelllebensfähigkeit: $>95\% \pm 2\%$ (getestet gemäß ISO 10993-5, mit der Zelllinie L929), antibakterielle Rate der Ag-Beschichtung $>90\% \pm 2\%$ (gegen E. coli und Staphylococcus aureus), geeignet für medizinische Implantate (wie orthopädische Nägel).

Knochenintegrationsrate: $>90\% \pm 2\%$ (gefördert durch poröse Struktur, Porengröße $200\text{--}400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$), etwas niedriger als bei herkömmlichen Implantaten ($>95\% \pm 2\%$), was eine Optimierung der Porenverteilung und Oberflächenmodifikation erfordert.

Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit: $>100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, besser als Edelstahl ($16 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) und fast 50% von Aluminium ($237 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), aber lokales Schmelzen kann zu thermischen Spannungen ($<50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) führen, die die strukturelle Integrität beeinträchtigen.

Wärmediffusionskoeffizient: $>50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$, geeignet für Anwendungen mit schneller Wärmeableitung wie z. B. elektronische Verpackungen (Chip-Wärmestromdichte $>100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$).

Wärmeausdehnungskoeffizient: $\sim 5,2 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$, gut abgestimmt auf Si-Chip ($4,1 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,2 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$) ($<5\% \pm 1\%$).

4. Probleme beim 3D-Druck von Hartmetallmaterialien

Obwohl die 3D-Drucktechnologie Innovationen im Bereich Hartmetall mit sich gebracht hat, sind noch immer die folgenden technischen Herausforderungen zu bewältigen, die eine Kombination aus Materialwissenschaft und technischer Analyse erfordern:

Mikroskopische Defekte und Poren

Beim selektiven Laserschmelzen (SLM) entstehen durch die schnelle Abkühlung (Abkühlrate $10^3\text{--}10^5 \text{ K/s} \pm 10^2 \text{ K/s}$) sphärische Poren (Durchmesser $10\text{--}50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$) mit einer Porosität von $0,5\text{--}2\% \pm 0,5\%$, die insbesondere bei hohen Dehnraten ($>10^{-3} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) die Bruchzähigkeit reduzieren ($<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Lösung: Optimieren Sie die Laserparameter (Leistung $200\text{--}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, Scangeschwindigkeit $500\text{--}1000 \text{ mm/s} \pm 50 \text{ mm/s}$, Überlappungsrate $20\text{--}30\% \pm 2\%$) oder führen Sie nachträglich ein heißisostatisches Pressen durch (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, Bearbeitungszeit $2\text{--}4 \text{ h}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,1 \text{ h}$).

Inhomogene Phasenzusammensetzung

Durch örtlich hohe Temperaturen ($>2500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) kommt es zur Zersetzung von Wolframcarbid (WC) zu W_2C bzw. freiem Kohlenstoff (Gehalt $<1\% \pm 0,1\%$), was sich insbesondere beim EBM-Verfahren auf die Härte (HV-Abnahme um $5\text{-}10\% \pm 1\%$) und die Verschleißfestigkeit (Verschleißrate $>0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) auswirkt.

Lösung : Passen Sie die Pulverpartikelgröße an ($10\text{--}50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$) oder fügen Sie Stabilisatoren hinzu (wie Vanadiumcarbid, VC, $0,1\% \text{--}0,5\% \pm 0,01\%$; Niobcarbid, NbC, $0,2\% \text{--}0,6\% \pm 0,05\%$), um die Phasenumwandlung zu verhindern.

Eigenspannungen und Risse

Thermische Gradienten ($\Delta T > 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) induzieren Eigenspannungen ($>200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, lokal bis zu $500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), die insbesondere in komplexen Strukturen wie dünnwandigen Teilen oder Kragarmstrukturen zu Mikrorissen (Länge $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) führen können.

Lösung : Führen Sie eine Vorwärmung des Substrats ($200\text{--}400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) oder eine Spannungsarmglühbehandlung ($800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $1\text{--}2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, Abkühlrate $<5^\circ\text{C}/\text{min} \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$) in Kombination mit einer Oszillationsbehandlung (Frequenz $50\text{--}100 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$) durch.

