

PACS: 83.10.Pp

Я.Е. Бейгельзимер, Г.Я. Акимов, Э.В. Чайка

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

Статья поступила в редакцию 11 октября 1999 года

Рассмотрен процесс холодного изостатического прессования порошков керамических материалов. Предложена модель процесса гидростатического уплотнения порошков на этапе образования однородного порошкового каркаса с крупными порами. С использованием представленной модели показано влияние коэффициента сдвигового сцепления K_0 и коэффициента внутреннего трения агрегата a на изменение пористости формовок, а также соотношение величин пористости порошкового каркаса Θ и межагрегатной пористости Θ_a в процессе набора давления. Показано, что, варьируя значения коэффициентов K_0 и a , посредством изменения технологии изготовления порошка мы можем регулировать величину рабочего давления, необходимого для достижения заданного значения пористости, и изменять вклад каждой составляющей (Θ и Θ_a) в общую пористость Θ_b .

Введение

На пути широкого использования в современной технике конструкционных керамических материалов лежит преодоление таких существенных недостатков керамики, как малая надежность и плохая воспроизводимость свойств, что связано с чувствительностью материала к дефектам. Поэтому для достижения высокой прочности и надежности изделий необходимо устранение возможности появления дефектов на всех стадиях производственного процесса.

Наряду с такими дефектами, как расслоение материала при прессовании, растрескивание при механической и термической обработке, несплошности, вызванные попавшими в материал примесями, обусловленными недостаточной отработкой технологии или несовершенством оборудования и оснастки, существуют дефекты, появление которых предопределено самой природой исходного материала (порошка) и технологией его переработки в компактные изделия. Такими дефектами являются поры, образующиеся в формовках при консолидации керамического порошка.

Исходные порошки представляют собой совокупность отдельных частиц или их агрегатов (гранул). Установлено [1], что форма и свойства агрегатов определяют плотность и прочность керамики. При этом прочность зависит от размеров крупных пор, образующихся в процессе получения гранул и сохраняющихся после формования заготовок.

В зависимости от технологии изготовления может изменяться размер частиц, степень их агрегирования и прочность образующихся агрегатов, а следовательно, и величина пор, распределение их по размерам.

Поэтому при прессовании сырых заготовок необходимо наряду с первичным формообразованием обеспечить создание структуры материала с максимально однород-

ными и минимальными по размеру порами, закрывающимися во время спекания. Для этих целей можно использовать холодное изостатическое прессование (ХИП).

В работе [2] установлено, что процесс ХИП керамических порошковых материалов носит стадийный характер, вызванный периодическим уплотнением и разрушением агрегатов частиц. Из этого следует, что увеличение давления прессования должно приводить к полному разрушению агрегатов и образованию однородного пористого материала без признаков агрегирования. Однако, как показывают исследования (см., напр., [3–4]), в структуре спеченного материала могут присутствовать отдельные крупные дефекты – несплошности (рис. 1). Это объясняется тем, что при прессовании на стыке нескольких агрегатов образуются поры, которые сохраняются даже при исчезновении границ агрегатов. Материал прессовки при этом представляет собой однородный порошковый каркас с отдельными крупными порами (рис. 2). Следовательно, с ростом давления прессования, начиная с некоторого момента, в процессе уплотнения принимает участие не система конгломератов, а вся совокупность отдельных неагрегированных частиц твердого вещества, содержащая в себе крупные поры.

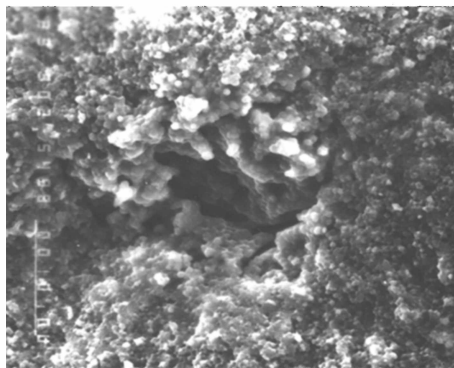


Рис. 1. Структура спеченной керамики $ZrO_2-4 \text{ mol.\% } Y_2O_3$ с межагломератной порой

Рис. 2. Структура прессовки порошка $ZrO_2-4 \text{ mol.\% } Y_2O_3$ с межагломератной порой

Такие поры могут сохраняться в материале готовых изделий даже при использовании очень высоких давлений при формовании и предельных температур при спекании. Керамика в данном случае характеризуется пористостью и неравномерностью микроструктуры, что ведет к снижению ее прочностных свойств. Особенно это свойственно материалам, получаемым из промышленных порошков [3].

