

KfK 4174  
November 1986

# **Porosität und Thermoschockbeständigkeit keramischer Werkstoffe**

U. Jauch, G. Ondracek  
Institut für Material- und Festkörperforschung

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Material- und Festkörperforschung

KfK 4174

Porosität und Thermoschockbeständigkeit  
keramischer Werkstoffe

U. Jauch  
G. Ondracek

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



# Porosität und Thermoschockbeständigkeit keramischer Werkstoffe

U. Jauch und G. Ondracek

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E.h. Eckard Macherauch zum 60. Geburtstag gewidmet

Es wird die Porositätsabhängigkeit der Thermoschockbeständigkeit aus theoretischen Ansätzen hergeleitet und begründet, warum unter gegebenen Bedingungen geringe Porositäten zu einer erhöhten Thermoschockbeständigkeit führen.

## Porosity and Thermal Shock Behaviour of Ceramic Materials

Considering theoretical porosity-property-correlations a porosity dependance of the thermal shock resistance of ceramics is discussed. The treatment demonstrates, that low porosity may lead to an increase in the thermal shock resistance.

Ganz im Gegensatz zu den Metallen zeigen keramische Werkstoffe kein tolerantes Verhalten im veränderlichen Temperaturfeld: der Thermoschock führt beim Abschrecken von bestimmten Temperaturen zum Bruch. Je nach Art des Temperaturfeldes und anderer Zustands- bzw. Randbedingungen ist der zum Bruch führende Temperaturgradient ( $\Delta T_{\max}$ ) unterschiedlich [1], immer jedoch entspricht er einer Proportionalität der Art

$$\Delta T_{\max} \approx \frac{R_m (1 - \nu) \cdot \phi_{th}}{\alpha_{th} \cdot E} \quad (1)$$

$R_m$  = Bruchfestigkeit;  $\nu$  = Poissonzahl;  $\phi_{th}$  = Wärmeleitfähigkeit;  $\alpha_{th}$  = thermischer Ausdehnungskoeffizient;  $E$  = Elastizitätsmodul)

Der Ausdruck

$$R_{TS} = \text{const} \frac{R_m (1 - \nu) \cdot \phi_{th}}{\alpha_{th} \cdot E} \quad (2)$$

soll daher hier für die weiteren Betrachtungen als Maß für die (maximale) Thermoschockbeständigkeit ( $R_{TS}$ ; Thermoschockwiderstand) betrachtet werden.

Für die poröse keramische Werkstoffe gilt, daß

– der thermische Ausdehnungskoeffizient von der Porosität ( $P$ ) unabhängig ist [2] und sich auch die Poissonzahl mit der Porosität kaum ändert:

$$\alpha_{th} \neq f(P) \quad (3)$$

$$\nu \neq f(P) \quad (4)$$

– die Bruchfestigkeit einer (empirischen) Gleichung der Art

$$R_{mP} = R_{mM} (1 - P)^n \quad (5)$$

mit  $n \geq 1$

folgt, wobei  $n = 1$  die – geringstmögliche – Abnahme der Bruchfestigkeit infolge Querschnittsreduktion durch Porosität bedeutet und  $n > 1$  durch Kerbspannungen verursacht wird

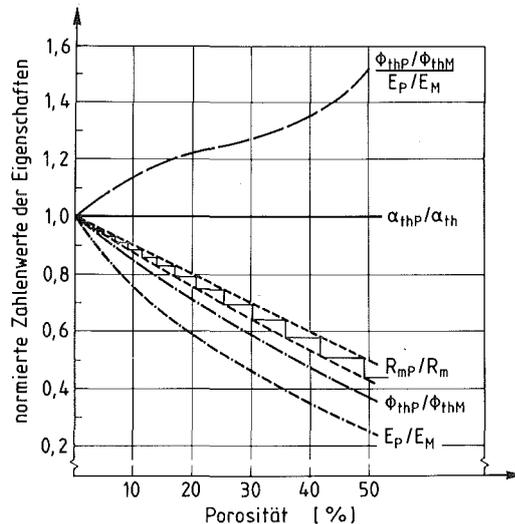
– die Wärmeleitfähigkeitsabnahme für alle Porenformen und Orientierungen berechenbar ist, wobei z.B. für sphärische Porosität gilt [3]

$$\phi_{thP} = \phi_{thM} (1 - P)^{3/2} \quad (6)$$

– der E-Modul bei sphärischer Porosität ebenfalls berechenbar ist und zwar nach Gleichung (4) ( $0 \leq P \leq 0,5$ )

$$E_P = E_M (1 - 1,21 P^{2/3}) \quad (7)$$

In *Abb. 1* sind diese Porositätsabhängigkeiten für sphärische Poren dargestellt und zwar jeweils als das Verhältnis der Eigenschaft des porösen Materials bezogen auf diejenige des kompakten Materials.



