

Zirkoncarbide-Komponenten für Hochtemperaturprozesse

Leistungsstark, zuverlässig und preiswert

Inhalt

1. Zirkoncarbide als Alternative zu Wolfram und Molybdän	3
2. Preiswerte und reproduzierbare Herstellverfahren	3
3. Werkstoffdaten und Betriebsverhalten von ZrC-Heizelementen	4
4. Zuverlässige Verbindungstechnik	5
5. Vorteile für den Anwender	5
6. Leistungs- und Kooperationsangebot des Fraunhofer IKTS	5

Kontakt

Dr. Hans-Peter Martin

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Winterbergstraße 28 | 01277 Dresden

Telefon +49 351 2553-7744
hans-peter.martin@ikts.fraunhofer.de
www.ikts.fraunhofer.de

1. Zirkoncarbid als Alternative zu Wolfram und Molybdän

Für Hochtemperaturprozesse in der Halbleiterindustrie, Mikro- und Nanoelektronik, Photovoltaik, Optik oder Werkstoffproduktion werden immer höhere Ansprüche an die Reinheit von Prozessatmosphären sowie die korrosive, thermische und chemische Stabilität gestellt. Derzeit werden für diese Anwendungen hauptsächlich Wolfram und Molybdän eingesetzt. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der hohen Preise dieser Refraktärmetalle sind alternative Werkstoffe wie Zirkoncarbid (ZrC) für innovative Lösungen im Anlagenbau attraktiv.

Zirkoncarbid gehört zu den metallähnlichen Keramiken. Wie nur bei sehr wenigen Werkstoffen ist der Dampfdruck selbst bei hohen Temperaturen von über 2000 °C extrem niedrig. Der hohe Schmelzpunkt ($T_s > 3500$ °C) ermöglicht den Einsatz bis zu höchsten Temperaturen. Unter nichtoxidierenden Atmosphären zeigt Zirkoncarbid eine herausragende Korrosionsstabilität. Daher eignet es sich bestens für Hochtemperaturanwendungen und ist in seinen Eigenschaften bisher eingesetzten Refraktärmetallen mindestens gleichwertig.

Neben seinen herausragenden Werkstoffeigenschaften ist Zirkoncarbid zudem leichter, kostengünstiger und enthält keine kritischen Rohstoffe. Dennoch wird es bisher noch nicht genutzt, da die Herstellung von großformatigen und dichten ZrC-Werkstoffen bisher technisch nicht möglich war. Mit einer zuverlässigen und kostengünstigen Herstellungstechnologie wäre dieser Werkstoff allerdings eine attraktive Alternative zu vielen Refraktärmetallen.

2. Preiswerte und reproduzierbare Herstellungsverfahren

Vor diesem Hintergrund wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem dichte ZrC-Werkstoffe in unterschiedlichen Geometrien über eine drucklose Sinterung kostengünstig produziert werden können. Die abgestimmte Kombination der technologischen Schritte ermöglicht die Herstellung großformatiger ZrC-Komponenten mit einer Länge von mehr als 250 mm. Ebenso lassen sich Platten und Stäbe erzeugen. Solche Bauteile können als elektrische Heizleiter, thermischer Schutz, Fluidleitungen oder Konstruktionselemente für Hochtemperaturanwendungen eingesetzt werden und damit die Betriebsqualität für Hochtemperaturanlagen verbessern.



Abbildung 1: Verdampfer- und Tiegelmaterial aus Zirkoncarbid.

Tabelle 1: Vergleich konventioneller Hochtemperaturwerkstoffe mit Zirkoncarbid.

Werkstoff	Vorteile	Nachteile
Wolfram	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr hoher Schmelzpunkt (3420 °C) - Niedrigster Dampfdruck - Hohe Kriechbeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhte Bruchanfälligkeit durch Rekristallisation - Hoher Herstellungspreis
Molybdän	<ul style="list-style-type: none"> - Niedriger Dampfdruck bis ca. 1700 °C - Günstigerer Herstellungspreis als Wolfram 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximale Einsatztemperatur < 1800 °C - Erhöhte Bruchanfälligkeit durch Rekristallisation
Zirkoncarbid	<ul style="list-style-type: none"> - Extrem hitzestabil (bis 3500 °C) - Niedriger Dampfdruck - Gute Korrosionsstabilität 	<ul style="list-style-type: none"> - Keramiktypisches Bruchverhalten - Festigkeit niedriger als bei Refraktärmetallen

3. Werkstoffdaten und Betriebsverhalten von ZrC-Heizelementen

Praxisbezogene Tests bestätigen dem Werkstoff einen linearen Verlauf des elektrischen Widerstands bis 2000 °C, eine hohe thermische Stabilität, eine hohe mechanische Festigkeit sowie eine keramiktypische Bruchzähigkeit auf dem Niveau von Siliciumcarbid. Eine Übersicht der ermittelten Werkstoffeigenschaften und ein Vergleich mit anderen Heizelement-Materialien sind in Tabelle 2 und 3 dargestellt.