Oberflächenrauheit und Anforderungen an die Nachbearbeitung

Die gedruckte Oberflächenrauheit R_a beträgt $5\text{--}15 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, was ein mechanisches Polieren ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) oder eine Beschichtungsbehandlung erfordert, was die Herstellungskosten erhöht ($>10\% \pm 2\%$) und die Oberflächenglätte medizinischer Implantate beeinträchtigt (die Bakterienanhaftungsrate ist proportional zu R_a , $>10^4 \text{ KBE}/\text{cm}^2 \pm 10^3 \text{ KBE}/\text{cm}^2$, wenn $R_a > 5 \mu\text{m}$).

Lösung : Druckstrategie optimieren (z. B. Schachbrett-Scanning, Überlappungsrate $20\text{--}30\% \pm 2\%$, Optimierung der Stützstruktur) oder selbstschmierende Beschichtung entwickeln (z. B. Molybdändisulfid, MoS_2 , Dicke $1\text{--}5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$; Graphenbeschichtung, Dicke $2\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$).

Materialkosten und Wiederholbarkeit

Nanopulver und High-End-Geräte (SLM und andere Gerätekosten) treiben die Kosten in die Höhe und die Konsistenz der Massenproduktion ist mangelhaft (Leistungsabweichung $>5\% \pm 1\%$, Porositätsabweichung $>1\% \pm 0,2\%$), was groß angelegte Anwendungen einschränkt.

Lösung : Entwickeln Sie kostengünstige Vorläufer (wie WC-Co-Verbundpulver mit einer Partikelgröße von $20\text{--}30 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$), um die Kosten zu senken, oder erstellen Sie eine Prozessparameterdatenbank (basierend auf maschinellem Lernen, mit einer Vorhersagegenauigkeit von $>95\% \pm 2\%$), um die Wiederholbarkeit zu verbessern.

5. Zukünftige Entwicklungsrichtung des Hartmetall-3D-Drucks

Prozessoptimierung

Entwicklung eines Multilaser-Selektiven Laserschmelzens (SLM, Leistung $>500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$, Anzahl der Laserstrahlen $2\text{--}4 \pm 1$) oder Elektronenstrahlschmelzens (EBM, Strahldichte $>10^4 \text{ A}/\text{m}^2 \pm 10^3 \text{ A}/\text{m}^2$, optimierte Scanstrategie), um Porosität ($<0,1\% \pm 0,01\%$) und Spannung ($<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) zu reduzieren und die strukturelle Integrität (Ermüdungslebensdauer $>10^7$ Zyklen $\pm 10^5$ Zyklen) von Luft- und Raumfahrtkomponenten wie Turbinenschaufeln zu verbessern.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialinnovation

Entdecken Sie WC-freie Hochentropiekarbide (wie (TiZrHfNb)C , Härte HV 1500–1800 $\pm$ 30, Bruchzähigkeit 12–15 MPa·m^{1/2} $\pm$ 1 MPa·m^{1/2}) oder biokompatible verstärkte Materialien (wie WC-Ni-Cr-Ti, Knochenintegrationsrate > 95 % $\pm$ 2 %, antibakterielle Rate > 95 % $\pm$ 2 %), um den Anforderungen medizinischer Anwendungen und extremer Umgebungen (wie Tiefseebohrer) gerecht zu werden.

