

U/260

Peras, A.Ja., Dauknis, V.I.

INDIREKTE BESTIMMUNGSMETHODEN DER ZUGFESTIGKEIT. - DRUCKPRÜFUNGEN

Deutsche Auszugsübersetzung aus:

Peras, A., Dauknis, V.: Pročnost' ognepornoj keramiki i metody ee issledovanija. Vil'njus: Mokslas, 1977, S. 82 - 89 (= Kapitel 3.2), S. 99 - 102 (= Kapitel 3.4).

Russ.: 3.2. Косвенные методы определения прочности при растяжении
3.4. Испытание на сжатие

Kosvennye metody opredelenija pročnosti pri rastjaženii. -
Ispytanie na szatie.

Titel des Buches:

Peras, A[mos Jakovlevič], Dauknis, V[alerionas Ignovič]

DIE FESTIGKEIT VON FEUERFESTKERAMIK UND DIE METHODEN DER FESTIGKEITS-
UNTERSUCHUNG (russ.)

Hrsg. von Prof. A. Žukauskas

Vil'njus: Verlag "Mokslas", 1977, 183 S. (Serie "Teplofizika", Bd 9).

**Übersetzungsstelle
der Universitätsbibliothek Stuttgart**

Inhaltsverzeichnis (gekürzt)

Vorwort	5
Verzeichnis der wichtigsten Bezeichnungen	6
1. Kapitel. <u>Einleitung</u>	8
2. Kapitel. <u>Die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten der Festigkeit von Feuerfestkeramik</u>	12
3. Kapitel. <u>Methoden der Festigkeitsbestimmung und die Prüfanlagenteile</u>	60
3.1. Zugprüfungen	61
3.2. Indirekte Bestimmungsmethoden der Zugfestigkeit	82
3.3. Biegeprüfungen	89
3.4. Druckprüfungen	99
4. Kapitel. <u>Anlagen zur Untersuchung kurzzeitiger Festigkeit</u>	103
5. Kapitel. <u>Einige Aspekte des Kriechens von Feuerfestkeramik</u>	135
Schluß	170
Literaturverzeichnis	171

V o r w o r t ¹⁾

Der neunte Band aus der Serie "Wärmetechnik" befaßt sich mit der Festigkeit von Feuerfestkeramik und ihren Untersuchungsmethoden in einem breiten Temperaturbereich. Dargelegt werden die Ergebnisse der analytischen und experimentellen Untersuchungen. Diese wurden im Institut für physikalische und technische Probleme der Energietechnik der Akademie der Wissenschaften der Litauischen SSR (IFTPE AN Lit SSR) in den vergangenen Jahren durchgeführt.

Verschiedenartigste feuerfeste keramische Werkstoffe werden heute immer mehr sowohl in den traditionellen als auch in ganz neuen Bereichen der Hochtemperaturtechnik und -technologie eingesetzt. Dadurch steigen die Untersuchungen über die Eigenschaften von feuerfesten keramischen Werkstoffen und über die Gesetzmäßigkeiten ihres Verhaltens unter verschiedenen Bedingungen beträchtlich an. Eine wichtige Rolle bei den Einsatzmöglichkeiten von Feuerfestkeramik spielen die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe: ihre Untersuchung wird immer wichtiger.

¹⁾ Zusammengestellt aus S. 5 und S. 180 (Summary) (Anm. d. Übers.)

Im vorliegenden Buch versuchen die Verfasser, ihre Erfahrung bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von feuerfesten Werkstoffen und bei den verschiedenen Testverfahren für keramische Werkstoffe unterschiedlicher Zweckbestimmung, Feuerfestigkeit und Struktur zu verallgemeinern. Der Schwerpunkt liegt auf der spezifischen Festigkeit der Werkstoffe und ihrem Einfluß auf die Prüfverfahren in einem breiten Temperaturbereich. Großes Gewicht wurde auf die Prozeßanalyse und die Untersuchungsmethoden des Hochtemperaturkriechens von Feuerfestkeramik gelegt.

Das 1. Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Festigkeit feuerfester keramischer Werkstoffe, insbesondere hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, und über den Einfluß ihrer Behandlung.

Im 2. Kapitel werden die wichtigsten Gesetzmäßigkeiten und statistischen Aspekte der Festigkeit von Feuerfestkeramik analysiert. Das Kapitel beinhaltet analytische Ergebnisse der Festigkeit-Porositätsrelation. Ein statistisches geometrisches Modell wird benutzt zur Ableitung der Gleichungen für die tatsächlichen Parameter der Wirkungsquerschnitte. Ein Wahrscheinlichkeitsmodell wird benutzt zur Analyse des Einflusses einer ungleichartigen Poren- und Kraftverteilung auf die Festigkeit. Der Einfluß niedriger Porosität auf die Festigkeit von feinkörnigen keramischen Werkstoffen wird analysiert.

Dargestellt wird eine allgemeine Temperatur-Festigkeitsrelation zusammen mit einer Analyse ihres besonderen Geltungsbereichs.

Das 3. Kapitel beschreibt die experimentellen Techniken bei Festigkeitsbestimmungen bei hohen und niedrigen Temperaturen. Zusammen mit den spezifischen Festigkeitskennwerten von Keramik werden spezielle Hoch- und Niedertemperaturprüfverfahren beschrieben. Die Charakteristiken von Zugprüfungen auf keramische Werkstoffe werden analysiert.

Der Einfluß der Prüfkörpergröße auf die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen poröser Werkstoffe wird analytisch ausgewertet. Ermittelt wurde eine stetige Größe-Festigkeitsrelation mit einem Maximum im niedrigen Bereich der Querschnittsflächen.

Die indirekten Bestimmungsmethoden der Zugfestigkeit werden ebenfalls erörtert, sowie ihre Anwendungsmöglichkeiten. Bei der Untersuchung der Biege- und Druckprüfungen von Keramik werden die Versuchsanlagen und die Beheizung der Prüfkörper beschrieben.

Im 4. Kapitel werden verschiedene Hochtemperaturanlagen für die Festigkeitsprüfung von Feuerfestkeramik, die im IFTPÉ AN Lit SSR gebaut wurden, beschrieben. Die wichtigsten Systeme der Anlagen und ihre Charakteristiken werden diskutiert. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen an einigen feuerfesten Werkstoffen werden dargestellt und analysiert.