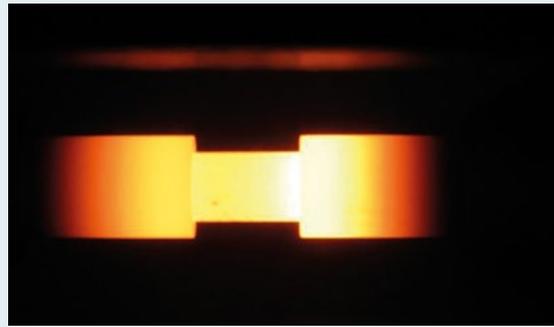


Abbildung 2: Messung der mechanischen Belastbarkeit eines Zirkoncarbid-Heizelements bei hohen Temperaturen (10 kN, bis 1900 °C).

Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften von Zirkoncarbid-Heizelementen.

Parameter	Wert	Einheit	Anwendungsaspekte
Dichte (theoretisch)	6,73	g·cm ⁻³	
Dichte (gesintert)	6,63	g·cm ⁻³	98,5 % der theoretischen Dichte, keramisch praktische vollständige Verdichtung möglich
Offene Porosität	0,05	Vol. %	Keine signifikanten Wechselwirkungen mit der Umgebung
Schmelzpunkt ZrC	3532	°C	Refraktärwerkstoff mit höherem Schmelzpunkt als Wolfram (3422 °C)
4-Punkt-Biegefestigkeit / RT	350–450	MPa	Übliche Festigkeit von hochwertigen Keramikwerkstoffen wie SiC
4-Punkt-Biegefestigkeit / 1400 °C	150–230	MPa	Hohes Festigkeitsniveau auch bei höheren Temperaturen, Festigkeitsabfall mit der Temperatur
4-Punkt-Biegefestigkeit nach Auslagerung bei 1900 °C bei RT	350–450	MPa	Kein Festigkeitsabfall durch thermische Belastung
Bruchzähigkeit	4	MPa·m ^{1/2}	Ähnlich wie SiC.
E-Modul / RT	410	GPa	Hohe Steifigkeit, wie SiC.
Ausdehnungskoeffizient / RT	5,4	10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	
Ausdehnungskoeffizient / 2000 °C	7,1	10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	
Spez. elektr. Widerstand / RT	6,8·10 ⁻⁵	Ωcm	Metallähnlicher elektrischer Widerstand, relativ hoch
Spez. elektr. Widerstand / 2000 °C	2,1·10 ⁻⁴	Ωcm	Moderater positiver Temperaturkoeffizient
Wärmeleitfähigkeit / RT	31	W·(mK) ⁻¹	Moderate Wärmeleitfähigkeit wie Al ₂ O ₃ oder Si ₃ N ₄
Wärmeleitfähigkeit / 2000 °C	38	W·(mK) ⁻¹	Moderater Anstieg der Wärmeleitfähigkeit
Spez. Wärmekapazität / RT	0,355	J·(gK) ⁻¹	
Spez. Wärmekapazität / 2000 °C	0,490	J·(gK) ⁻¹	

Tabelle 3: Vergleich mit anderen Heizelementmaterialien bei 1800 °C.

Heizelementdaten bei 1800 °C	Wolfram	Molybdän*	ZrC
Spez. elektr. Widerstand [Ω*cm]	7,83E-5	8,56E-5	2,18E-5
Leistung [W]	4118	6731	5062
Stromdichte [A/mm ²]	25,7	30,9	16,4
Oberflächenbelastung [W cm ²]	129	212	153

*Molybdän nur bis 1800 °C mechanisch stabil.

4. Zuverlässige Verbindungstechnik

Mit Hilfe innovativer Füge Technologien lassen sich Zirkoncarbid-Heizelemente zuverlässig in das Gesamtsystem einbinden. Bereits getestete Legierungen auf der Basis von Fe-Si-Ti ermöglichen Temperaturen an der Fügezone von $> 1200\text{ °C}$. Die jeweilige Funktion der ZrC-Komponenten definiert die Anforderungen an die Anbindung: elektrische Ankopplung, thermische Isolation oder Leitung für Anlagenkomponenten sowie mechanische Verstärkungen, Träger oder Abgrenzungen.