Intelligente Fertigung

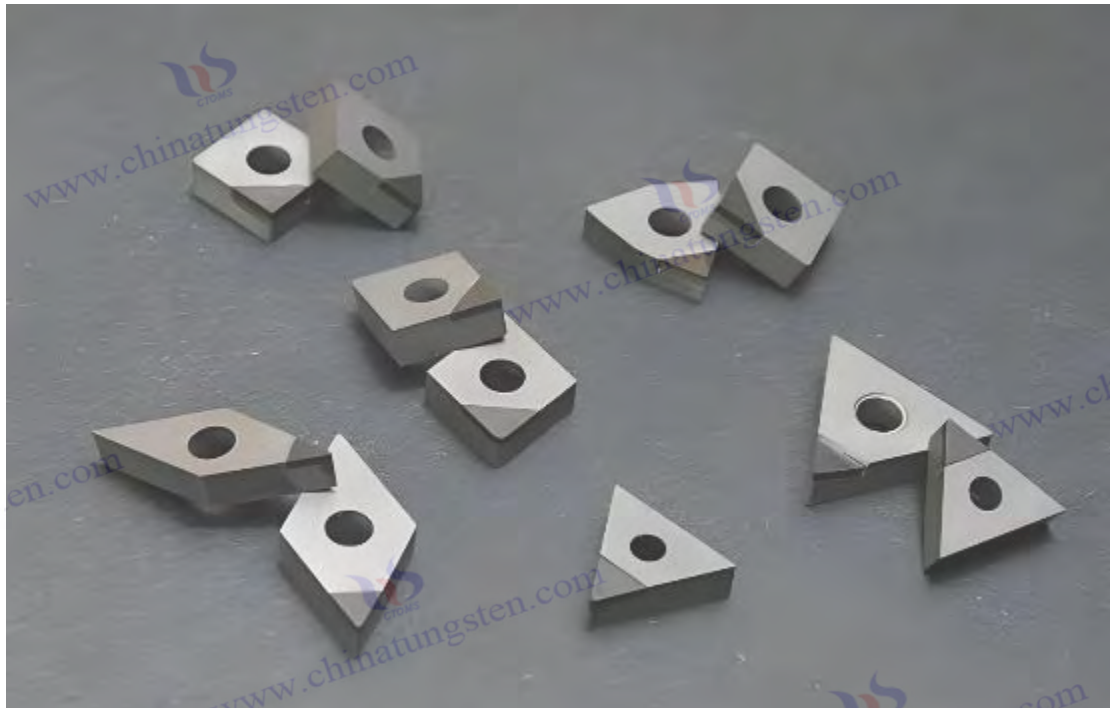
Integrierte Echtzeitüberwachung (Temperaturgenauigkeit <0,1 °C $\pm$ 0,01 °C, Deformationserkennung <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm, basierend auf Infrarot-Wärmebildgebung und Laserinterferometer), kombiniert mit künstlicher Intelligenz zur Optimierung der Druckparameter (adaptive Steuerung, Fehler <1 % $\pm$ 0,1 %), verbessert die Effizienz der Formenherstellung (Produktivitätssteigerung um 20–30 % $\pm$ 2 %) und die Qualitätskontrolle.

Nachhaltigkeit

Die Verwendung von recyceltem Pulver (Wiederverwendungsrate > 90 % $\pm$ 2 %, basierend auf Pulversiebung und erneutem Kugelmahlen) , Prozesse mit geringem Energieverbrauch (Energieverbrauch < 10 kWh/kg $\pm$ 1 kWh/kg, unter Verwendung hocheffizienter Laserquellen) und abbaubare Trägermaterialien fördern die umweltfreundliche Herstellung, insbesondere in Energieanwendungen (wie etwa Formen für Windturbinenblätter).

Die 3D-Drucktechnologie für Hartmetall bietet großes Anwendungspotenzial in der Medizintechnik, der Luft- und Raumfahrt sowie im Formenbau. Ihre zukünftige Entwicklung basiert auf der koordinierten Prozessoptimierung (Porositätskontrolle <0,05 % $\pm$ 0,01 %), Materialinnovation (Entwicklung neuer Hochentropielegierungen) und intelligenter Fertigung (Digital-Twin-Technologie). Es wird erwartet, dass die Technologie in den nächsten fünf bis zehn Jahren großindustriell Anwendung findet.