Das 5. Kapitel befaßt sich mit dem Kriechen in feuerfesten keramischen Werkstoffen. Es wird eine Möglichkeit aufgezeigt, daß das Zugkriechen größer ist als das Druckkriechen. Die Analyse des Kriechens beim Biegen geht von verschiedenen Kriechwerten beim Zug und Druck aus. Es werden Gleichungen für die maximale Belastung und Kraft abgeleitet. Eine komplette Anlage für Kriechuntersuchungen mit verschiedenen Belastungsarten wird dargestellt.

Das zweite, dritte, vierte und fünfte Kapitel wurde von A.Ja. Peras geschrieben. V.I. Dauknis schrieb das erste Kapitel und war an der Erstellung von einzelnen Abschnitten des vierten Kapitels beteiligt.

Die Verfasser danken den Mitarbeitern des IFTPÉ AN Lit SSR, die an den im Buch dargelegten Untersuchungen mitwirkten, sowie allen, die zum Erscheinen des Buches beitrugen.

Verzeichnis der wichtigsten Bezeichnungen¹⁾

σ_B	Bruchgrenze beim Zug, N/m^2
H	Querschnittshöhe des Prüfkörpers, mm
τ	Schubspannung, N/m^2
t	Dicke des Prüfkörpers, mm
d	Außendurchmesser eines massiven oder Innendurchmesser eines ringförmigen Prüfkörpers, mm
B	Querschnittsbreite des Prüfkörpers, mm
P	Last, N
$K_B[X]$	Variationskoeffizient des Wertes X
D	Außendurchmesser eines ringförmigen Prüfkörpers, mm

I n d i z e s¹⁾

p bezüglich der Zugbeanspruchung

¹⁾Gekürzt, da nur die in den übersetzten Abschnitten verwendeten Bezeichnungen erforderlich (Anm. d. Übers.)

Indirekte Bestimmungsmethoden der Zugfestigkeit

Die bekannten Schwierigkeiten beim Herstellen keramischer Prüfkörper und beim Überprüfen keramischer Werkstoffe auf einachsigen Zug zwang zu indirekten Bestimmungsmethoden der Bruchgrenze. Das Wesentliche an diesen Methoden besteht darin, daß in den einfach gestalteten Proben bei einer bestimmten leicht anzulegenden Belastung Zugspannungen erzeugt werden, die bei entsprechender Steigerung der Belastung zum Bruch des Prüfkörpers führen.

In den letzten 10 - 15 Jahren wurde eine Reihe von indirekten Bestimmungsmethoden für σ_B entwickelt. Viele davon sind bei der Prüfung von solchen typisch spröden Werkstoffen wie Beton, Graphit, Keramik und dgl. praktisch anwendbar. Nachstehend werden kurz jene Verfahren erörtert, die in Festigkeitsuntersuchungen für feuerfeste keramische Werkstoffe tatsächlich einsetzbar sind.

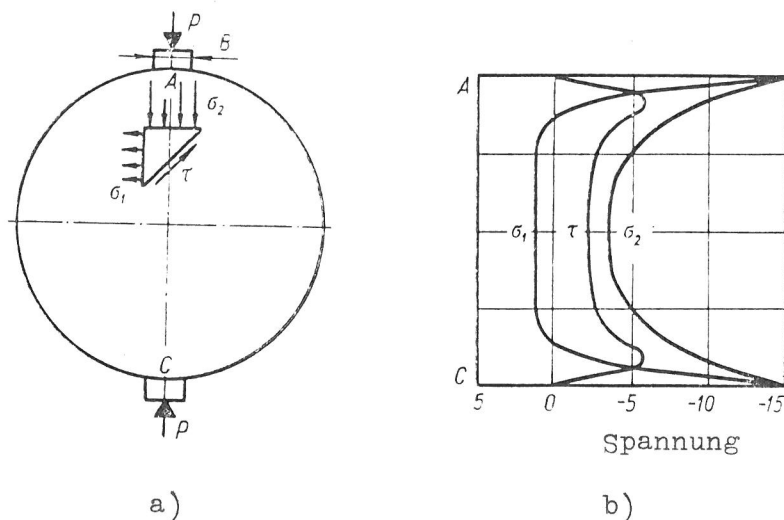


Abb. 3.13. Bestimmung der Bruchgrenze beim Zug nach der Methode der diametralen Druckbeanspruchung:
a) schematische Darstellung der Belastung des Prüfkörpers;
b) Druckfigur der Spannungsverteilung in der Ebene AC bei maximaler Zugspannung $\sigma_1 = 1$.

Methode der diametralen Druckbeanspruchung. Das Wichtigste an dieser Methode [121 - 122] ist die diametrale Einwirkung einer Drucklast auf einen zylindrischen Prüfkörper (Abb. 3.13.a). Infolgedessen tritt in diesem ein komplizierter Spannungszustand mit charakteristischer Verteilung der Zugspannungen σ_1 auf (siehe Abb. 3.13.b). Wie aus der Abbildung hervorgeht, treten im Prüfkörper neben den Zugspannungen gleichzeitig beträchtliche Druckspannungen σ_2 und Schubspannungen τ auf. Die Relation zwischen den Werten σ_1 , σ_2 und τ hängt in erster Linie von der Breite der Kontaktfläche B und der Verteilung der angelegten Last ab.

Wichtigste Aufgabe bei der Durchführung von Diametraldruckprüfungen ist die Gewährleistung eines stabilen Bruchs des Prüfkörpers aufgrund der Zugspannungen, was man nach der Beschaffenheit des Bruches beurteilen kann. Bei geringen Werten von B trat der Bruch des Prüfkörpers aller

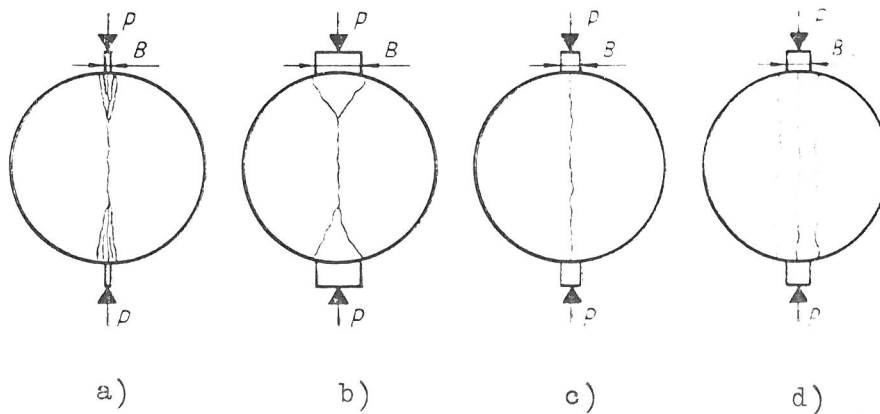


Abb. 3.14. Verschiedene Arten des Bruchs von Prüfkörpern bei diametraler Druckbeanspruchung.

