

Probleme bei der Bestimmung kritischer Spannungsintensitätsfaktoren keramischer Werkstoffe

R. F. Pabst
Max-Planck-Institut für Metallforschung
Institut für Sondermetalle, Stuttgart
F. E. Buresch
Institut für Mechanik I, Universität Stuttgart

Abstract

Contrary to metals or transparent brittle materials like glass it is very difficult in materials like opaque Al_2O_3 , Si_3N_4 or SiC to generate cracks and measure crack length. To overcome these difficulties the data was obtained from saw cuts. This data was independent of the normalized crack length a/b (in a certain area) and the specific test. However, the data is dependent upon the width and shape of the ground notch and the structure of the end of the notch. The K_{IC} -factor can be obtained from theory and extrapolated experimental data. By introducing a small but finite particle of linear dimension η the structure of the material examined is taken in consideration.

1. Einleitung

Aus der wachsenden Bedeutung von Werkstoffen wie Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC für Konstruktionsteile bei Prozessen der Energieerzeugung in Kraftwerksanlagen, im Triebwerksbau und in der Elektrotechnik, ergibt sich die Notwendigkeit zur Bestimmung eindeutiger Kennwerte, die im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten Zug- und Biegefestigkeiten als Materialkonstanten anzusprechen sind. Eine solche Bestimmung muß sich in geeigneter Weise nicht mit kompakten Proben, sondern mit dem für die Bruchentstehung entscheidenden kritischen RiB bei einer bestimmten angelegten Spannung beschäff-

tigen. Das Problem ist, diesen RiB kontrolliert anzubringen und exakt auszumessen.

2. Experimentelle Durchführung

Im Gegensatz zu Metallen, aber auch durchsichtigen spröden Stoffen wie Glas /1/, ist es bei sehr spröden Stoffen wie Al_2O_3 (undurchsichtig), Si_3N_4 , SiC oder auch Graphit sehr schwierig, Risse kontrolliert zu erzeugen und die RiBlänge exakt auszumessen /2/ /3/.

Es wurden daher Risse durch Diamantsägeschnitte verschiedener Breiten (0,1 - 0,5 mm) simuliert. Die Aufgabe besteht dann in einer kritischen Durchleuchtung dieser Methode. Es wurden Al_2O_3 -Proben verschiedener Reinheitsgrade, Korngröße und Porosität untersucht und zum Vergleich sehr spröde Stoffe wie SiC, Si_3N_4 , aber auch Graphit herangezogen (Bild 1). Die Versuche wurden vornehmlich mit einer 4-Punkt-Biegeanordnung wechselnder Auflagebreiten und Auflageabstandsverhältnisse durchgeführt. Vergleichsweise wurden auch 3-Punkt-Auflagen sowie die DCB-Probe verwendet. Zusätzlich waren Probenabmessungen, Probenvolumina (Faktor 40), normierte Kerbtiefe, Kerbgrundbreite und Kerbgrundform variiert worden. Die Rauigkeit und Homogenität des Kerbgrundes läßt sich durch eine unterschiedliche Diamantkornung der Sägen und durch Ausheilprozesse verändern.

3. Ergebnisse /4/

Die mit Sägeschnitten erhaltenen Ergebnisse erfüllten nicht die bruchmechanische Forderung nach einem mathematischen Schnitt (ErmüdungsriB) in einem Kontinuum. Daher ist im Text der K_{IC} -Faktor mit (+) versehen, K_{IC}^+ . Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, daß innerhalb des korrigierten Bereiches $0,1 < a/b < 0,6$ (a/b = normierte Kerbtiefe) der K_{IC}^+ -Wert konstant ist, und zwar unabhängig von der Sägebreite. Eine Veränderung der Auflageabstände, der Auflage-