**Abb. 1.** Abhängigkeit des normierten thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha_{thP}/\alpha_{th}$ ), der normierten Bruchfestigkeit ( $R_{mP}/R_m$ ), der normierten thermischen Leitfähigkeit ( $\phi_{thP}/\phi_{thM}$ ) und des normierten Elastizitätsmoduls ( $E_P/E_M$ ) von der Porosität für sphärische Poren.

**Fig. 1.** Dependence of the normalized thermal expansion coefficient ( $\alpha_{thP}/\alpha_{th}$ ), the normalized rupture strength ( $R_{mP}/R_m$ ), the normalized thermal conductivity ( $\phi_{thP}/\phi_{thM}$ ) and the normalized Young's Modulus of Elasticity ( $E_P/E_M$ ) on porosity for spherical pores.

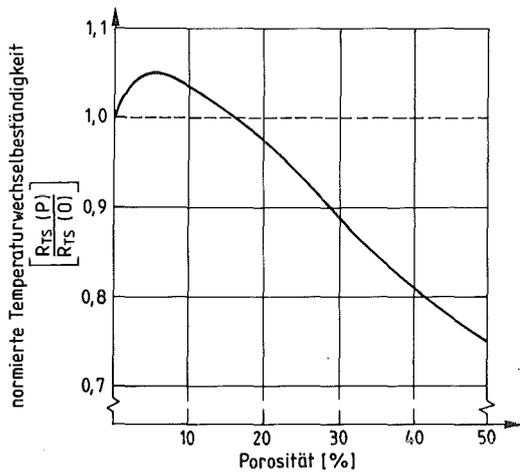


Abb. 2. Normierte Thermoschockbeständigkeit als Funktion der Porosität bei sphärischen Poren.

Fig. 2. Normalized thermal shock rupture strength in dependence on spherical porosity.

Nach den derzeit gültigen Vorstellungen ergibt sich die „Sägezahnkurve“ für die Bruchfestigkeit aus der Tatsache, daß Kerbspannungen zwar an „schwächsten Stellen“ Risse auslösen, diese aber an der nächsten Pore „abgeblockt“ werden. Die kritischen Kerbspannungen sind damit kurzfristig abgebaut, d.h. günstigstenfalls wird der Zustand erreicht, für den Gl. (5) mit  $n = 1$  (obere Grenzkurve für  $R_{mp}$  in Abb. 1) gilt, gleichzeitig wird aber der tragende Querschnitt um die Ribfläche weiter vermindert (vergleiche horizontale „Sägezahnflanken“ in Abb. 1).

Setzt man die Porositätsfunktionen (Gln. 3 ··· 7) der Eigenschaften in Gl. (2) ein, so erhält man die Abhängigkeit der Thermoschockbeständigkeit keramischer Werkstoffe von der – sphärischen – Porosität zu

$$R_{TS}(P) = \text{const} \frac{R_{mM} (1-P)^n (1-\nu_M) \phi_{thM} (1-P)^{3/2}}{\alpha_{th} \cdot E_M (1-1,21 P^{2/3})} \quad (8a)$$

d.h. in normierter Schreibweise

$$\frac{R_{TS}(P)}{R_{TS}(O)} = \frac{(1-P)^{5/2}}{1-1,21 P^{2/3}} \quad (8b)$$

In Abb. 2 ist diese Porositätsabhängigkeit der Temperaturwechselbeständigkeit grafisch aufgetragen. Danach kann sich die Thermoschockbeständigkeit mit steigender Porosität zunächst gegenüber dem porenfreien Material verbessern, was von der Porenstruktur abhängig ist. Die Theorie der Gefüge-Eigenschafts-Korrelationen – in diesem Falle der konstitutiven Porositäts-Eigenschafts-Gleichungen – bestätigt daher, was empirisch bereits mehrfach festgestellt und von Scholze wie folgt zusammengefaßt wurde [5]: „Die meisten der in die Wärmespannungsparameter eingehenden Werte werden durch Poren erniedrigt . . . In der Praxis beobachtet man allerdings oft bei etwa 20 Vol.% Porosität ein Maximum der Temperaturwechselbeständigkeit . . .“

## Literatur

1. D. P. H. Hasselman, *Ceramic Bulletin* 49-12 (1970) 1033.
2. G. Ondracek, *Z. Werkstofftechnik* 9 (1978) 140.
3. P. Nikolopoulos, G. Ondracek, *J. Am. Ceram. Soc.* 66-4 (1983) 238.
4. P. Mazilu, G. Ondracek, in Vorbereitung (1987).
5. H. Salmang, H. Scholze, *Keramik*, Springer Verlag Berlin – Heidelberg – New York (1982) 253.

Anschrift: Prof. Dr. G. Ondracek, Institut für Material- und Festkörperforschung, Universität und Kernforschungszentrum Karlsruhe, Postfach 36 40, 7500 Karlsruhe.

[T177]