Wahrscheinlichkeit nach aufgrund der Druckspannungen auf. In diesem Fall beginnt der Bruch mit einem sich ausbreitenden Netz von Rissen an der Belastungsstelle (Abb. 3.14.a) und endet damit, daß der Prüfkörper in viele Teile zerspringt. Ist B aber äußerst groß, dann läßt dies auf Schubspannungen schließen [122], und der Bruch verläuft, wie in Abb. 3.14.b dargestellt. Bei optimaler Breite von B wird der Bruch durch die Zugspannungen verursacht. In diesem Fall verläuft der Bruchriß parallel zur Last (Abb. 3.14.c). Wie in [121] angegeben, sind die Zugspannungen auch bei einem sogenannten "Dreifachbruch" ausschlaggebend (Abb. 3.14.d).

Die Bruchgrenze bei Zugbeanspruchung wird bei richtigem Bruch des Prüfkörpers bestimmt nach der Gleichung

$$\sigma_B = \frac{2P_p}{\pi dt}, \quad (3.16)$$

wobei P_p die Bruchbelastung, d den Durchmesser des Prüfkörpers und t seine Dicke bezeichnen.

Für die Praxis empfiehlt sich die Druckanlagebreite $B = 0,1 d$. Bei der Prüfung von sehr harten Werkstoffen sollte zwischen dieser Fläche und dem Prüfkörper eine weiche Folie gelegt werden, um eine gleichmäßige Verteilung der Last auf die gesamte Kontaktfläche zu gewährleisten. Aus denselben Überlegungen heraus sollte die Dicke des Prüfkörpers t nicht über $0,5 d$ liegen.

Das beschriebene Prüfverfahren besitzt mehrere Vorzüge. Die wichtigsten sind: einfache Form des Prüfkörpers, unkomplizierte Prüftechnik. Leider kann dieses Verfahren nur bei Zimmertemperatur oder mäßig erhöhter Temperatur durchgeführt werden, d.h. wenn es um einen Sprödbruch geht. Im plastischen Bereich ändert sich die Verteilung der Spannungen radikal. In diesem Fall ist deshalb auch die Rechengleichung (3.16) ungeeignet.

Festigkeitsbestimmung bei Zugbeanspruchung an Prüfkörpern mit quadratischem Profil. Dieses Verfahren [123] ist im Grunde der Methode der diametralen Druckbeanspruchung sehr ähnlich. Sein Unterschied und Vorteil besteht darin, daß dem Druck durch die Druckgeber keine runden, sondern quadratische Prüfkörper ausgesetzt sind, die direkt aus feuerfesten keramischen Fabrikaten geschnitten werden können.

Bei diesem Prüfverfahren sieht die Belastung schematisch so aus, wie in Abb. 3.15.a dargestellt. Daraus geht hervor, daß der flache Prüfkörper mit quadratischem Profil in der Mittelachse mit zwei Druckgeber bestimmter Breite belastet wird. Im Prüfkörper tritt dabei ein komplizierter Spannungszustand mit äußerst großen Zugspannungen auf, die senkrecht zur Lasteinwirkung verlaufen und unter bestimmten Bedingungen zum Bruch des Prüfkörpers führen können. Die Verteilung der Zugspannungen über die Höhe des Mittelquerschnitts AC in Abhängigkeit von der Relation der Breite des Indentors B zum Querschnitt H ist in Abb.

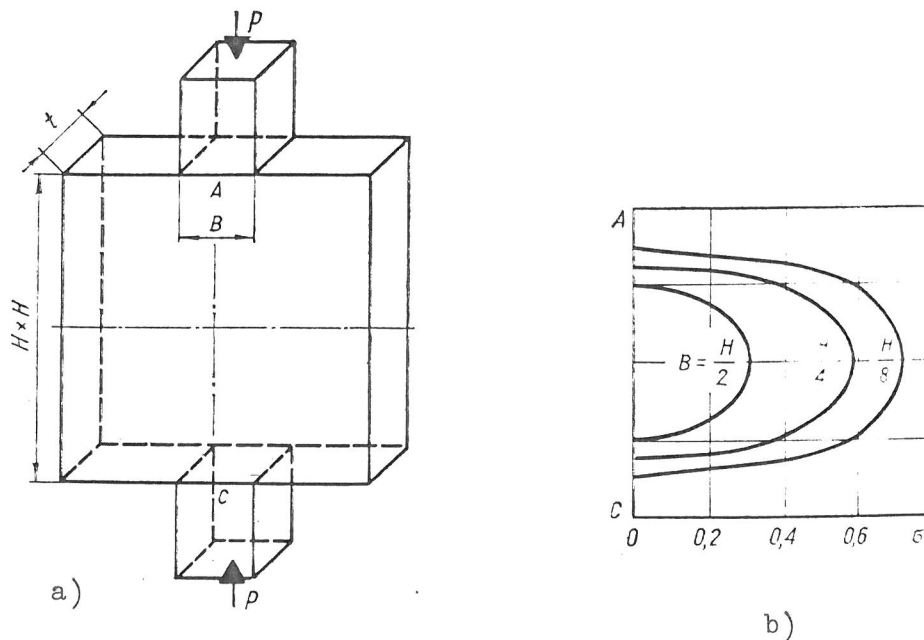


Abb. 3.15. Bestimmung der Bruchgrenze bei Zugbeanspruchung an Prüfkörpern mit quadratischem Profil:
 a) schematische Darstellung der Belastung des Prüfkörpers;
 b) Druckfigur der Verteilung der Zugspannungen in der Ebene AC in Abhängigkeit von der Relation B/H beim Wert $\frac{P}{Ht} = 1$.