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

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

Inhaltsverzeichnis

Teil 4: Klassifizierung und Anwendungsgebiete von Hartmetall

Kapitel 14: Neue Anwendungen und Multifunktionalität von Hartmetall

14.0 Eigenschaften von Hartmetall

14.1 Elektronische und leitfähige Komponenten aus Hartmetall

14.1.1 Hartmetallformen für die Elektronikindustrie

(1) Hartmetall-Stanzform für Leadframes

(2) Hartmetall-Chip-Verpackungsform

(3) Hartmetall-Leiterplatten-Stanzform

(4) Hartmetall-Mikrostecker-Stanzform

(5) Hartmetall-Sensor-Verpackungsform

(6) Hartmetall-Laserbohrform

14.1.2 Wärmeableitungssubstrat aus Hartlegierungen für die Elektronikindustrie

(1) Wolframkarbid-Kupfer (WC-Cu)-Verbundwärmeableitungssubstrat

(2) Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Diamant (WC-Diamant)-Verbund

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Aluminiumnitrid (WC- AlN)

Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Siliziumkarbid (WC- SiC)

(5) Wärmeableitungssubstrat aus Wolframkarbid-Bornitrid (WC-BN)-Verbundwerkstoff

14.1.3 Technologie, Prinzipien und Verbesserungen von Hartmetallmatrizen und

Wärmeableitungssubstraten

14.1.2 Optimierung der elektrischen Leitfähigkeit von Hartmetall

14.2 Biomedizinische Anwendungen von Hartmetall

14.2.1 Hartmetallimplantate und -werkzeuge

14.2.2 Biokompatibilität und Oberflächenmodifizierung von Hartmetall

14.3 Anwendung von Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung

14.3.1 Wolframkarbid-Platin (WC Pt)-Kompositkatalysator

14.3.2 Potenzial von Hartmetall in Brennstoffzellen, Superkondensatoren,

Wasserstoffspeichern und Lithiumbatterien

14.4 Additive Fertigung mit Hartmetall (3D-Druck)

14.4.1 Drucktechnologie für Wolframkarbid (WC)-basierte Materialien (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)

14.4.2 Forschung und Anwendung zweidimensionaler (2D) Wolframkarbid (WC)-basierter Materialien

14.4.3 Leistung und Herausforderungen beim 3D-Druck von Materialien auf Wolframkarbidbasis (WC) (Porosität < 2 %)

14.5 Anwendungen von Hartmetall in Verteidigung und extremen Umgebungen

14.5.1 Anwendung von Wolframkarbid (WC)-basierten Materialien im Verteidigungs- und Militärbereich

14.5.2 Anwendung von WC-basierten Materialien in extremen Umgebungen in der Tiefsee und im Weltraum

14.5.3 Herausforderungen hinsichtlich der Strahlungs- und Thermoschockbeständigkeit von

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Werkstoffen auf Basis von Hartmetall (WC)

14.6 Intelligente Fertigung und Sensoranwendung von Hartmetall

14.6.1 Sensortechnologie (Druck, Temperatur, Vibration) auf Basis von Wolframkarbid (WC)

14.6.2 Werkzeuge und Überwachungsanwendungen von Wolframkarbid (WC)-basierten Materialien in der intelligenten Fertigung

14.6.3 Eigenschaften und Herausforderungen von Wolframkarbid (WC)-basierten Werkstoffen

Verweise

Anhang:

Katalysatoren auf Wolframkarbidbasis (WC) für Brennstoffzellen

Ein Überblick über die Anwendung von Hartmetall in Brennstoffzellen

Leitfähiges Hartmetall

Biomedizinische Werkzeuge aus Hartmetall

Medizinische Hartmetallimplantate

Hartmetall-Kühlkörpersubstrat

Hartmetall-Chip-Verpackungsform

ASTM E92-23 Standardprüfverfahren für die Vickershärte und Knoop Härte metallischer Werkstoffe

ASTM G65-23 Standardprüfverfahren für die Abriebprüfung von Metallen und Legierungen mit trockenem Sand/Gummirad

Welche Arten und Anwendungsbereiche gibt es von Hartmetallformen ?

