

нирования способствует деформационному упрочнению за счет создания высокой плотности высокоугловых специальных границ (двойниковых) и препятствует формированию разориентированной зеренно-субзеренной структуры с границами общего типа и, таким образом, способствует однородности структуры и микротвердости по образцу.

Список литературы

1. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Prog. Mater. Sci. 45, 103 (2000).
2. A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. Prog. in Mat. Sci. 53, 893 (2008).
3. V. Gavriljuk, H. Berns. High nitrogen steels. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (1999) 378 p.
4. T.-H. Lee, C.-S. Oh, S.-J. Kim, S. Takaki. Deformation twinning in high-nitrogen austenitic stainless steel. Acta Mater. 55 (2007) 3649–3662.

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

*А.Д. ПШЕНИЧНЫЙ^{1,2}, Н.Л. САВЧЕНКО^{1,2,3}, Т.Ю. САБЛИНА¹, И.Н. СЕВОСТЬЯНОВА¹,
С.Н. КУЛЬКОВ^{1,2,3}*

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: sevir@ispms.tsc.ru; adpshenichny@gmail.com

DEFORMATION AND FRACTURE OF POROUS CERAMICS FROM ALUMINUM OXIDE DIFFERENT SCHEMES OF LOADING

*A.D. PSHENICHNIY^{1,2}, N.L. SAVSHENKO^{1,2,3}, T.Y. SABLINA¹, I.N. SEVOSTYANOVA¹,
S.N. KULKOV^{1,2,3}*

¹Institute of Strength Physics and Materials Science

²Tomsk State University

³Tomsk Polytechnic University

E-mail: sevir@ispms.tsc.ru; adpshenichny@gmail.com

***Annotation.** This work investigates the behavior of porous alumina (within the porosity range of 18% to 70%) ceramics when subjected to deformation by compression and shearing. The analysis of strain-deformation curves showed that there was a transition from a typically brittle state for relatively dense ceramics, to a pseudo-plastic one with a high rate of porosity. The values of the effective elasticity modulus, effective shear modulus and Poisson's ratio decrease with an increase in volume in the pore space of ceramics, which correlates with the appearance of plural cracking during the deformation of ceramics with a high level of porosity.*

Введение. Высокопористые керамики находят широкое применение в различных областях техники и медицине, в частности в качестве заменителей костной ткани. Известно, что увеличение пористости хрупких материалов ведет к деградации их прочностных и упругих характеристик, таких как предел прочности при сжатии, модуль Юнга, модуль сдвига [1]. Исследование эволюции повреждений в объеме пористого хрупкого материала на разных масштабных уровнях и последующего

разрушения представляет значительный интерес с точки зрения иерархии структур деформации и разрушения в хрупких материалах [2].

Объектом изучения в настоящей работе является пористая керамика Al_2O_3 , с объемом порового пространства от 10 до 70%. Такой высокий уровень пористости в материале достигается за счет использования в качестве исходного материала порошка Al_2O_3 в виде микронных полых сфер с наноразмерным размером стенок.

Цель настоящей работы – изучение взаимосвязи между такими параметрами как пористость, предел прочности при сжатии, эффективными модулями Юнга, сдвига, измеренными в процессе механического нагружения при сжатии и сдвиге, и структурами разрушения и деформации в объеме керамики из оксида алюминия.

Материалы и методика проведения исследований. Керамику Al_2O_3 с разным значением пористости (10-70%) изготавливали из порошков Al_2O_3 , полученных методом плазмохимического синтеза. Спекание керамических образцов осуществляли на воздухе в диапазоне температур от 1000 до 1650°C с изотермической выдержкой 1 час. Плотность спеченных образцов измеряли геометрическим методом. Структуру образцов после спекания изучали методами оптической металлографии.

