

Hochentropie-Keramiken

Mit den sogenannten Hochentropie-Keramiken (High-Entropy Ceramics, HEC) rückt seit einigen Jahren eine neue Werkstoffgruppe in den Fokus des wissenschaftlichen Interesses, von der man sich wesentliche Verbesserungen im Hinblick auf mechanische, aber je nach Typ auch funktionale Eigenschaften wie z. B. die Ionenleitfähigkeit erwartet. Bereits mittelfristig kann mit auf HEC basierenden Produkten in der Raumfahrt oder in Hochleistungsbatterien gerechnet werden. Gerade auch im wehrtechnischen Kontext könnten solche speziell für den Einsatz in extremen Umgebungen erforschten Werkstoffe sowohl in massiver Form als auch als Beschichtungen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bieten.

HEC enthalten im Vergleich zu etablierten Hochleistungskeramiken (z. B. Bornitrid oder mit Zirkonoxid verstärktes Aluminiumoxid) ungewöhnlich viele verschiedene Komponenten. Diese mindestens vier, meist mehr Komponenten sind zu annähernd gleichen Anteilen in der Keramik enthalten. Aufgrund ihrer näherungsweise statistisch homogenen Verteilung innerhalb der kristallinen Struktur ergeben sich sehr viele gleichwertige Kombinationsmöglichkeiten bezüglich der Atome auf den benachbarten Gitterplätzen. Mit genau dieser Vielfalt ist, wie schon zuvor für Legierungen gezeigt, die Stabilität solcher hochentropischen Keramiken verknüpft. Die Bezeichnung HEC beruht auf der hohen Entropie dieser Werkstoffe, die generell ein Maß für die Gesamtzahl an solchen Anordnungsmöglichkeiten darstellt. Diese völlig neue Art von Werkstoffen wird daher als strukturell geordnet und kompositorisch ungeordnet beschrieben.

Dieser Zusammenhang wurde erstmalig 2015 für Keramiken nachgewiesen, deren Ausgangskomponenten unterschiedliche Oxide waren. Seither konnte bereits für viele weitere chemische Untergruppen (Boride, Karbide, Nitride und kürzlich Aluminate, Zirkonate sowie Silizide) Eigenschaftskombinationen nachgewiesen werden, die die der individuellen Ausgangskomponenten übertreffen. Sie weisen beispielsweise besondere mecha-

nische Eigenschaften auf und gelten somit als vielversprechende Option bei der Neuentwicklung von Schutzkonzepten.

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, zu denen neben hervorragenden mechanischen Eigenschaften auch eine hohe chemische Beständigkeit sowie eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit zählen können, sind HEC interessante Kandidaten für Anwendungen bei extrem hohen Temperaturen. Solche Neuentwicklungen bei Ultrahochtemperaturkeramiken, von denen nur eine sehr begrenzte Anzahl an möglichen Materialsystemen zur Verfügung steht, könnten im Inneren von Turbinenantrieben Anwendung finden oder als thermische Barrieren in Automobilanwendungen sowie in der Luft- und Raumfahrt. In diesem Zusammenhang wird auch diskutiert, ob sie auch Belastungen, wie sie bei Hyperschallgleitern oder Hyperschallmarschflugkörpern zu erwarten sind, standhalten.

Im Bereich der Raumfahrt wäre der Schutz von Kommunikations- oder Aufklärungssatelliten vor schädlichen Einflüssen wie kosmischer Strahlung, Temperaturextremen und Trümmereinschlägen ein weiterer möglicher Anwendungsfall für HEC. Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Entwicklung extrem harter und gleichzeitig zäher Materialsysteme mit verbesserter ballistischer Haltewirkung speziell für den Personen- und Fahrzeugschutz. Darüber hinaus könnten transparente HEC z. B. für den Schutz von Sensoren interessant werden.

Ein breites Spektrum an funktionalen Eigenschaften wurde vorwiegend bei oxidbasierten HEC nachgewiesen. Hierzu zählt eine hohe ionische Leitfähigkeit für Lithium- oder Natrium-Ionen bei Raumtemperatur, wie sie z. B. bei Batterien wünschenswert ist. Einige HEC zeigen auch vielversprechende katalytische Eigenschaften, z. B. als Katalysatoren für die Wasserspaltung zur sauberen Wasserstoffherzeugung. In unterschiedlichsten Bereichen des Energiesektors könnten durch HEC neue Impulse gegeben werden. Erste im Labor realisierte HEC verfügen über ein starkes Absorptionsvermögen und eine große effiziente Absorptionsbandbreite

und werden zur Manipulation elektromagnetischer Wellen in Betracht gezogen.

Die mögliche Anwendungsvielfalt dieser Werkstoffgruppe in Kombination mit den zu erwartenden Leistungssteigerungen bei relativ günstigen Herstellungskosten führt zu dem beobachteten akademischen Interesse und der damit verbundenen hohen Publikationsdynamik. Ihre nutzbaren Eigenschaften rücken gerade erst in den Fokus, da das Forschungsgebiet sich zurzeit überwiegend noch im Stadium der Grundlagenforschung befindet. Derzeit liegt der Schwerpunkt bei der Diversifizierung der HEC, sowohl bezüglich möglicher kristalliner Strukturen als auch ihrer chemischen Zusammensetzung. Allein die Bandbreite der möglichen Kombinationen von Komponenten scheint unüberschaubar, hier liegt auch die größte Herausforderung. So spielen die Möglichkeiten der computergestützten Materialentwicklung eine wichtige Rolle bei der Auswahl der optimalen Ausgangszusammensetzung für ein nutzbares Endprodukt mit signifikant gesteigerten Leistungsparametern. Die computergestützte Vorhersage von anwendungsspezifischen, funktionalen Materialien und Strukturwerkstoffen, teils auch mithilfe von Künstlicher Intelligenz, setzt sich in der Forschungslandschaft zunehmend durch und wird zu einer zusätzlichen Beschleunigung im Bereich der Materialwissenschaften beitragen. Darüber hinaus zählt sie zu den Schlüsselfaktoren für die Kommerzialisierung der HEC.

Aufgrund der beobachteten herausragenden Eigenschaften werden sich einzelne Anwendungsgebiete zu Treibern bei der Entwicklung von HEC entwickeln. Dazu könnte zum einen die Raumfahrt gehören, da hier der Entwicklungsdruck besonders hoch ist und hohe Entwicklungskosten nicht per se abschreckend wirken. Zum anderen die Batterieindustrie, da hier eine enorm breite Anwendung mit entsprechenden Absatzzahlen hohe Profite verspricht. In diesen Bereichen kann unabhängig vom genutzten Materialsystem (z. B. HEC-Borid, HEC-Oxid) bereits mittelfristig mit Produkten gerechnet werden.

Dr. Heike Brandt