3.15.b dargestellt. Daraus geht hervor, daß der Wert der bei gleichbleibender Belastung auftretenden Zugspannungen mit abnehmender Relation B/H zunimmt. Die Erfolgsaussichten dieses Tests hängen davon ab, ob der Bruch des Prüfkörpers aus den maximalen Zugspannungen im Zentrum des Prüfkörpers $\sigma_{\text{Bruch max}}$ resultieren oder ob er durch die maximalen Schubspannungen τ_{max} herbeigeführt wird. Letzteres gilt nach den Angaben in [123] unter der Bedingung, daß sich die Spannungen auf die Bereiche des Prüfkörpers konzentrieren, die an den Kanten der Indentoren liegen. Wie die Untersuchungen am photoelastischen Modell zeigten [123], hängt der Wert der Relation $\tau_{\text{max}} / \sigma_{\text{Bruch max}}$ von der Relation B/H ab. Für die Prüfung kann der Bereich $\frac{B}{H} = 0,20 - 0,40$ bei Verwendung geringerer Werte der Relation B/H für festere Werkstoffe und umgekehrt empfohlen werden.

Die Bruchgrenze wird dabei bestimmt durch die Gleichung

$$\sigma_B = \frac{K_B P_p}{Ht}, \quad (3.17)$$

wobei K_B abhängiger Koeffizient von der Relation B/H ist. Anhand der Angaben in [123] kann folgende empirische Gleichung zur Bestimmung des Wertes K_B vorgeschlagen werden:

$$K_B = 0,86 - 1,12 \frac{B}{H}. \quad (3.18)$$

Für die Anwendung dieses Verfahrens gelten im Prinzip dieselben Einschränkungen wie für die Methode der diametralen Druckbeanspruchung, d.h. es ist nur beim Bruch im elastischen Bereich anwendbar.

Das beschriebene Verfahren kann unserer Meinung nach zur Festigkeitsbestimmung von echten feuerfesten keramischen Fabrikaten, z.B. von Ziegeln, eingesetzt werden. Belastet man einen Ziegelstein so, wie in Abb. 3.16 dargestellt, dann kann seine Bruchgrenze bei Zugbeanspruchung nach Formel (3.17) bestimmt werden, und der Wert des Koeffizienten K_B nach dem Wert der Relation B/B_K , wobei B_K die Ziegelbreite bezeichnet. Die Fehlergröße dürfte dabei unwesentlich sein, da der Einfluß der län- genmäßig äußersten Teile des Ziegels (über die punktierte Linie hinaus) auf den Bruchvorgang gering ist, insbesondere bei kleinen Relationen von B/B_K :

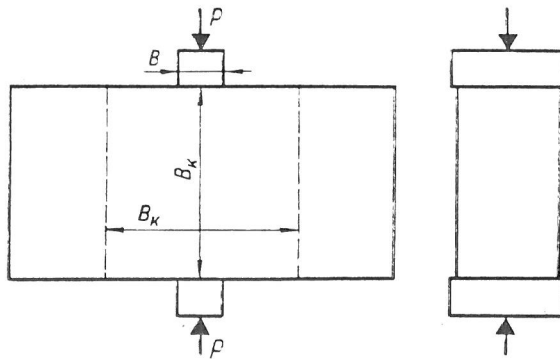


Abb. 3.16. Schematische Darstellung der Bruchgrenzenbestimmung von feuerfesten Ziegeln.

M e t h o d e d e r d i a m e t r a l e n D r u c k b e a n -
s p r u c h u n g v o n r i n g f ö r m i g e n P r ü f k ö r -
p e r n . Diese Methode [124] ist dem Belastungsbild nach (Abb. 3.17.a)
der Methode der diametralen Druckbeanspruchung sehr ähnlich und unter-
scheidet sich von ihr dadurch, daß anstelle einer massiven Scheibe ei-
ne Scheibe mit Mittelloch unter Druck gesetzt wird. Es muß darauf hin-

gewiesen werden, daß sich der Spannungszustand des Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Relation d/D (Innendurchmesser des Ringes zu Außendurchmesser) stark verändert. Bei geringen Werten der Relation d/D ist der Spannungszustand ähnlich dem bei diametraler Druckbeanspruchung einer massiven Scheibe. Das Loch spielt in diesem Fall im Wesentlichen nur die Rolle einer Spannungskonzentrierung. Bei großen Werten der Relation d/D arbeitet der verbiegbare Ring hauptsächlich auf Biegung.

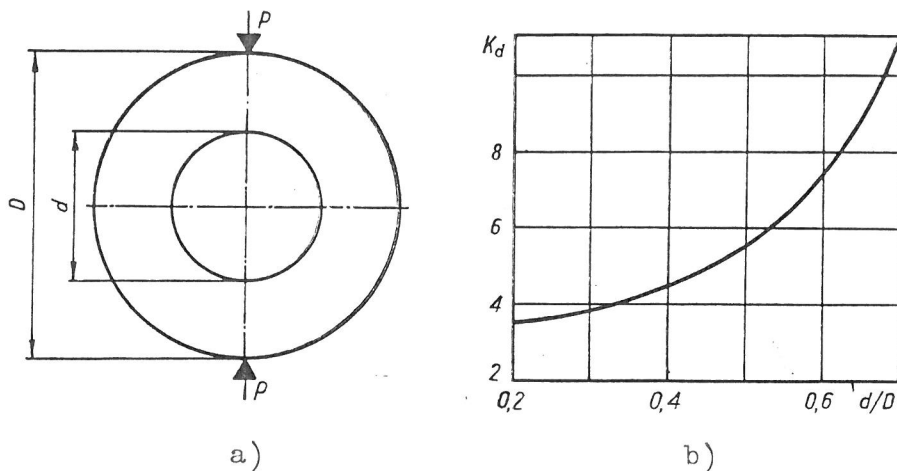


Abb. 3.17. Bestimmung der Bruchgrenze durch diametrale Druckbeanspruchung von ringförmigen Prüfkörpern;
a) schematische Darstellung der Druckbeanspruchung des Prüfkörpers;
b) Abhängigkeit des Koeffizienten K_d vom Wert der Relation d/D .

Die größten Zugspannungen treten im Prüfkörper an der Innenfläche des Ringes in der Lastangriffsebene auf. Zugspannungen treten auch im äußeren Bereich des Ringes auf, doch sind sie normalerweise gering. Druckspannungen kommen auf den entgegengesetzten Seiten des Ringes vor und haben keinen wesentlichen Einfluß auf den Bruch des Prüfkörpers.

Die Bruchgrenze des untersuchten Werkstoffes wird bestimmt nach der Gleichung

$$\sigma_B = \frac{K_d P_D}{(D-d)t}, \quad (3.18)$$

wobei K_d den von der Relation d/D abhängigen Koeffizienten bezeichnet (Abb. 3.17.b).