abstandsverhältnisse im 4-Punkt-Biegeversuch sowie Versuche mit der DCB-Probe führen bei konstant gehaltener Sägebreite zu gleichen K_{IC}^+ -Werten. Der K_{IC}^+ -Faktor wächst linear mit wachsender Sägebreite. Die Form des Kerbgrundes ist für Sägebreiten von 0,4 und 0,5 mm von großer Bedeutung. Weit geringer beeinflußt die Diamantenkornung der Säge den K_{IC}^+ -Wert. Ausheilprozesse vergrößern die Inhomogenität des Kerbgrundes, d. h. der K_{IC}^+ -Faktor und die Streureate nehmen bei konstanter Sägebreite zu /5/. Eine Abhängigkeit des K_{IC}^+ -Faktors von dem unter kritischer Spannung stehenden Volumen $\sim \rho^2 d$ (d = Länge des Kerbgrundes) konnte nicht beobachtet werden. Wegen des linearen Zusammenhangs K_{IC}^+ -Wert zu Sägebreite bzw. $\sqrt{\rho}$ (ρ = Kerbradius) läßt sich nach $\rho = 0$ (mathematischer Schnitt) extrapolieren. Rechnerisch läßt sich ebenfalls der Grenzübergang $\rho \rightarrow 0$ bilden, wenn der Spannungskonzentrationsfaktor K_t bekannt ist /6/ /7/. Die so experimentell und rechnerisch bestimmten "wahren" K_{IC} -Werte stimmen sehr gut überein. Ein Grenzübergang ist jedoch bei einem Material, das ein Gefüge aufweist, wenig sinnvoll. Es läßt sich ein endliches lineares Element $\eta \sim 25 \mu m$ finden /5/ /7/, so daß der Grenzübergang nunmehr mit $\rho' \rightarrow 2\eta = 50 \mu m$ erfolgt, was ungefähr der Sägebreite 0,1 mm entspricht. Gemessene K_{IC}^+ -werte bei Sägebreite 0,1 mm und gerechnete für $\rho' \rightarrow 50 \mu m$ zeigen eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

4. Schluß

Mit Diamantsägen lassen sich brauchbare K_{IC} -Werte ermitteln. Allerdings ist bei sehr spröden Stoffen eine starke Abhängigkeit von der Sägebreite und der Kerbgrundform zu erwarten. Dies steht im Gegensatz zu experimentellen Daten und theoretischen Überlegungen nach /8/ bzw. /9/ /10/.

/1/ F. Beckhof
H. Richter Glasstechnische Berichte No. 12, H. 1,
1969

/2/ D. A. Shockey J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 51, No. 6,
G. W. Groves 1968

/3/ P. L. Gutshall Eng. Fract. Mech. 1, 1969
G. E. Gross

/4/ R. F. Pabst Dissertation, Universität Stuttgart
(im Druck) 1972

/5/ V. Weiss Notch Analysis of Fracture
Fracture Vol. III ed. by H. Liebowitz
Academic Press, New York and London,
1971

/6/ G. R. Irwin Proc. First Symposium on Naval
Structural Mechanics, Pergamon Press,
London and New York, N. A. A., 1960

/7/ H. Neuber Kerbspannungslehre
Springer-Verlag 1958

/8/ R. W. Davidge Proc. Brit. Ceram. Soc., No. 15,
1970

/9/ P. Kuhn Fracture Design Analysis for Airflight
Vehicles
Fracture Vol. V ed. by H. Liebowitz,
1969

/10/ I. R. Rice Mathematical Theories of Brittle
Fracture
Fracture Vol. II ed. by H. Liebowitz,
1968

Vergleich einiger Materialien						
Sägenbreite: 0,2 mm, Medium: Silikonöl, 4-Punkt 18/54						
Material	Qualität	ρ [g/cm ³]	E [kp/mm ²] x 10 ⁴	\bar{d} [µm]	K_{IC}^+ [kp/mm ^{3/2}]	γ [erg/cm ²] x 10 ⁴
Al ₂ O ₃	H: 96%	3,69	3,2	20	14,4 ± 0,2	3,4
	S: 97%	3,70	3,5	10	14,2 ± 0,7	3,2
	D: Lucalox	3,97	4,0	50	13,0 ± 0,5	2,2
	B: 99%	3,84	3,8	20	11,9 ± 0,3	1,8
	P ₂ : off. Por. 11,9	3,32	2,8	-	12,0 ± 0,8	2,1
P ₁ : off. Por. 41,5	2,31	1,7	-	4,0 ± 0,3	0,6	
Si ₃ N ₄		2,32	1,4	-	8,2 ± 0,3	2,4
SiC		2,84	3,2	-	10,6 ± 0,9	1,7
Graphit		1,71	0,1	-	2,5 ± 0,04	3,1

Bild 1

Bruchwiderstände K_{IC}^+ und spezifische Bruchflächenenergie γ für verschiedene Qualitäten Al₂O₃ bzw. Substanzen Si₃N₄, SiC und Graphit, bezogen auf eine Diamantsägenbreite von 0,2 mm. (\bar{d} = mittlerer Korndurchmesser des Materials, ρ = Dichte, E = E-Modul). Auflageabstandsverhältnis des 4-Punkt-Biegeversuchs war 18 mm, oben zu 54 mm unten. Die Proben wurden unter Siliconöl bei Raumtemperatur gebrochen. Die Fehlerabweichung ist ein Maß für die Inhomogenität des Materials.