JB/T 8144-2010 Technische Anforderungen an Stanzwerkzeuge

Hartmetall-Ziehsteine Technische Bedingungen

YB/T 5136-2006 Technische Anforderungen für Pulvermetallurgieformen

GB/T 6110-2021 Ziehsteine - Bauarten und Abmessungen von Hartmetall-Ziehsteinen

JB/T 3943-2017 Ziehsteine - Technische Spezifikationen für Hartmetall-Ziehsteine

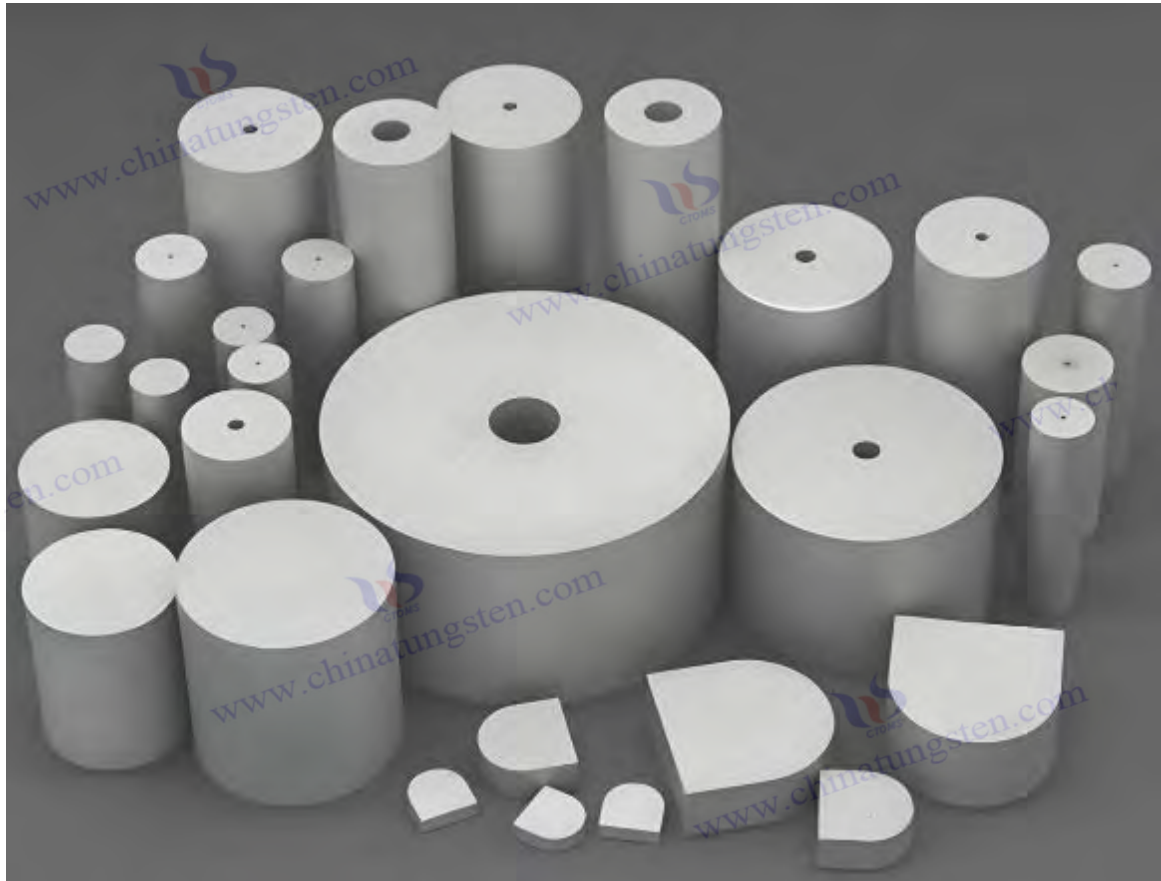
Was sind die Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Wärmeableitungssubstraten aus Hartmetall?

Welche Anwendungen gibt es für Hartmetall in der Katalyse und Energiespeicherung?

Welche Anwendungen gibt es für Hartmetall im medizinischen Bereich?

Arten, Eigenschaften, Leistung und Probleme von 3D-Druck-Hartmetallmaterialien

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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