

Dietrich Munz · Theo Fett

Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe

Versagensablauf, Werkstoffauswahl,
Dimensionierung

Mit 149 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo Hong Kong 1989

Inhaltsverzeichnis

1. Übersicht und grundlegende Eigenschaften	1
1.1 Allgemeine Hinweise und Eigenschaften	1
1.2 Übersicht über die wichtigsten keramischen Werkstoffe	3
1.3 Anwendungen	5
Literatur zu Kapitel 1	7
2. Physikalische Eigenschaften	9
2.1 Der Wärmeausdehnungskoeffizient	9
2.2 Wärmeleitfähigkeit	10
2.3 Elektrische Leitfähigkeit	13
2.4 Spezifische Wärme	15
2.5 Dichte	17
2.6 Elastische Konstanten	18
Literatur zu Kapitel 2	19
3. Bruchmechanik	21
3.1 Grundlagen	21
3.2 Die ansteigende Rißwiderstandskurve	25
3.3 Experimentelle Methoden zur Ermittlung der Rißzähigkeit	27
3.3.1 Die Biegeprobe mit durchgehendem Riß	27
3.3.2 Doppeltorsionsprobe (DT-Probe)	29
3.3.3 Proben mit Spitzkerben	30
3.3.4 Proben mit Oberflächenriß (Knoop-Riß)	34
3.3.5 Vickers-Härteeindrücke	37
3.3.6 Vergleich verschiedener Probenformen	40

3.4	Rißzähigkeit verschiedener Keramiken	42
3.5	Unterkritisches Rißwachstum	45
3.5.1	Grunderscheinungen	45
3.5.2	Lebensdauer unter statischer Last	46
3.5.3	Lebensdauer bei wechselnder Belastung	48
3.5.4	Methoden zur Bestimmung von Rißwachstums- geschwindigkeiten	53
3.5.4.1	Bestimmung des unterkritischen Riß- wachstums an makroskopischen Rissen	53
3.5.4.2	Bestimmung des unterkritischen Rißwachstums an natürlichen Rissen	57
	Literatur zu Kapitel 3	65
4.	Bestimmung der Festigkeit	69
4.1	Messung der Zugfestigkeit	69
4.1.1	Der Zugversuch	69
4.1.2	Der Biegeversuch	71
4.1.3	Versuche an Rohrabschnitten	73
4.2	Messung der Druckfestigkeit	76
4.2.1	Der Druckversuch an zylindrischen Proben	76
4.2.2	Der Druckversuch am Hohlzylinder	78
4.2.3	Ergebnisse aus Druckversuchen	78
	Literatur zu Kapitel 4	81
5.	Streuung der mechanischen Eigenschaften	83
5.1	Ursache und prinzipielles Verhalten	83
5.2	Die Ermittlung der Weibull-Parameter	88
5.3	Der Größeneinfluß	90
5.4	Die Streuung der Lebensdauer	93
6.	Das Überlastverfahren	97
6.1	Ohne Berücksichtigung des unterkritischen Rißwachstums	97
6.2	Mit Berücksichtigung des unterkritischen Rißwachstums	99
6.3	Probleme des Überlastverfahrens	102
6.3.1	Unterkritisches Rißwachstum während der Aufbringung der Überlast	102
6.3.2	Andere Fehlerverteilung bei hohen Temperaturen	102
6.3.3	Simulation der Betriebsbeanspruchung	103
	Literatur zu Kapitel 6	103

7. Mehrachsigkeitskriterien	105
7.1 Darstellung in Mehrachsigkeitsdiagrammen	105
7.2 Globale Mehrachsigkeitskriterien	107
7.3 Fehlermodelle	111
7.3.1 Kreisförmige zylindrische Pore	111
7.3.2 Kugelförmige Pore	113
7.3.3 Pore als Ellipsoid	115
7.3.4 Kreisförmige Risse	116
7.3.5 Schlußfolgerung aus den Ergebnissen der Fehlermodelle	120
7.3.6 Statistische Behandlung	123
7.3.7 Lebensdauer	131
7.4 Experimentelle Methoden	132
7.4.1 Der Doppelring-Versuch	132
7.4.2 Der Kugel-auf-Ring-Versuch	134
7.4.3 Scheiben-Versuch	136
7.4.4 Rohr-Versuche	138
7.5 Experimentelle Ergebnisse	139
Literatur zu Kapitel 7	141
Anhang	144
8. Thermoschockverhalten	147
8.1 Thermospannung	147
8.2 Messungen der Thermoschockempfindlichkeit	155
8.3 Thermoschock aus bruchmechanischer Sicht	156
8.4 Parameter der Thermoschockempfindlichkeit	159
8.5 Thermoermüdung	162
Literatur zu Kapitel 8	165
9. Hochtemperaturverhalten	167
9.1 Kriechverformung	167
9.1.1 Kriechgesetzmäßigkeiten im Zugversuch	169
9.1.2 Abweichendes Kriechverhalten im Druckversuch	174
9.1.3 Kriechen bei variablen Spannungen	174
9.1.4 Kriechen im Biegeversuch	177
9.1.4.1 Der Biegestab unter Kriechbedingungen	177
9.1.4.2 Meßbare Größen im Kriechversuch	179
9.1.4.3 Auswertung von Biegekriechversuchen	182

9.1.4.4	Nichtlineare Kriechkurve durch Spannungsumlagerung	186
9.1.4.5	Spannungsverteilung im Biegestab	187
9.1.4.6	Messung der Unsymmetrie im Kriechverhalten	188
9.2	Versagen im Kriechbereich	190
9.2.1	Kriechbruch	192
9.2.2	Kriechrißwachstum	193
9.2.3	Versagenskarten	196
	Literatur zu Kapitel 9	199
10. Verbindungstechnik	203
10.1	Löten	203
10.2	Einschrumpfen	210
10.3	Einsintern	212
10.4	Eingießen	212
10.5	Kleben	212
10.6	Klemmen	212
	Literatur zu Kapitel 10	213
11. Bewertung von zerstörungsfrei festgestellten Fehlern	215
11.1	Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung	215
11.2	Zerstörungsfreie Prüfung	216
11.2.1	Das Farbeindringverfahren	216
11.2.2	Die Röntgenprüfung	217
11.2.3	Ultraschallverfahren	218
11.2.4	Ultraschallmikroskop	219
11.3	Bruchmechanische Fehlermodelle	219
11.3.1	Zweidimensionale Fehler	220
11.3.2	Dreidimensionale Fehler	221
11.3.2.1	Die kugelförmige Pore	222
11.3.2.2	Kugelförmige Einschlüsse	223
11.4	Vergleich vorhergesagter Festigkeiten mit Messungen	224
11.5	Schlußfolgerung	225
	Literatur zu Kapitel 11	225
12. Beispiel für die Analyse eines Bauteils	227
12.1	Allgemeine Hinweise	227

12.2 Das Keramikfenster einer Mikrowellenheizröhre	228
12.2.1 Temperaturen und thermische Spannungen	230
12.2.2 Spontanes Versagen	234
12.2.3 Versagen durch unterkritisches Rißwachstum	236
Literatur zu Kapitel 12	239
Sachwortverzeichnis	241