Образцы подвергали механическим испытаниям на сжатие и сдвиг на универсальной испытательной машине Instron- 1185 с записью кривой нагружения на диаграмную ленту, скорость нагружения $(2 - 3) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Эффективные модули упругости и сдвига определяли как тангенс угла наклона касательной к прямолинейному участку кривой зависимости « $\sigma - \varepsilon$ ». Для определения коэффициента Пуассона керамики ультразвуковым методом измеряли скорости прохождения в ней продольной и поперечной звуковых волн с использованием ультразвукового дефектоскопа на фазированной антенной решётке. Коэффициент Пуассона (μ), модуль Юнга (E) и модуль сдвига (G) вычисляли по следующим формулам:

$$\mu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2 \times (V_L^2 - V_T^2)} \quad (1)$$

$$E = V_L^2 \times \rho \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(\mu + 1)} \quad (3)$$

где V_L - скорость продольной волны, V_T - скорость поперечной волны, ρ - плотность материала.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Анализ кривых «напряжение-деформация» показал, что имеет место переход от типично хрупкого разрушения для относительно плотных образцов до псевдо-пластичного при высоком уровне пористости. При этом вид кривых « $\sigma - \varepsilon$ » и характер разрушения образцов зависит от объёма порового пространства. В керамике Al_2O_3 с пористостью 10-30 % деформационные кривые представляют собой линейные зависимости, вплоть до множественного разрушения материала, (рисунок 1а, кривая 1). Увеличение пористости более 30% приводит к отклонению от линейности перед разрушением (рисунок 1а, кривые 2,3).

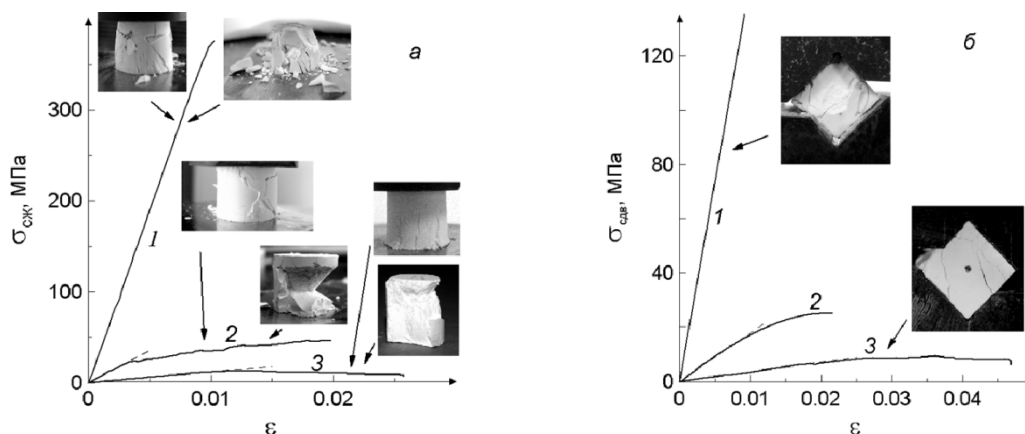


Рисунок 1 – Диаграммы “напряжение – деформация” и макрофотографии образцов Al_2O_3 , полученные после испытаний: (а) на сжатие для Al_2O_3 с пористостью: 20% (кривая 1), 50% (кривая 2) и 65 % (кривая 3); (б) на сдвиг для Al_2O_3 с пористостью: 20% (кривая 1), 50% (кривая 2), 70 % (кривая 3).

При испытаниях образцов с пористостью менее 30% на сдвиг в структуре появлялись магистральные трещины, расположенные под углом 45° к направлению приложенной нагрузки (рисунок 1,б). В образцах с пористостью выше 30 % процесс деформации не сопровождался появлением явно выраженной магистральной трещины вплоть до стадии окончательного разрушения.

В исследуемых интервалах пористости значения предела прочности при сжатии (рисунок 2,а), предела прочности при сдвиге (рисунок 2,б) а так же эффективные модули упругости и сдвига (рисунок 2,в) керамики уменьшаются с увеличением пористости. Как видно из рисунка 2,в с увеличением пористости происходит сближение абсолютных значений эффективных модулей упругости и сдвига, что говорит об уменьшении их значений.