Abbildung 3: Kupferringe als Endkontakte zu Zirkoncarbid-Testkörpern, Schumpftechnik auf metallisierter Oberfläche.

5. Vorteile für den Anwender

Zirkoncarbid ist hinsichtlich sehr vieler Eigenschaften den bekannten Wolframkomponenten sehr ähnlich. Es erreicht einen vergleichbar niedrigen Dampfdruck bei Vakuumanwendungen auch bei sehr hohen Temperaturen. Der Schmelzpunkt von Zirkoncarbid liegt sogar über dem von Wolfram. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit sind niedriger als die der Refraktärmetalle Wolfram und Molybdän, was insbesondere für Heizleiteranwendungen oder thermische Verbundkonstruktionen vorteilhaft ist. Die neu erarbeitete Technologie zur Sinterung von ZrC-Bauteilen bietet vor allem die Chance, diese Produkte deutlich preiswerter als die bekannten Refraktärmetallprodukte herzustellen. Hinzu kommt, dass die Verfügbarkeit von Ressourcen zur Rohstoffbereitstellung im Vergleich zu Wolfram sicherer und signifikant größer ist.

Zusätzlich bieten Zirkoncarbid-Komponenten weitere Optionen für den Aufbau von Hochtemperaturanlagen, die aus ihrem spezifischen Eigenschaftsprofil resultieren. Die veränderte Wärmeleitung, andere chemische Reaktivität, höhere Härte und Steifigkeit sowie die deutlich geringere spezifische Masse gestatten neue konstruktive Prinzipien, Isolationsstrategien und erhöhen die Zuverlässigkeit und Betriebszeit in bestimmten Prozessen.

Technische Vorteile der ZrC-Lösung

- Verbesserung von Planbarkeit für Wartung und Reparatur
- Vermeiden des Einbringens von Fremdstoffen in hochreine Prozesse
- Erhöhung der Zuverlässigkeit der Qualitätskontrolle beim Herstellungsprozess

6. Leistungs- und Kooperationsangebot des Fraunhofer IKTS

Mit seinen Zirkoncarbid-Komponenten bietet das Fraunhofer IKTS eine Komplettlösung für Heizelemente für Hochtemperaturanwendungen:

- Werkstoffauswahl gemäß der auftretenden Prozessparameter
- Herstellung von Heizelementen in kundenspezifischen Abmaßen
- Herstellung von Brennhilfsmitteln
- Herstellung von Targets und Verdampferzubehör
- Auswahl des passenden Fügeverfahrens und der Fügekomponenten
- Charakterisierung von hochtemperaturbeständigen Keramiken bis 2000 °C



Abbildung 4: Zirkoncarbid-Heizelemente für Hochtemperaturprozesse.

Autoren

Dr. Hans-Peter Martin | hans-peter.martin@ikts.fraunhofer.de
Katrin Schönfeld | katrin.schoenfeld@ikts.fraunhofer.de

Über das Fraunhofer IKTS

Seit mehr als 30 Jahren demonstriert das Fraunhofer IKTS das Potenzial keramischer Werkstoffe für eine stetig wachsende Breite von Anwendungsgebieten. Unser Antrieb ist es, innovative ganzheitliche Systemlösungen und Dienstleistungen zu entwickeln, aber auch spezifische Einzelprobleme innerhalb der Prozesse unserer Partner aus Industrie und Wissenschaft zu lösen. Durch unsere Expertise in der Charakterisierung und Analyse von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen entlang ihres gesamten Lebenszyklus verfügen wir über einen einzigartigen Datenpool, um Neuentwicklungen effizient und schnell realisieren zu können.

Das Fraunhofer IKTS beschäftigt an seinen drei Hauptstandorten in Dresden und Hermsdorf sowie zahlreichen Außenstellen mehr als 800 Mitarbeiter. Damit ist es das größte Keramikforschungsinstitut Europas. Den Forschenden stehen auf über 40 000 m² Nutzfläche hervorragend ausgerüstete Labors und Technika zur Verfügung. Dazu gehören sowohl industrietaugliche Pilotlinien als auch Applikationszentren, in denen neue Entwicklungen unter anwendungsnahen Bedingungen erprobt werden.

www.ikts.fraunhofer.de