Представляет интерес исследование процесса уплотнения порошкового тела с крупными порами, изучение механизмов, реализующих данный процесс, а также влияния свойств исходных порошков на уплотняемость.

Теория

Исследуем процесс гидростатического уплотнения керамического порошка, начиная с момента разрушения гранул и образования относительно крупных несплошностей. Для построения модели уплотнения примем аналогично работе [5], что предствительный объем пористого тела имеет вид сферического слоя. Такая модель достаточно хорошо отражает процесс гидростатического уплотнения пористого тела. В отличие от работы [5] будем считать, что сферический слой сам является пористым. Следовательно, мы приходим к задаче деформации шарового слоя из пористого материала под воздействием внешнего давления. Данная задача решена в [6,7].

В отличие от указанных работ используем для описания пористого слоя условие пластичности структурно-неоднородного пористого тела, предложенное авторами [8] и использованное нами в [2]. Применение этого условия пластичности обусловлено тем,

что шаровой слой является на самом деле не пористым, а порошковым.

Условие пластичности порошкового тела согласно [6] имеет вид

$$\frac{\sigma^2}{\psi(\Theta)} + \frac{\tau^2}{\varphi(\Theta)} = (1 - \Theta)(K_0 - \alpha\sigma)^2 \quad (1)$$

где $\psi(\Theta) = \frac{2}{3} \frac{(1 - \Theta)^3}{\Theta}$; $\varphi(\Theta) = (1 - \Theta)^2$; Θ – пористость порошкового каркаса; K_0 – коэффициент сдвигового сцепления; α – коэффициент внутреннего трения агрегата.

Из ассоциированного закона пластического течения пористого тела и условия пластичности (1) следует:

$$\tau = \frac{\gamma}{e} \varphi(\Theta) \left[\frac{\sigma}{\psi(\Theta)} + \alpha(1 - \Theta)(K_0 - \alpha\sigma) \right] \quad (2)$$

Согласно [6] для шарового слоя имеем

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_r + 2\sigma_\varphi), \quad (3)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{2}{3}} |\sigma_r - \sigma_\varphi| \quad (4)$$

Из уравнения неразрывности –

$$e_r = \frac{1}{3}e - 2\frac{D}{r^3}; \quad e_\varphi = \frac{1}{3}e + \frac{D}{r^3}; \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} |e_r - e_\varphi|; \quad (6)$$

$$V_r = \frac{1}{3}er + \frac{D}{r^2}, \quad (7)$$

где e_r, e_φ – компоненты тензора скоростей деформации; γ – скорость формоизменения;

D – параметр интегрирования; $e = \frac{1}{1 - \Theta} \frac{d\Theta}{dt}$ – скорость относительного уплотнения [6].

К указанным уравнениям необходимо добавить уравнение равновесия, которое в случае сферической симметрии имеет вид

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2\frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (8)$$

Граничное условие $\sigma_r = 0$ при $r = a$, где a – внутренний радиус пористого сферического слоя. Для дальнейших расчетов примем также, что b – внешний радиус сферического слоя. Тогда (3), (4), (6) преобразуем к виду

$$\sigma = \frac{2}{3}\sigma_\varphi, \quad \tau = -\sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_\varphi, \quad \gamma = -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{3D}{a^3}. \quad (9)$$

Записанная группа уравнений позволяет исследовать зависимость a, b и пористости шарового слоя от величины внешнего давления P . Для получения этих зависимостей выполним следующие подстановки.