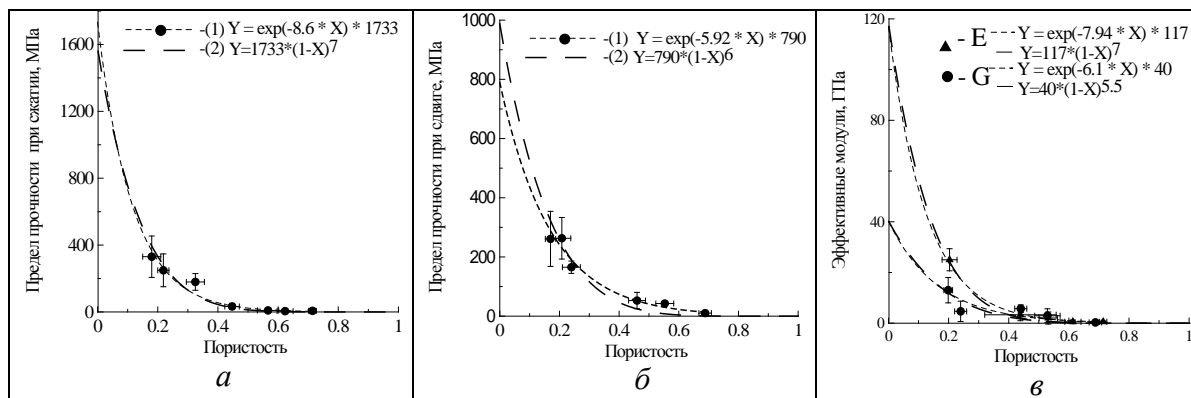


Рисунок 2 – Зависимость значений: (а) предела прочности при сжатии, (б) предела прочности при сдвиге, (в) эффективных модулей упругости (1) и сдвига (2) от объема порового пространства керамики из оксида алюминия

Определение коэффициента Пуассона посредством измерения скоростей звуковых волн показало, что с ростом объема порового пространства с 10 до 40% значения коэффициента Пуассона керамики уменьшаются с 0.23 до 0.15, рисунок 3,а. Значения модулей упругости и сдвига, рассчитанные в соответствии с формулами (2) и (3) так же как и значения эффективных модулей, измеренных при механических испытаниях, уменьшаются с ростом пористости (рисунок 3,б,в).

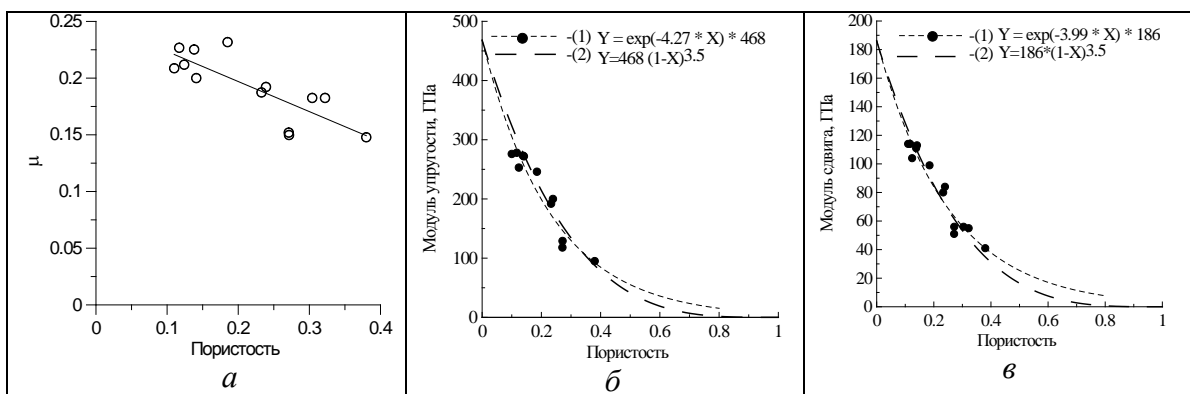


Рисунок 3 – Зависимость значений: (а) коэффициента Пуассона, (б) модуля упругости и (в) модуля сдвига, определенных с помощью ультразвукового метода, от объема порового пространства керамики Al_2O_3

С увеличением объёма пор в образцах керамики при испытаниях на сжатие изменяется характер накопленной деформации. Это приводит к смене схемы макроразрушения таким образом, что объём конусообразных зон разрушения по отношению ко всему образцу уменьшается, при этом трещины, приводящие к зарождению подобных зон, начинают распространяться не из углов образца, как обычно происходит в случае низкопористого материала, а в его объёме, в местах наибольшего скопления микротрещин. Схематичные изображение формирования зон разрушения и векторов действующих при сжатии сил для пористой керамики демонстрирующей хрупкое и квазипластичное поведение представлено на рисунке 4. Как следует из рассмотрения разложения векторов действующих сил при испытаниях на сжатие, рисунок 4,б,г, сила F_n действует по нормали к приложенной нагрузке, а сила F_{mp} пытается скомпенсировать силу, растягивающую образец при сжатии и направленную перпендикулярно F_n . При таком рассмотрении появление на боковых сторонах высокопористых образцов множества трещин, направленных преимущественно параллельно оси нагрузки обусловлено процессами обособления областей материала на периферии цилиндрического образца, на которые действуют в основном сила F_n (рисунок 4,г).

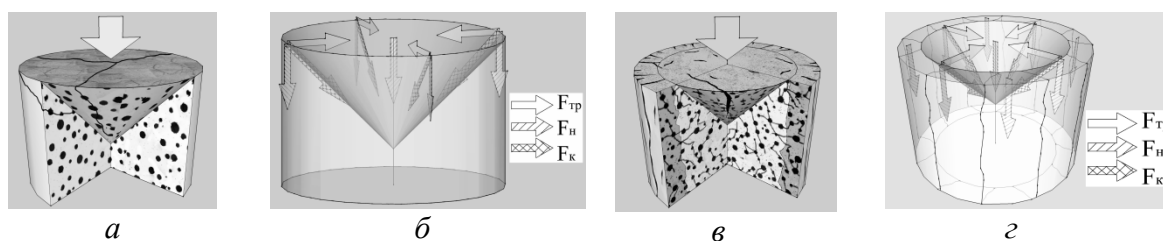


Рисунок 4 – Схематичные изображения формирования зон разрушения (а,в) и векторов действующих при сжатии сил (б,г) для пористой керамики демонстрирующей хрупкое (а,б) и квазипластичное (в,г) поведение

Заключение. Анализ кривых “напряжение-деформация” пористой керамики из оксида алюминия показал, что при деформации сжатием и сдвигом имеет место переход от типично хрупкого разрушения для относительно плотной керамики до псевдо-пластичного при её высоком уровне пористости, вследствие появления микротрещин при нагружении.

Значения предела прочности при сжатии, эффективных модулей упругости и сдвига, измеренных при сжатии, а также значения коэффициента Пуассона, измеренные неразрушающим ультразвуковым методом, уменьшаются с увеличением объёма порового пространства керамики Al_2O_3 .

Показано, что с ростом пористости в керамике Al_2O_3 , несмотря на проявление эффектов квазипластичности за счет возникающих множественных микротрещин, растет сопротивление сдвиговым напряжениям.

Список литературы

1. Ren F., Case E.D., Morrison A., Tafesse M., Baumann M.J. Baumann Resonant ultrasound spectroscopy measurement of Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio as a function of porosity for alumina and hydroxyapatite //Philosophical Magazine. -2009. -V. 89. -Т.14. -Р. 1163–1182.
2. Стефанов Ю.П. Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локализованного сдвига // Физ. мезомех. – 2010. - Спец выпуск 13. - С.44-52.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОН, соглашение №14.607.21.0069 - RFMEFI60714X0069.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Д.В. НОНЯК^{1,2}, А.А. БЕРДЫЧЕНКО², О.Л. ПЕРВУХИНА¹

¹ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,

²Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова

E-mail: nonyak@bk.ru

PECULIARITIES OF BOND FORMATION AT EXPLOSIVE WELDING OF LARGE BIMETALLIC BILLETS

D.V NONYAK^{1,2}, A.A BERDYCHENKO², O.L PERVUKHINA¹

¹Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS

²Polzunov Altai state technical university

E-mail: nonyak@bk.ru

Annotation. In this article, we present the results of a research of molten zones obtained in the course of explosive welding in the area of the connection of large bimetallic billet.

Сварка взрывом является универсальным способ изготовления биметаллических заготовок. Эта технология позволяет получать изделия с высокой прочностью соединения слоёв биметалла в различном сочетании с сохранением их свойств например, коррозионной стойкости. Метод сварки взрывом нашел применение при плакировании стали алюминием, титаном, цирконием, никелевыми сплавами и нержавеющей стали. Расширение области применения сварки взрывом в энергетической, атомной и химической промышленности требует повышения качества получаемых с её помощью сварных соединений. Особую актуальность вопрос каче-