Nach den Hinweisen in [124] wird der Ring zwischen zwei parallelen Platten belastet. Interessant ist, daß in dieser Arbeit auch auf

eine Verwendung dieser Methode unter hohen Temperaturen hingewiesen wird (die Festigkeit von Graphit wurde bei 1 770 K bestimmt). Wie die vorher beschriebenen Verfahren kann aber auch diese Methode nur beim Bruch im elastischen Bereich angewandt werden.

Bestimmung der Festigkeit von rohrförmigen Prüfkörpern infolge Bruch durch inneren hydrostatischen Druck [125]. Das Wesentliche an diesen Verfahren geht aus Abb. 3.18.a klar hervor. Der Prüfkörper 1 liegt frei zwischen einer unteren 2 und einer oberen 3 Platte, die über die Säulen 4 miteinander verbunden sind. Über eine Gummieinlage 5 wird der Prüfkörper durch inneren hydrostatischen Druck belastet. Die Bruchgrenze des Werkstoffs wird dabei nach den bekannten Abhängigkeiten für den Werkstoffwiderstand bestimmt nach der Gleichung

$$\sigma_B = \frac{p_p d}{2c}, \quad (3.19)$$

wobei p_p den Innendruck bezeichnet, bei dem der Prüfkörper bricht, und c die Wanddicke des Prüfkörpers.

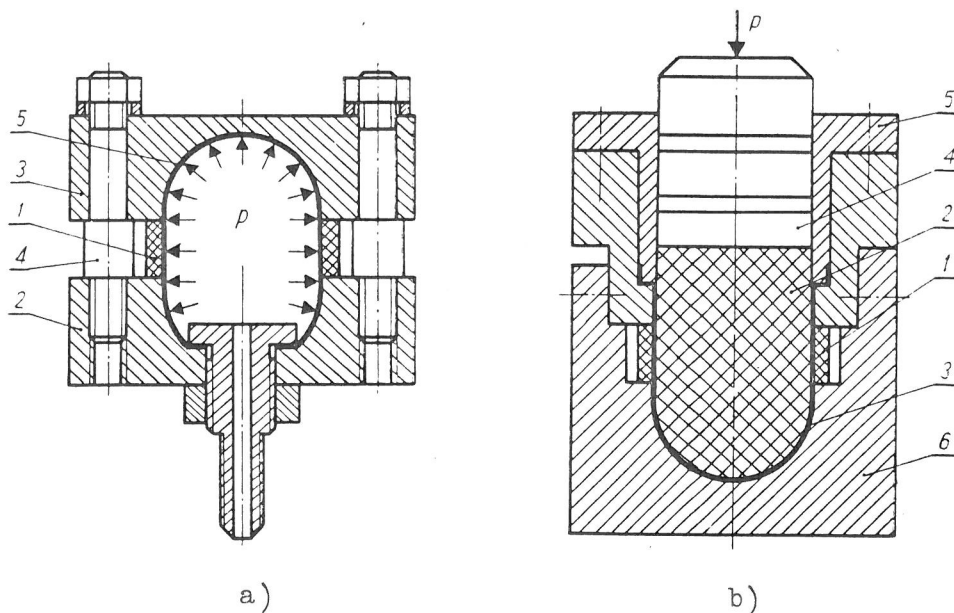


Abb. 3.18. Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Bestimmung der Bruchgrenze von rohrförmigen Prüfkörpern infolge Bruch durch inneren hydrostatischen Druck:

- a) bei einem durch Flüssigkeit erzeugten Druck;
- b) unter Verwendung einer Standardpresse.

Das beschriebene Verfahren eignet sich gut und bedarf keiner komplizierten Ausrüstung. Die Verteilung der Spannungen im Prüfkörper begünstigen die Bestimmung der Bruchgrenze des Werkstoffs bei Zugbeanspruchung, da die wesentliche und völlig bestimmte Werkstoffmenge unter praktisch gleichartigen Zugspannungen steht.

Von besonderem Interesse ist eine Abwandlung der Methode, bei der für die Tests eine gewöhnliche Presse eingesetzt wird [116]. In diesem Fall (Abb. 3.18.b) wird der Druck im Prüfkörper 1 durch einen weichen Silikongummi 2 erzeugt, der in eine elastische Verdichtungshülle 3 eingeschlossen ist. Druckquelle ist die Kraft P , die durch die Presse auf den Kolben 4 übertragen wird. Dieser bewegt sich in der Schelle 5, die auf der Matritze 6 befestigt ist. Die Rechengleichung hat in diesem Fall die Gestalt:

$$\sigma_B = \frac{2P_p d}{\pi D_{II}^2 c}, \quad (3.20)$$

wobei D den Kolbendurchmesser bezeichnet.

Allgemeine Einschätzung der indirekten Bestimmungsmethoden für σ_B . Außer den genannten Verfahren sollten noch einige recht aussichtsreiche indirekte Bestimmungsmethoden der Bruchgrenze genannt werden. [126, 127], die bei der Untersuchung keramischer Werkstoffe bislang keine große Anwendung gefunden haben.

Bei der abschließenden Bewertung der erörterten indirekten Bestimmungsmethoden von σ_B muß unbedingt folgendes beachtet werden. Alle genannten Verfahren berücksichtigen in dieser oder jener Form die Einwirkung des Werkstoffwiderstandes auf die Zugspannungen. Die Versuchsergebnisse haben ergeben, daß die in allen zitierten Arbeiten (ohne Ausnahme) indirekt ermittelten Werte σ_B ausreichend gut mit den Werten der Bruchgrenze übereinstimmen, die durch die gewöhnliche einachsige Zugbeanspruchung ermittelt wurden. Deshalb können diese Verfahren für die Festigkeitsbestimmung keramischer Werkstoffe im Temperaturbereich des Sprödbruches empfohlen werden. Besonders zweckmäßig sind die indirekten Methoden selbstverständlich bei der Festigkeitsbestimmung von Fabrikaten, deren Profil mit dem Profil der entsprechenden Prüfkörper übereinstimmt, d.h. bei Rohren, Stäben, bei verschiedenen Verkleidungsteilen, feuerfesten Ziegeln usw. Die indirekten Methoden werden zweck-

voll auch bei Untersuchungen der Wärmebeständigkeit, vergleichenden Untersuchungen, Untersuchungen über den Einfluß verschiedener technologischer Faktoren, Voruntersuchungen der Werkstoffe und bei anderen ähnlichen Tests angewandt. Ungeachtet all der genannten Vorzüge können die indirekten Methoden dennoch selbstverständlich die einachsigen Zugprüfungen bei hohen Temperaturen, bei Untersuchungen über die Gesetzmäßigkeiten der Verformung, bei der Analyse des Bruchvorgangs und dgl. nicht ersetzen.