Для того чтобы определить D , подставим (9) в (1), (2). Из уравнения (1) следует

$$K_0 - \frac{2}{3}\alpha\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{2}{3(1 - \Theta)}} \sigma_\varphi^2 \left(\frac{2}{3\psi(\Theta)} + \frac{1}{\varphi(\Theta)} \right), \quad (10)$$

а из уравнения (2) –

$$\sigma_{\varphi} = \frac{3D}{ea^3} \varphi(\Theta) \left[\frac{2\sigma}{3\psi(\Theta)} + \alpha(1-\Theta) \left(K_0 - \frac{2}{3} \alpha \sigma_{\varphi} \right) \right]. \quad (11)$$

Подставляя (10) в (11), находим, что

$$D = \frac{ea^3}{2} \frac{\psi(\Theta)}{\varphi(\Theta)} \frac{1}{1-\alpha\chi(\Theta)}, \quad (12)$$

где

$$\chi(\Theta) = \psi(\Theta) \sqrt{(1-\Theta) \left(\frac{1}{\psi(\Theta)} + \frac{3}{2} \frac{1}{\varphi(\Theta)} \right)} \quad (13)$$

Теперь определим значение σ_r . Из (2), (4) и (6) следует

$$\sigma_{\varphi} - \sigma_r = \frac{e_{\varphi} - e_r}{e} \varphi(\Theta) \left[\frac{\sigma}{\psi(\Theta)} + \alpha(1-\Theta)(K_0 - \alpha\sigma) \right],$$

где, учитывая (5) и (12),

$$e_{\varphi} - e_r = \frac{3}{2} \frac{ea^3}{r^3} \frac{\psi(\Theta)}{\varphi(\Theta)} \frac{1}{1-\alpha\chi(\Theta)}.$$

Тогда

$$\sigma_{\varphi} - \sigma_r = \frac{3}{2} \frac{a^3}{r^3} \frac{\psi(\Theta)}{1-\alpha\chi(\Theta)} \left[\sigma \left(\frac{1}{\psi(\Theta)} - \alpha^2(1-\Theta) \right) + K_0\alpha(1-\Theta) \right]$$

или

$$\sigma_{\varphi} - \sigma_r = G(\Theta) [\Phi(\Theta)\sigma + K_0\alpha(1-\Theta)], \quad (14)$$

где $G(\Theta) = \frac{3}{2} \frac{a^3}{r^3} \frac{\psi(\Theta)}{1-\alpha\chi(\Theta)}$; $\Phi(\Theta) = \frac{1}{\psi(\Theta)} - \alpha^2(1-\Theta)$.

Подставляя (3) в (14) и выполняя преобразования, получаем

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sigma_r \left(1 + \frac{1}{3} G(\Theta) \Phi(\Theta) \right) + K_0 \alpha (1-\Theta) G(\Theta)}{1 - \frac{2}{3} G(\Theta) \Phi(\Theta)}$$

С учетом этого уравнение равновесия (8) запишется как

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2}{r} \left(\sigma_r \frac{G(\Theta)\Phi(\Theta)}{1 - \frac{2}{3} G(\Theta)\Phi(\Theta)} + \frac{K_0\alpha(1-\Theta)G(\Theta)}{1 - \frac{2}{3} G(\Theta)\Phi(\Theta)} \right) = 0$$

или

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2}{r} A(r, \Theta) \sigma_r = \frac{2}{r} B(r, \Theta), \quad (15)$$

где $A(r, \Theta) = \frac{G(\Theta)\Phi(\Theta)}{1 - \frac{2}{3} G(\Theta)\Phi(\Theta)}$; $B(r, \Theta) = \frac{K_0\alpha(1-\Theta)G(\Theta)}{1 - \frac{2}{3} G(\Theta)\Phi(\Theta)}$.

Из уравнений (7), (12) следует

$$\frac{dr}{d\Theta} = \frac{1}{1-\Theta} \left(\frac{r}{3} + \frac{a^3}{2r^2} \frac{\psi(\Theta)}{\varphi(\Theta)} \frac{1}{1-\alpha\chi(\Theta)} \right),$$

откуда

$$\frac{da}{d\Theta} = \frac{1}{1-\Theta} \left(\frac{a}{3} + \frac{a}{2} \frac{\psi(\Theta)}{\varphi(\Theta)} \frac{1}{1-\alpha\chi(\Theta)} \right), \quad (16)$$

$$\frac{db}{d\Theta} = \frac{1}{1-\Theta} \left(\frac{b}{3} + \frac{a^3}{2b^2} \frac{\psi(\Theta)}{\varphi(\Theta)} \frac{1}{1-\alpha\chi(\Theta)} \right). \quad (17)$$