Druckprüfungen

Druckprüfungen an feuerfesten keramischen Werkstoffen sind weit verbreitet und werden zur Festigkeitsbestimmung bei Zimmertemperatur und auch bei hohen Temperaturen angewandt. Als Prüfkörper für die Druckprüfungen werden rechteckige (quadratischer Querschnitt) und runde Teile verwendet. Dabei liegt die Relation von Prüfkörperhöhe zum Querschnitt gewöhnlich innerhalb von 1 bis 2, manchmal werden auch höhere Prüfkörper ($\frac{H}{B} \leq 4$) empfohlen [107]. Obwohl bei der Druckprüfung eine gleichmäßige Verteilung der Spannungen und ein homogener einfacher Spannungszustand angenommen wird, verzerren die ungleichmäßige Lastverteilung und die Reibung an den Stützen das Bild vom Spannungszustand des Prüfkörpers beträchtlich. Da sich die Reibung an den Stützen auf den Spannungszustand hauptsächlich in den Bereichen auswirkt, die an den Stützen liegen, wirkt sich eine größere Höhe günstig auf den größeren Mittelteil aus, wo eine gleichmäßige Druckbeanspruchung herrscht, die durch die Reibung nicht verzerrt wird. Andererseits steigert ein höherer Prüfkörper die Wahrscheinlichkeit der Dezentrierung bei Belastung was sich stark auf die Testergebnisse auswirkt.

Zur Minderung der Reibung an den Stützen können bei Prüfungen unter Zimmertemperaturen Spezialüberzüge oder Zwischenlagen benutzt werden. Bei höheren Temperaturen ist dies jedoch kaum möglich. Früher wurde auch vorgeschlagen, die Stützflächen konisch im Winkel der Kegelmantellinie zu gestalten, der gleich dem Reibungswinkel ist [108]. In diesem Fall muß ein Einfluß der Reibung an den Stützen ausgeschlossen werden. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der mechanischen Bearbeitung, möglichem Abrutschen an den zugespitzten Kanten und dgl. ist diese Vorgehensweise bei der Untersuchung von feuerfesten keramischen Werkstoffen kaum real.

Ein weiteres wichtiges Problem bei der Druckprüfung sehr fester und spröder keramischer Werkstoffe ist die Verminderung der lokalen Spannungen an den Stützen, die infolge der ungleichmäßigen Lastverteilung an der Kontaktfläche auftreten. Wie in [136] aufgezeigt, können die gemessenen Festigkeitswerte von Glas auf das Doppelte gesteigert werden, indem günstige Bedingungen für das Verhalten des Werkstoffs an den Stützen geschaffen werden. In dieser Arbeit und in deren Fortsetzung [137] wurde ein mehrteiliger Prüfkörper konstruiert, wie er in Abb. 3.26.a dargestellt ist. Die an die Stützen 2 angeklebten Schellen 1 schließen aus, daß an den Stirnseiten des Prüfkörpers 3 große lokale Spannungen auftreten. Gleichzeitig verhindern sie ein Abrutschen und Aufplatzen der Stützflächen des Prüfkörpers. Eine wichtige Rolle bei der gleichmäßigen Lastverteilung auf die Stirnseiten des Prüfkörpers spielt dabei die Klebschicht, deren Ausdrücken die Schelle 1 verhindert.

Bekannt sind auch andere Prüfkörperkonstruktionen, bei denen derselbe Zweck durch Vergrößerung der Stützfläche erreicht wird. Für ausschlaggebende Druckprüfungen an keramischen Werkstoffen wird in [8] eine Prüfkörperkonstruktion vorgeschlagen, wie sie in Abb. 3.26.b dargestellt ist. Nach den Angaben in [116] wurden gute Ergebnisse durch Verwendung einer mehrteiligen rohrförmigen Konstruktion erzielt (Abb. 3.26.c). Die Herstellung eines solchen Prüfkörpers schließt jedoch äußerst umfangreiche Arbeiten ein: die Endseiten 1 zu den Arbeitsflächen 2 müssen als konische Flächen der Stoßfuge sorgfältig eingeschliffen werden.

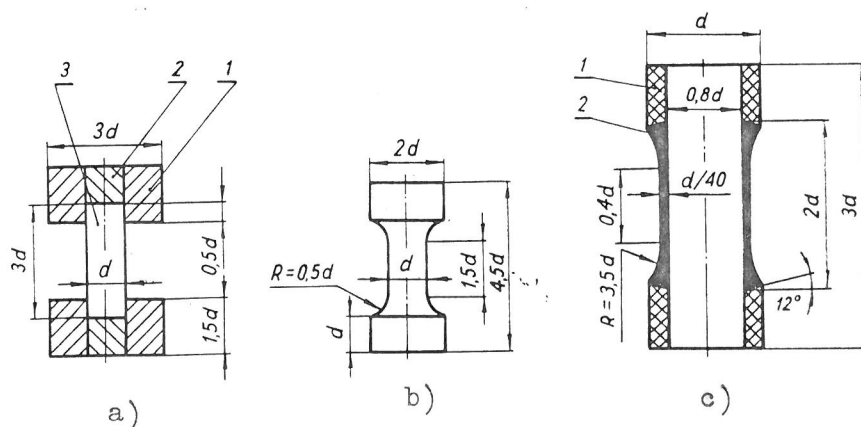


Abb. 3.26. Spezialkonstruktionen von Prüfkörpern für Druckprüfungen.

Der Bruchverlauf von keramischen Prüfkörpern bei Druckbeanspruchung im Test an gewöhnlichen Stützen wurde in [107] ausführlich analysiert. Dabei zeigte sich, daß die häufigste Bruchart der Prüfkörper das Aufplatzen ist, wobei sich deutlich sichtbare Schubpyramiden bilden, die mit den Lagerflächen auf die Stützflächen gerichtet sind. In diesem Fall springen die Seiten des Prüfkörpers entweder völlig oder teilweise ab, je nach Homogenität der Werkstoffstruktur, ob Defekte vorhanden sind und wo sie liegen. Die zweite, häufig vorkommende Bruchart, die zur Folge hat, daß sich an den Stützen eine Menge feiner Risse bildet, die parallel zur Lastenwirkung ausgerichtet sind, wird nach Meinung des Verfassers von [107] durch den gleichen Mechanismus bedingt. Dabei bilden sich die Schubpyramiden unter der Einwirkung der lokalen Spannungen an verschiedenen Stellen der Kontaktfläche und besitzen sehr geringe Größe. Bei hohen Temperaturen, wo dem Bruch starke plastische Verformungen vorausgehen, beobachtet man häufig ein Ausknicken des Prüfkörpers im Mittelbereich, doch sind auch in diesem Fall die Schubpyramiden deutlich unterscheidbar [111].