При $\alpha=0$ система уравнений (16), (17) сводится к решению задачи, полученной в работе [6]. Эту систему уравнений решаем численно следующим образом. Принимаем Θ в качестве параметра. Если $\Theta = \Theta_0$, начальные значения радиусов сферического слоя $a = a_0$, $b = b_0$. При разных Θ получаем значения a и b из уравнений (16), (17), решаем (15) с граничным условием $\sigma_r = 0$ при $r = a$ и получаем давление на наружной поверхности шарового слоя. Таким образом, имеем: $a = f(\Theta)$, $b = f(\Theta)$, $P = f(\Theta)$ где $P = -\sigma_r$. Эти зависимости легко перестроить в виде $a = f(P)$, $b = f(P)$, $\Theta = f(P)$. Наряду с пористостью шарового слоя введем пористость крупных пор Θ_a . Согласно [5] она равна a^3/b^3 . Легко показать, что полная пористость составляет $\Theta_b = \Theta + \Theta_a - \Theta\Theta_a$

Результаты

Результаты расчетов представлены на рис. 3, где даны зависимости от рабочего давления P относительных значений пористости порошкового каркаса Θ , межаггатной пористости Θ_a , общей пористости Θ_b (рис. 3,а), а также наружного b и внутреннего a радиусов рассматриваемого сферического слоя (рис. 3,б). Из теории следует, что коэффициент сдвигового сцепления K_0 , характеризующий прочность порошкового материала при $P = 0$, не оказывает влияния на вид кривых рассматриваемых зависимостей, а только определяет значения радиусов a , b и пористостей Θ_a , Θ_b , Θ при заданной величине P . Изменение K_0 приводит лишь к смещению влево или вправо кривых по оси P . В то же время коэффициент внутреннего трения α , характеризующий способность материала сопротивляться деформации с ростом давления прессования, оказывает влияние как на величины a , b и Θ_a , Θ_b , Θ , так и на соотношение этих величин, определяя ход кривых $a(P)$, $b(P)$, $\Theta_a(P)$, $\Theta_b(P)$, $\Theta(P)$. Поэтому приведенные зависимости рассчитаны при одном значении K_0 , равном 1.5 GPa, и значениях α , равных 0.5 и 1. Указанные величины соответствуют параметрам реальных порошковых материалов.

Как видно из графика (рис. 3,а), уменьшение α ведет к снижению пористости порошкового каркаса Θ во всем диапазоне используемых давлений прессования, что по-

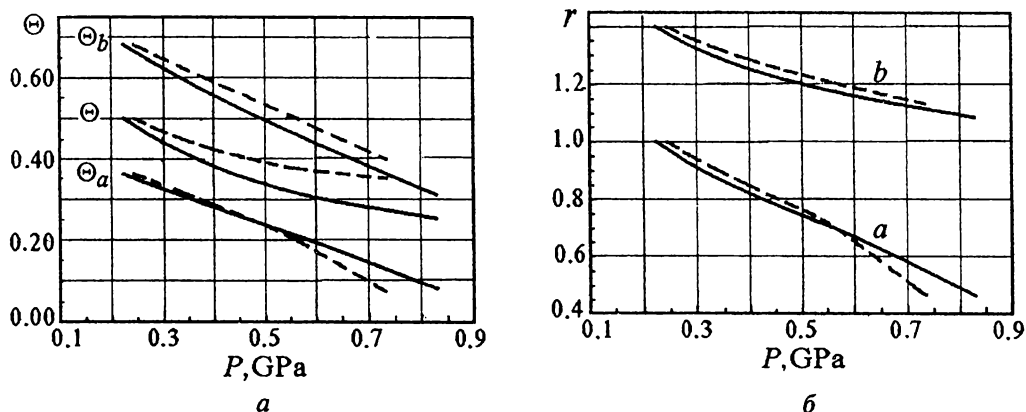


Рис. 3. Зависимость параметров сферического слоя Θ , Θ_a , Θ_b (а) и a , b (б) от рабочего давления P при разных значениях коэффициента α : — 0,5; ---- 1

нятно. Аналогично ведет себя и полная пористость Θ_b . Изменение зависимости пористости крупных пор Θ_a от давления с уменьшением α иное. Так, с ростом давления значения Θ_a для меньших α становятся выше значений Θ_a , соответствующих большим α . Это объясняется тем, что материал, характеризующийся меньшей величиной α , отличается большей способностью уплотняться за счет уменьшения пористости порошкового каркаса. Тогда как материал с большим значением α получает большую возможность уплотняться за счет продавливания частиц порошка в крупные поры.