Die Abmessungen der Prüfkörper für die Druckprüfung können entsprechend den Hinweisen in Abschnitt 3.1. gewählt werden. Berücksichtigt man, daß die Länge des Prüfkörpers relativ gering und folglich auch das Gesamtvolumen geringer ist, kann man teilweise die Querschnittsabmessungen vergrößern. Man muß jedoch beachten, daß die Festigkeit von keramischen Werkstoffen bei Druckbeanspruchung häufig sehr große Werte erreicht, und deshalb muß man in jedem Einzelfall prüfen, ob ein Antrieb und eine Belastungsvorrichtung bei niedrigen und hohen Temperaturen möglich ist.

Bei der Durchführung der Tests muß besonders aufmerksam die Herstellung der Prüfkörperstützflächen verfolgt werden und auch, daß die Prüfkörperachse senkrecht ist. Nicht weniger wichtig ist die Zentrierung des Prüfkörpers auf den Stützflächen der Belastungsvorrichtung. Deshalb müssen Zentrierringe, Seitenstützen und dgl. verwendet werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Zentriervorrichtungen die freie Verformung des Prüfkörpers bei Belastung nicht behindern dürfen.

Die geringe Länge des Prüfkörpers bei Druckprüfungen vereinfacht das Erwärmen der Prüfkörper etwas. Bei Tests im Freien verwendet man geeigneterweise einen kleinen Kanonenofen, der zum Wechseln des Prüfkörpers gehoben oder gesenkt wird. Die Belastungsstempel in solchen Geräten sollten nach Möglichkeit aus Keramik sein, z.B. aus Korund, wodurch die Wärmeableitung vermindert und eine Oxidation ausgeschlossen wird.

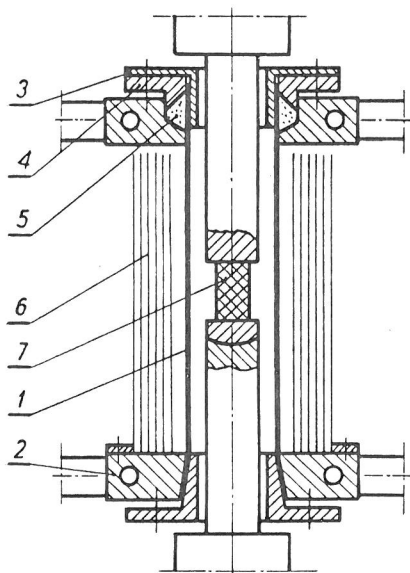


Abb. 3.27. Schematische Darstellung eines Hochtemperaturerhitzers für Druckprüfungen.

Bei Untersuchungen in Vakuumanlagen besteht der Erhitzer meistens aus einer Folie, die so nah wie möglich am Prüfkörper liegt. Ein Beispiel für einen solchen Erhitzer zeigt Abb. 3.27 [111]. Das wichtigste Teil dieser Anlage ist der Molybdän-Röhrenheizkörper 1, der von den wassergekühlten Kupferelektroden 2 Spannung erhält. Bei der Wärmeausdehnung gleitet der Erhitzer zwischen den Führungshülsen 3 und 4, wobei die 4 das in einem geschlossenen Raum befindliche Graphit-

pulver 5 einpreßt, mit dessen Hilfe der Strom auf den Erhitzer gegeben wird. Der Erhitzer wird durch das konzentrische mehrschichtige Molybdän-Schutzrohr 6 abgeschirmt, das an der unteren Elektrode befestigt ist. Der Prüfkörper 7 wird gewechselt, indem der untere Stempel gesenkt wird, bis der Prüfkörper über den Erhitzer hinausragt. Mit einer solchen Erwärmungsvorrichtung kann man für den Prüfkörper eine Temperatur von bis zu 2 300 K erreichen.

Von der Bedienung her (Wechsel, Zentrieren des Prüfkörpers und dgl.) ist eine zerlegbare Konstruktion, wie in Abb. 3.12.c¹⁾ dargestellt, offensichtlich bequemer. Um eine über die gesamte Höhe des Prüfkörpers konstante Temperatur zu gewährleisten, darf die Relation von Erhitzerhöhe zu Prüfkörperhöhe dabei aber nicht unter 5 - 6 liegen.

¹⁾(im Original S. 81 - Anm.d.Übers.)