Таким образом, при прессовании керамического порошка, начиная с момента разрушения гранул и появления относительно крупных несплошностей, уплотнение порошкового тела происходит в результате действия двух различных механизмов. Первый реализует уплотнение вследствие увеличения плотности порошкового каркаса, второй – в результате течения материала в крупные поры. Изменение α оказывает влияние на преобладание того или иного механизма уплотнения. Поскольку данный параметр является свойством порошка и зависит от технологии его изготовления [2], то, изменяя технологические режимы, мы можем добиваться оптимальной структуры порошкового компакта (соотношения пористости порошкового каркаса и межагрегатной пористости) при его прессовании.

Вывод

В процессе прессования керамических порошков можно выделить два этапа: 1) уплотнение порошкового тела в результате относительного проскальзывания и дробления агрегатов, 2) уплотнение однородного порошкового каркаса с крупными порами. На втором этапе уплотнение материала происходит в результате действия двух механизмов: увеличения плотности порошкового каркаса и течения материала в крупные поры. Влияние каждого из этих механизмов будет определяться величиной α .

Используя представленную модель второго этапа процесса гидростатического уплотнения порошков керамических материалов, мы можем оценить влияние коэффициента сдвигового сцепления K_0 и коэффициента внутреннего трения агрегата α на изменение пористости формовок в процессе набора давления. Варьируя значение коэффициента α , посредством изменения технологии изготовления порошка можно регулировать вклад каждой составляющей: пористости порошкового каркаса Θ и межагрегатной пористости Θ_a в общую пористость Θ_b . Изменение коэффициента K_0 в сторону уменьшения снижает величину рабочего давления, необходимого для достижения заданного значения пористости.

1. D.-W. Shin, D.-H. Yoon, C.-J. Kim, Y.-S. Chung, K.H. Auh, J. Ceram. Soc. Jap. **106**, № 1232, 363 (1998).
2. Г.Я. Акимов, Я.Е. Бейгельзимер, В.М. Тимченко, Э.В. Чайка, ФТВД **9**, № 2, 44 (1999).
3. Е.С. Лукин, Огнеупоры и техническая керамика № 1, 3 (1996).
4. Л.И. Подзорова, А.А. Ильичева, Н.А. Михайлина, О.И. Пенькова, Огнеупоры и техническая керамика № 7, 33 (1999).
5. Р.Дж. Грин, Механика № 4, 109 (1973).
6. М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др., Феноменологические теории прессования порошков, Наукова думка, Киев (1982).
7. Б.А. Друянов, Прикладная теория пластичности пористых тел, Машиностроение, Москва (1989).
8. Я.Е. Бейгельзимер, А.П. Гетманский, Л.И. Алистратов, Порошковая металлургия № 12, 11 (1986).

Ya.E. Beygelzimer, G.Ya. Akimov, E.V. Chayka

A MODEL OF HYDROSTATIC COMPACTION OF CERAMIC MATERIAL POWDERS

A process of cold isostatic extrusion of ceramic material powders is considered. A model is proposed for the process of hydrostatic compaction of powders at the stage of formation of homogeneous powder framework with coarse pores. The model has been used to show the influence of the coefficient of shear binding K_0 and coefficient of internal friction of the aggregate a on the change in the porosity of mouldings as well as on the ratio between powder framework porosity Θ and interaggregate porosity Θ_a when the pressure is built up. It is shown that by varying coefficients K_0 and a and changing the technology of powder preparation one can control the value of operating pressure, required for the achievement of preset porosity, and change the contribution of each component (Θ , Θ_a) to total porosity Θ_b .

Fig. 1. Structure of sintered ceramics ZrO_2 –4 mol.% Y_2O_3 with interagglomerate pore

Fig. 2. Structure of the ZrO_2 –4 mol.% Y_2O_3 powder compact with interagglomerate pore

Fig. 3. Dependence of the spherical layer Θ , Θ_a , Θ_b (a) and a , b (δ) parameters on operating pressure P at different values of coefficient α : — – 0.5; --- – 1