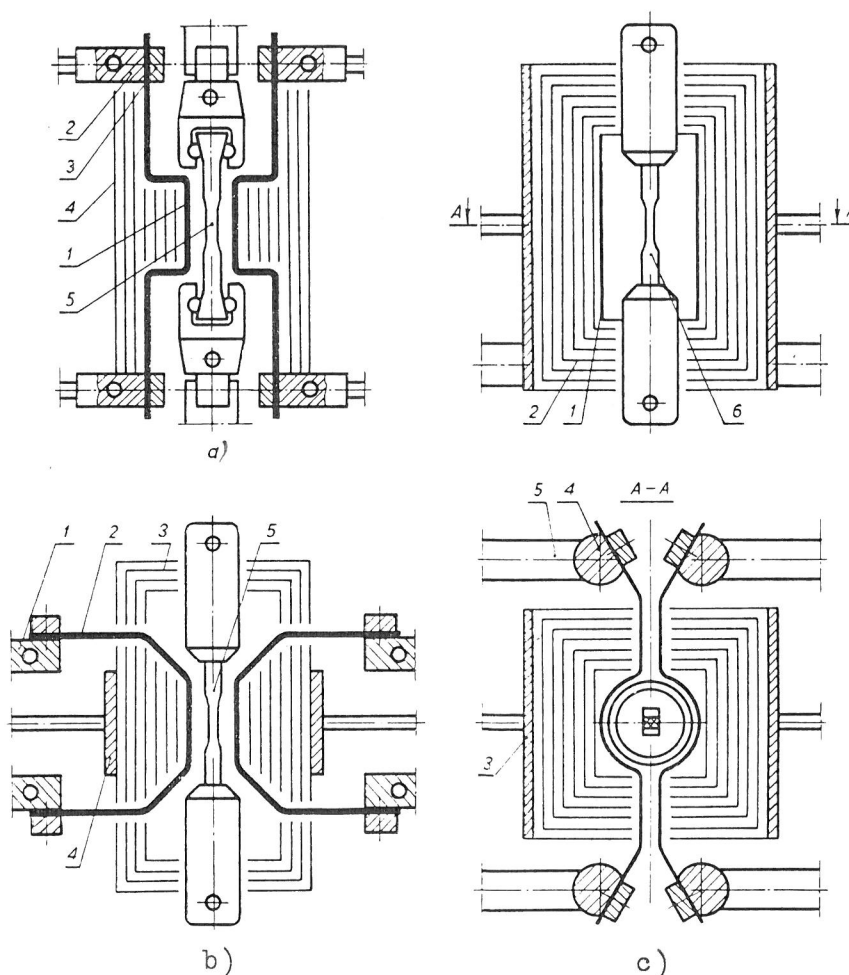


Abb. 3.12. Schematische Darstellungen von Hochtemperaturerhitzern für Zugprüfungen.

L i t e r a t u r¹⁾

8. Писаренко Г. С., Руденко В. Н., Третьяченко Г. Н., Трошченко В. Т.
Прочность материалов при высоких температурах. Киев. «Наукова думка», 1966.
796 с. с ил.
Pisarenko, G.S., Rudenko, V.N., Tret'jačenko, G.N., Troščenko, V.T.
Pročnost' materialov pri vysokich temperatur.
Kiev: Verlag "Naukova dumka", 1966.
Englische Übersetzung:
High-temperature strength of materials. Ed. by Georgij Stepanovič
Pisarenko u.a. Transl. from Russ. by T. Pelz.
Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1969.
107. Рохлин И. А. О физических основах прочности строительной керамики —
«Стекло и керамика», 1969, № 11, с. 22—26.
Rochlin, I.A.: O fizičeskich osnovach pročnosti stroitel'noj
keramiki.
In: Steklo i keramika. Moskva, 26 (1969), Nr 11, S. 22 - 26.
Engl.: Physical bases for the strength of construction ceramics.
In: Glass and ceramics. New York, 26 (1969), Nr 11, S. 660
bis 664.
108. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов. Т. 2. М., «Наука», 1965, 480 с.
с ил.
Timošenko, S. P.
Soprotivlenie materialov. Tom 2.
Moskva: Nauka, 1965.
Engl.: Strength of materials. By Stephen Prokofievitch Timoshenko.
Bd 2.
New York, Van Nostrand, 1950-1951, 2. Aufl.
111. Кублицкас Ч. Б., Мажяускас И. С. Высокотемпературная установка
определения прочности огнеупоров при сжатии. — В кн.: Сопrotивление ма-
териалов. Каунас, 1969, с. 66—68.
Kublickas, Č.B., Majauskas, I.S.: Vysokotemperaturnaja ustanovka
dlja opredelenija pročnosti ogneuporov pri sžatii.
In: Soprotivlenie materialov. Kaunas: 1969, s. 66 - 68.
<Eine Hochtemperaturanlage zur Festigkeitsbestimmung von Feuer-
festkeramik bei Druckbelastung; russ.>
116. Mordfine L., Kerper M. Strength Testing of Ceramics. — In: Mechanical
and Thermal Properties of Ceramics, NBS, 1969, p. 243—262.
121. Rudnick A., Hunter A. R., Holden F. C. An Analysis of the Diametral
Compression Test. — "Mater. Res. Stand.", 1963, vol. 3, No 4, p. 283—289.
122. Mitchell N. B. The Indirect Tension Test for Concrete. — "Mater. Res. Stand.",
1961, vol. 1, No 10, p. 780—788.
123. Berenbaum R., Brodie I. Measurement of the Tensile Strength of Brittle
Materials. — "Brit. J. Appl. Phys.", 1959, vol. 10, No 6, p. 281—287.

124. Бортц С., Лунд Х. Оценка испытаний на растяжение хрупких материалов.—
В кн.: Графит как высокотемпературный материал. М., «Мир», 1964, с. 174—184.
Bortz, S., Lund, Ch.: Ocena ispytaniј na rastjaženie chрупkich
materialov.
In: Grafit kak vysokotemperaturnyj material. Moskva: Mir, 1964,
S. 174 - 184.
Übers. aus d. Engl.:
Bortz, S.A., Lund, H.H.: The Brittle Ring Test.
Proceedings of the Conference on Mechanical Properties of Engineering
Ceramics. Ed. by Kriegel and Palmour.
New York: Interscience, 1961.
125. Sedlachek R., Holden F. C. Method for Tensile Testing of Brittle Mate-
rials. — "Rev. Scient. Instr.", 1962, vol. 33, No 3, p. 298—300.
126. Wilshaw T. R. Measurement of Tensile Strength of Ceramics. — "J. Amer.
Ceram. Soc.", 1968, vol. 51, No 2, p. 111.
127. Abbot B. W., Cornish R. H. A Stress-Wave Technique for Tensile Testing of
Brittle Materials. — "Exp. Mechanics", 1965, No 1, p. 148—153.
136. Писаренко Г. С., Родичев Ю. И., Охрименко Г. М. К методике ис-
пытания стекла на одноосное сжатие. — «Проблемы прочности», 1973, № 10,
с. 17—22.
Pisarenko, G.S., Rodičev, Ju.I., Ochrimenko, G.M.: K metodike
ispytaniја stekla na jednoosnoe sžatie.
In: Problemy pročnosti. Kiev, 1973, Nr 10, S. 17 - 22.
Engl.: Method of testing glass in monoaxial compression.
In: Strength of materials. New York, 1973, Nr 10, S. 1177 - 1182.
137. Полешко Ю. П. К вопросу об испытании стекла на сжатие. — «Проблемы
прочности», 1975, № 12, с. 101—103.
Poleško, Ju.P.: K voprosu ob ispytanii stekla na sžatie.
In: Problemy pročnosti. Kiev, 1975, Nr 12, S. 101 - 103.
Engl.: The problem of testing glass in compression.
In: Strength of materials. New York, 1975, Nr 12, S. 1537 - 1539.

Stuttgart, den 19. November 1982

übersetzt von

Ottmar Pertschi
(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer