

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.762.4

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СООТНОШЕНИЯ ДАВЛЕНИЕ ПРЕССОВАНИЯ – ПЛОТНОСТЬ ПРИ УПЛОТНЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКА КВАРЦА

д-р техн. наук, доц. Е.Е. ПЕТЮШИК, А.А. ДРОБЫШ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

По предложенной расчетно-экспериментальной методике уточнена математическая модель деформирования малопластичных керамических порошков в составе сложной шихты в условиях радиального прессования, адаптированная к порошкам природного кварца. Установлены взаимосвязи давления прессования и плотности при радиальном прессовании труднодеформируемых керамических порошков в составе сложной многокомпонентной шихты. Определен диапазон применимости модели, экспериментально подтверждена ее адекватность и возможность повышения точности прогнозирования свойств получаемых в процессе обработки давлением пористых проницаемых изделий.

Предложенная модель ориентирована на порошки кварца с гранулометрическим составом до 630 мкм, имеющего наибольшее распространение в отечественных месторождениях.

Введение. Необходимость развития технологий получения пористых материалов и изделий обусловлена ростом требований к качеству реализации процессов фильтрации, тепло- и массообмена, катализа и др. При этом наряду с повышением эксплуатационных свойств проницаемых изделий из традиционных материалов остро ставятся задачи расширения круга используемых материалов для получения пористых изделий, направленные на снижение их стоимости с сохранением или ростом функциональных свойств. В этой связи заслуживают внимания отечественные сырьевые материалы на основе алюмосиликатов и силикатов, которые уже находят применение для производства пористых изделий [1, 2] и весьма перспективны. Вместе с тем недостаточная изученность основных механических и физико-химических процессов, происходящих на всех стадиях формирования пористых тел из такого рода керамических материалов, сдерживает и возможности прогнозирования свойств получаемых материалов, и возможности технологического управления ими. Поэтому исследования, ставящие целью уточнение конкретных условий протекания процессов консолидации дискретных структурообразующих элементов (СОЭ), в частности частиц порошка, в связные пористые тела, представляются актуальными.

Формирование свойств пористых изделий из уплотняемых материалов (УМ) осуществляется на всех технологических стадиях их производства, включающих следующие основные операции: подготовку шихты; формообразование заготовки; термическую обработку (спекание); дополнительную обработку (при необходимости).

Не умаляя значение любой из указанных операций, отметим, что основу структурных и физико-механических свойств пористых изделий закладывает процесс формообразования. Наиболее часто формообразование заготовок пористых изделий осуществляют в процессах обработки дискретных материалов давлением [3, 4], причем брак, полученный в процессе уплотнения, как правило, невозможно устранить проведением последующих технологических операций. Поэтому исследование процесса прессования требует учета особенностей материала уплотняемой заготовки.

Цель работы – установление взаимосвязи давления прессования и плотности при радиальном прессовании труднодеформируемых керамических порошков в составе сложной многокомпонентной шихты на примере порошков природного кварца.

Реологические предпосылки к разработке модели прессования труднодеформируемых малопластичных порошков на основе природного кварца. Процессы формообразования заготовок и изделий в процессах обработки материалов давлением в подавляющем большинстве случаев сопровождаются пластическим течением в объеме деформируемого материала или в его локальных областях. Это в полной мере относится и к процессам деформирования УМ, образованных совокупностью дискретных СОЭ. В общем случае пластическая деформация подразделяется на микро- и макропластическую. Микропластическая деформация, наблюдаемая у пластичных металлов и сплавов при напряжениях, на 4 порядка меньших их теоретической прочности, обусловлена движением дислокаций в отдельных микрообъемах зерен, а за истинный предел упругости материала принимается напряжение сдвига, при котором начина-

ет работать первый источник дислокаций [5]. По данным работы [6], в металлических и ионных кристаллах барьер для перемещения дислокаций в $10^3 \dots 10^4$ раз меньше энергии межатомной связи и преодолевается дислокациями при напряжении ($10^{-3} \dots 10^{-4}$) G , а в ковалентных (хрупких) кристаллах потенциальный барьер для движения дислокаций по порядку величины приближается к энергии химических связей.

При комнатной температуре кварц относят к абсолютно хрупким материалам [7]. Считается, что предел текучести кварца близок к пределу прочности, поэтому пластически деформироваться он может лишь при разрушающих напряжениях порядка 2 ГПа [8], при этом пластическую деформацию испытывает только тонкий слой кварца ($\ll 1$ мкм) [9] по берегам прорастающей трещины разрушения.

Характерная для порошков кварца равноосная форма частиц обуславливает, по терминологии М.Ю. Бальшина [10], жесткоподвижную связь между ними в процессе консолидации дискретного тела при его обработке давлением. В этой связи справедливо предполагать, что деформирование тела, образованного дискретными частицами кварца, может приводить лишь к разрушению этих частиц в результате контактного давления в точках соприкосновения частиц, величина которого обусловлена величиной внешнего технологического давления и размером первоначальной контактной площадки и соизмерима с напряжениями разрушения. Другими словами, попытка деформирования тела из частиц кварца с целью их консолидации должна привести к измельчению этих частиц, сопровождаемому структурной перестройкой дискретного тела, когда доминирующим процессом объемной деформации становится относительный сдвиг и поворот частиц с изменением размера и формы контактных площадок вплоть до их полного разрушения и образования новых. При этом в рамках одного цикла нагружения интенсивность измельчения частиц по мере своего развития с возрастанием внешнего давления затухает, прежде всего, за счет снижения концентрации напряжений на контактных площадках вследствие их переориентации и увеличения площади [11, 12].

При некоторой структурной перестройке существование дислокаций как в отдельных частицах, так и в кристаллитах, их составляющих, становится энергетически невыгодным. Дальнейшее увеличение внешнего давления не приведет ни к заметному росту плотности деформируемого макротела, ни к существенному уменьшению частиц порошка, поскольку достижение уровня напряжений в объеме заготовки, соизмеримых с пределом прочности кварца, технологически проблематично.

Тем не менее утверждение о том, что порошок кварца может лишь хрупко разрушаться и не подвержен пластическим деформациям, нельзя считать однозначно справедливым. Так, исследованиями [13] установлено, что в области малых деформаций ($\epsilon = 10^{-6}$) проявляются неупругие деформации у всех типов твердых тел (моно- и поликристаллов пластичных и хрупких материалов, аморфных твердых тел), сильно различающихся по своей природе и физико-механическим свойствам. В частности, испытывались образцы из плавленого кварца в виде пластинок с линейными размерами $70 \times 5 \times 3$ мм методом трехточечного изгиба при времени воздействия нагрузки на материал в начальной области деформирования 1...2 с (в области деформаций $\epsilon > 10^{-6}$; время воздействия – 10...15 с). Признаков ползучести материалов при проведении испытаний не наблюдалось. Зарегистрированы остаточные деформации уже при напряжениях 0,05...0,5 МПа в области деформаций $8 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-5}$, которая традиционно относится к упругой области [8, 14]. При этом в начальной области нагружения обнаружены только остаточные деформации в отсутствие упругого компонента. Напряжения, при которых зарегистрированы остаточные деформации, примерно на 6 порядков меньше их теоретической прочности на сдвиг (по порядку величины $\tau = G/15$; для кварца $G = 24 \dots 31,5$ ГПа), когда направление и плоскость скольжения составляют с направлением приложенной силы угол $\pi/4$ [15]; примерно на 4 порядка меньше предела текучести и их реальной прочности и на 2 порядка меньше напряжения микропластического течения металлов (стартового напряжения движения дислокаций). Установлено, что при повторном измерении значения напряжений, при которых достигалась на первом этапе ранее зарегистрированная величина остаточной деформации образцов, сдвигаются в более высокую область. Однако здесь говорить об упрочнении материала кварца, по-видимому, некорректно. Необходимость повышения напряжения при повторном испытании для достижения величины остаточной деформации, зафиксированной при первом нагружении, показывает, что при данном уровне напряжений способность материала к необратимому деформированию исчерпывается уже на первом этапе.

Автор работы [13] зарегистрированные остаточные деформации относит к особому виду неупругих деформаций – квазимикропластическим, а эффект квазимикропластичности – к фундаментальному свойству твердых тел, проявляющемуся у материалов с различной природой, кристаллической структурой, состоянием поверхности, вещественным и фазовым составом, степенью кристалличности, структурой химических связей. Безусловно, явление квазимикропластичности не становится основанием для утверждения о возможности пластического деформирования порошков кварца при формообразовании пористых тел, однако будет ему способствовать, так как диапазон давлений, в котором проявляется эффект квазимикропластичности, составляет начальную часть технологического диапазона прессования пористых проницаемых порошковых изделий. Тем более что опытами П.В. Бриджмена [16], Б.Д. Грозина [17] и др. было установлено, что такие хрупкие материалы, как граниты, базальты и твердые сплавы, в условиях

всестороннего неравномерного сжатия способны деформироваться как пластичные. Напряженное состояние материала частиц в окрестностях контактной области является объемным, всесторонним неравномерным напряжением сжатия. Поэтому для описания деформационных процессов при уплотнении кварцевого порошка могут быть использованы так называемые контактные модели, основанные на изучении контактного взаимодействия частиц дискретного УМ, развитые в трудах М.Ю. Бальшина [10], Г.М. Ждановича [18], Е.М. Макушка [19] и других ученых и являющиеся в настоящее время наиболее физически обоснованными.

Теоретические и экспериментальные исследования по уточнению контактной модели прессования труднодеформируемых порошков. Предварительно рассмотрим процесс уплотнения порошковых материалов без наполнителей. Здесь силовое контактное взаимодействие частиц осуществляется через контактные участки и их сопротивление контактной деформации осадки и сдвига определяет общее сопротивление деформации порошкового тела, устанавливающее зависимость плотности ϑ от давления прессования p . Такой процесс уплотнения для множества материалов весьма удовлетворительно описывается уравнением [20]:

$$p = p_k \frac{\vartheta^n - \vartheta_0^n}{1 - \vartheta_0^n}, \quad (1)$$

где ϑ – относительная плотность порошкового тела в рассматриваемый момент процесса уплотнения; ϑ_0 – начальная относительная плотность порошкового тела; p_k – критическая величина давления прессования, соответствующая максимальному уплотнению; n – показатель степени, постоянный в значительном интервале плотностей материала.

Формула (1) является удачным результатом попытки интерполяционного упрощения более сложной и общей зависимости давления от плотности [18]:

$$p = (1 + f_i \operatorname{tg} \varphi) \sigma_k \alpha_k, \quad (2)$$

где f_i – коэффициент межчастичного трения частиц порошкового тела в процессе уплотнения, или коэффициент относительного сопротивления сдвигу контактов:

$$f_i = \frac{\tau_k}{\sigma_k}, \quad (3)$$

здесь τ_k – сопротивление сдвигу контактов частиц порошкового тела, непосредственно связанное с величиной сопротивления осадки при линейном напряженном состоянии σ_n , которое является частной величиной предела текучести σ_T , с учетом упрочения; σ_k – среднее контактное давление на поверхности контакта при силовом контактном взаимодействии частиц порошкового тела в процессе уплотнения, причем

$$\sigma_k = \frac{\chi_1(\vartheta) \sigma_n}{1 - B \chi_1(\vartheta) \alpha_k}, \quad (4)$$

α_k – величина относительного контактного сечения порошкового тела в рассматриваемый момент процесса уплотнения:

$$\alpha_k = \vartheta^2 \cdot \frac{\ln \beta_0 \vartheta}{\ln \beta_0 \beta}, \quad (5)$$

здесь $\beta = \frac{1}{\vartheta}$ – относительный объем в рассматриваемый момент процесса уплотнения; $\chi_1(\vartheta)$ – функция, определяющая сопротивление пластической деформации материала частицы в окрестностях контактной зоны при моноконтактной схеме нагружения. При этом

$$\chi_1(\vartheta) = 1 + \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\ln \beta_0 \beta}{\ln \beta_0 \vartheta}} - 1 \right) \quad (6)$$

(φ – угол нормального контактного взаимодействия частиц; близок к $\pi/4$).

После преобразований формула (3) принимает вид:

$$f_i = f_0 (1 - B \chi_1(\vartheta) \alpha_k), \quad (7)$$

где f_0 – начальное значение величины коэффициента межчастичного трения, близкое к величине $\operatorname{tg} \beta_e$, когда β_e – угол естественного откоса. Для кварца $\beta_e = 41 \dots 48^\circ$ в зависимости от фракции порошка.

В формуле (2) σ_n является функцией величины приведенной деформации ξ_n , которая в свою очередь является функцией относительной плотности ϑ . Но для такого хрупкого материала, как кварц, величина σ_n может быть принята в первом приближении как постоянная, близкая к величине предела прочности σ_b . Величины f_i , $\chi_1(\vartheta)$, σ_k и α_k также являются определенными функциями плотности, экспериментальное определение которых проблематично, что затрудняет практическое использование формулы (2). Для практического применения достаточно удобна формула (1). Однако возникает вопрос определения значений показателя степени n и предельного напряжения сжатия p_k для кварца. Показатель степени в формуле (1) можно определить расчетным путем на базе использования формулы (2).

При расчете величины показателя степени n следует иметь в виду, что его величина в явном виде не зависит от гранулометрического состава порошковой смеси и формы частиц. Эти параметры определяют величину относительной плотности насыпки ϑ_0 , которая является основным исходным компонентом для расчета показателя степени n . Предварительно полагаем, что величина показателя степени n постоянна для весьма широкого нижнего диапазона давления прессования (плотности).

Интерполяционная формула (1) и основное уравнение уплотнения (2) дают одинаковые значения при $\vartheta = \vartheta_0$, $p = 0$ и при $\vartheta = 1$, $p = p_k$. Для того чтобы максимально приблизить формулу (1) к формуле (2), необходимо приравнять их при каком-то промежуточном значении плотности. Известно решение для принятой в качестве промежуточного значения среднеарифметической величины плотности [20]. Такой подход определяет положение промежуточной точки в верхнем диапазоне плотности пористых материалов. Поэтому может давать значительные погрешности в области низких значений плотности, имеющих для пористого материала преимущественное значение. Используем в качестве промежуточного значения среднестатистическое значение плотности:

$$\vartheta_c = \sqrt{1 - \vartheta_0} \approx \sqrt{\vartheta_0}.$$

Формулы (1) и (2) могут быть записаны в следующем виде:

$$p = p_k \varphi(\vartheta), \tag{8}$$

где

$$\varphi(\vartheta) = \frac{\vartheta^n - \vartheta_0^n}{1 - \vartheta_0^n} = (1 + f_i t g \varphi) \cdot \frac{\sigma_k}{p_k} \alpha_k. \tag{9}$$

Среднее значение функции $\varphi(\vartheta) = \varphi(\vartheta_c) = \varphi(\sqrt{\vartheta_0})$ будет равно

$$\varphi(\vartheta_c) = \frac{\vartheta_0^{n/2} - \vartheta_0^n}{1 - \vartheta_0^n} = \frac{\vartheta_0^{n/2} (1 - \vartheta_0^{n/2})}{1 - \vartheta_0^n} = \frac{\vartheta_0^{n/2}}{1 - \vartheta_0^{n/2}} = \frac{1}{\beta^{n/2} + 1}. \tag{10}$$

Решая выражение (10) относительно искомой величины показателя степени n , получим:

$$n = \frac{2 \ln((1 - \varphi(\vartheta_c)) / \varphi(\vartheta_c))}{\ln \beta_0}. \tag{11}$$

Значение функции $\varphi(\vartheta_c)$ теперь следует определять из второго уравнения (9):

$$\varphi(\vartheta_c) = (1 + f_{ic} t g \varphi) \frac{\sigma_{kc}}{p_k} \alpha_{kc}, \tag{12}$$

где f_{ic} , σ_{kc} и α_{kc} – средние значения коэффициента внутреннего трения, среднего контактного давления и средней величины относительного контактного сечения соответственно.

Величина коэффициента f_i определяется по формуле из [20]. Среднее значение f_{ic} будет равно:

$$f_{ic} = f_0 (1 - B \chi_1(\vartheta_c) \alpha_{kc}). \tag{13}$$

Процесс упрочнения для кварца отсутствует, поэтому величина приведенного напряжения σ_n принимается равной пределу прочности σ_b . Тогда величина контактного давления

$$\sigma_k = \frac{\chi_1(\vartheta) \sigma_n}{1 - B \chi_1(\vartheta) \alpha_k} = \frac{\chi_1(\vartheta) \sigma_b}{1 - B \chi_1(\vartheta) \alpha_k}. \tag{14}$$

При $\vartheta = 1$, $\sigma_k = \sigma_{kk}$

$$\sigma_k = \frac{\chi_1(\vartheta) \sigma_b}{1 - B \chi_1(\vartheta) \alpha_k} = \frac{\sigma_b}{1 - B}. \tag{15}$$

Рассматривая совместно выражения (2) и (15) в случае $\vartheta = 1, f_i = f_{ic}, p = p_k$, находим:

$$p_k = (1 + f_k tg \varphi) \sigma_{kk} = (1 + f_k tg \varphi) \frac{\sigma_b}{1 - B}. \tag{16}$$

Из уравнения (16) определяем значение коэффициента B :

$$B = 1 - (1 + f_k tg \varphi) \frac{\sigma_b}{p_k}. \tag{17}$$

Полагаем, что

$$p_k \approx (1 + \pi) \sigma_b. \tag{18}$$

Запишем значение выражения (17) в следующем виде:

$$B = 1 - \frac{1 + f_k tg \varphi}{1 + \pi}. \tag{19}$$

В формуле (19) угол φ близок к значению $\pi/4$, поэтому выражение (19) принимает вид:

$$B = 1 - \frac{1 + f_k}{1 + \pi} = \frac{\pi - f_k}{\pi + 1}. \tag{20}$$

Граничные значения функции $\chi_1(\vartheta)$ вида (6) равны:

$$\chi_1(\vartheta_0) = 1 + \frac{\pi}{2}; \chi_1(1) = 1. \tag{21}$$

Среднее значение функции $\chi_1(\vartheta)$ будет равно:

$$\chi_1(\vartheta_c) = 1 + \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\ln \beta_0 \sqrt{\beta_0}}{\ln \beta_0 \sqrt{\vartheta_0}}} - 1 \right) = 1 + \operatorname{arctg}(\sqrt{7} - 1) = 1,632924. \tag{22}$$

Величину (критическую) коэффициента внутреннего трения f_k при $\vartheta = 1$ определяем из выражения (7), в котором следует положить $\chi_1(1) = 1, \alpha_k = 1, f_i = f_k$:

$$f_k = f_0(1 - B). \tag{23}$$

Рассматривая совместно выражения (20) и (23), находим:

$$f_k = f_0 \left(1 - \frac{\pi - f_k}{\pi + 1} \right) = f_0 \frac{1 - f_k}{\pi + 1}. \tag{24}$$

Решая выражение (24) относительно величины f_k , получим:

$$f_k = \frac{f_0}{\pi + 1 + f_0}. \tag{25}$$

Рассматривая совместно выражение (20) и (25), находим:

$$B = \frac{\pi(\pi + 1 + f_0)}{(\pi + 1)(\pi + 1 + f_0)}. \tag{26}$$

Средняя величина контактного сечения α_{kc} в соответствии с формулой (5) будет равна:

$$\alpha_{kc} = (\sqrt{\vartheta_0})^2 \frac{\ln \beta_0 \sqrt{\vartheta_0}}{\ln \beta_0 \sqrt{\beta_0}} = \frac{1}{3} \vartheta_0. \tag{27}$$

По формуле (14) определяем среднее значение величины контактного давления:

$$\sigma_{kc} = \frac{\chi_1(\vartheta_c) \sigma_b}{1 - B \chi_1(\vartheta_c) \alpha_{kc}} = \frac{1,631914 \cdot \sigma_b}{1 - B \cdot 1,631915 \cdot \frac{1}{3} \vartheta_0}. \tag{28}$$

Тогда исходя из формулы (7) среднее значение коэффициента внутреннего трения

$$f_{ic} = f_0(1 - B \cdot 1,631914 \cdot \frac{1}{3} \vartheta_0). \tag{29}$$

Для определения явного вида зависимости (1) применительно к деформированию дискретных тел из порошка кварца природного (ГОСТ 22551-77) с использованием полученных выражений проведен расчет показателя степени n и значения p_k (экспериментально установленные исходные данные приведены в таблице 1). Значение предела прочности материала кварца (σ_b) принято равным 450 МПа [21].

Таблица 1

Исходные физические данные к расчету $p = f(\vartheta)$

Фракция, мкм	ϑ_0 SiO ₂	ϑ_0 шихты	β_e SiO ₂	β_e шихты
315...630	0,607	0,62	41	40
200...315	0,621	0,60	45	44
< 200	0,631	0,55	48	46

Например, для порошка кварца фракции 0,2...0,315 мкм получены следующие результаты расчета: начальный относительный объем порошкового тела $\beta_0 = 1,96$; угол нормального контактного взаимодействия частиц $\varphi = 45^\circ$ [20]; $B = 0,758$ (формула (26)); $f_{ic} = 0,734$ (формула (29)); $\sigma_{kc} = 988,37$ (формула (28)); $p_k = 1863$ (формула (18)); $\alpha_{kc} = 0,207$ (формула (27)); $\varphi(\vartheta_c) = 0,1914$ (формула (12)); $n = 6,05$ (формула (11)).

Таким образом, формула (1) принимает для рассматриваемого порошка вид:

$$p = 1863 \cdot \frac{\vartheta^{6,05} - \vartheta_0^{6,05}}{1 - \vartheta_0^{6,05}}, \text{ МПа.} \tag{30}$$

Верификация полученной формулы (30) производилась сравнением расчетных значений плотности деформируемого порошка кварца с результатами экспериментального исследования (рис. 1).

Поскольку порошок кварца не обладает формуемостью без применения вспомогательных материалов, провести непосредственные измерения значений плотности (пористости) образцов, полученных при различном давлении, не представляется возможным. Уплотнение порошка кварца, рассеянного по фракциям 315...630, 200...315 и 200 мкм, осуществляли в условиях одноосного нагружения с фиксацией перемещения пуансона пресс-формы как исходной величины для расчета кажущейся плотности уплотняемого порошкового макротела [11, 12].

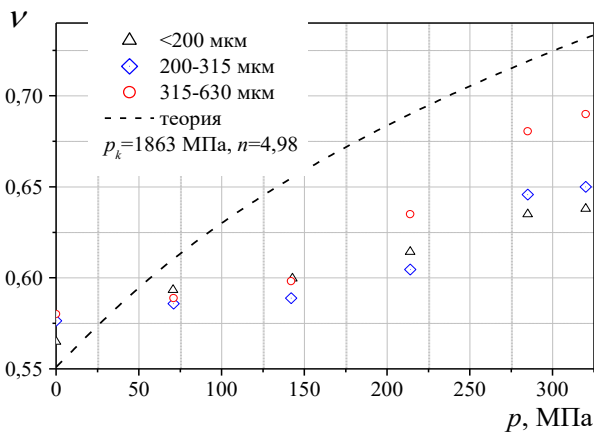


Рис. 1. Зависимость относительной плотности уплотняемого тела из порошка кварца от давления прессования

Очевидно, что полученные по формуле (30) расчетные данные не подтверждаются результатами экспериментов с достаточной для практики точностью (погрешность составляет до 15 % и более), причем характер расчетной кривой не вполне соответствует характеру экспериментальных зависимостей. Практически для различных фракций порошка кварца наблюдается немонотонная зависимость плотности уплотняемого материала от давления прессования. Вариантом объяснения наличия участков экспериментальной зависимости, где $d\vartheta/dp$ близко к нулю (диапазон давлений 60...130

МПа), является гипотеза о циклической структурной переукладке частиц порошка в процессе деформирования, основанная на информации о том, что частицы порошка кварца не способны к значительным пластическим деформациям [8, 13]. Эта гипотеза подтверждается результатами специальных экспериментальных исследований [11], выявивших существование циклической деструкции частиц порошка при деформировании дискретного УМ, сопровождающейся изменением их размера и формы.

Исходя из проведенного сравнения расчетных и экспериментальных данных, можно констатировать следующее. Во-первых, для порошков с ограниченным ресурсом пластичности, к которым, безусловно, относятся порошки природного кварца, в принятой математической модели (1) невозможно определить показатель степени n в широком диапазоне давлений прессования (плотности). То есть нуж-

но сужать диапазон применимости уравнений (1), (30) для конкретных технологических параметров деформационной обработки, или, что то же самое, для определенного диапазона плотности. Во-вторых, характер экспериментальных зависимостей дает основания для предположения о том, что для принятой математической модели (1) $n \neq const$ даже в узком диапазоне давления прессования (плотности). В-третьих, изложенный теоретический подход не в состоянии обеспечить достоверное определение величины показателя степени n в силу того, что, к сожалению, имеющиеся в распоряжении исследователя показатели физико-механических характеристик материала порошка (практически любого порошка) далеко не всегда соответствуют истинным. Последнее обстоятельство принципиально. Ситуация осложняется тем, что порошок кварца в чистом виде практически не поддается формованию в пористые тела.

Основываясь на практическом опыте многих исследователей в области порошковой металлургии и композиционных материалов, можно утверждать, что большинство материалов с ограниченным ресурсом пластичности подвергаются уплотнению в составе смесей, т.е. при наличии каких-либо дополнительных компонентов: связующих, пластифицирующих, порообразующих и др. В полной мере это касается и порошка кварца [22]. В силу многокомпонентности прессуемых составов, значительного множества соотношений компонентов, принципиально различных и не всегда известных реологических свойств составляющих, которые к тому же зачастую не имеют стабильных механических характеристик за пределами поставляемой партии, аналитический расчет значений показателя степени n и предельного напряжения сжатия p_k для сложных смесей практически реализован быть не может. Порошковое тело, состоящее из кварцевого порошка с наполнителем, представляет собой дискретную среду с принципиально различными условиями контактного силового взаимодействия частиц. Здесь кроме силового контактного взаимодействия частиц кварца имеет место силовое взаимодействие частиц кварца и наполнителя, которое постепенно приближает напряженное состояние в окрестностях контактных областей частиц кварца к гидростатическому, что способствует увеличению сопротивления порошкового тела уплотнению.

Практически важной и методологически значимой для широкого класса порошковых материалов с ограниченным ресурсом пластичности является разработка *методики* определения коэффициентов в принятой математической модели, позволяющей определить область применимости модели и обеспечить максимальную адекватность модели деформационным процессам, реализующимся при уплотнении конкретного материала в достаточно широком интервале его технологических характеристик: например, гранулометрического состава основного компонента.

Воспользуемся расчетно-экспериментальным методом оценки соотношения давление прессования – плотность при уплотнении пластифицированной массы на основе кварца. В работах [11, 12] показано, что при получении пористых проницаемых материалов на основе кварца целесообразно использовать давление прессования в интервале 40...80 МПа. Поэтому примем для определения коэффициента n в принятой математической модели диапазон давлений, несколько шире указанного: 40...110 МПа. В таком диапазоне давлений способом сухого радиального прессования [23] были изготовлены образцы прессовок из шихты [22] на основе кварца природного (ГОСТ 22551-77) в форме труб с размерами: $\varnothing 50 \times 40$ мм, длина до 600 мм. Спеченные пористые проницаемые изделия получали спеканием прессовок в окислительной среде при температуре 850 °С (рис. 2). Пористость (плотность) образцов определялись по ГОСТ 18898-73. Результаты экспериментально установленных значений плотности прессовок и спеченных изделий в зависимости от давления прессования приведены в таблице 2.



Рис. 2. Вид пористой трубы на основе кварца

Таблица 2

Значения плотности пористых труб в зависимости от давления прессования и гранулометрического состава основного компонента шихты (порошка кварца)

p , МПа	Фракции кварца, мкм					
	> 200		200...315		315...630	
	ϱ спеч.	ϱ прес.	ϱ спеч.	ϱ прес.	ϱ спеч.	ϱ прес.
40	0,613	0,680	0,610	0,720	0,695	0,740
60	0,628	0,760	0,630	0,812	0,701	0,790
75	0,640	0,800	0,642	0,839	0,710	0,800
90	0,654	0,822	0,650	0,859	0,723	0,840
100	0,660	0,830	0,670	0,860	0,742	0,852
110	0,670	0,840	0,675	0,870	0,750	0,853

Далее выполним следующие действия. Принимая в качестве базовой зависимости плотности прессовки от давления прессования выражение (1), определим для величины p_k , относящейся к материалу основного компонента шихты, величину показателя степени n , решая уравнение (1) относительно n численными методами для полученных экспериментально фиксированных точек $p = f(\vartheta)$. Результаты такого расчета иллюстрирует рисунок 3.

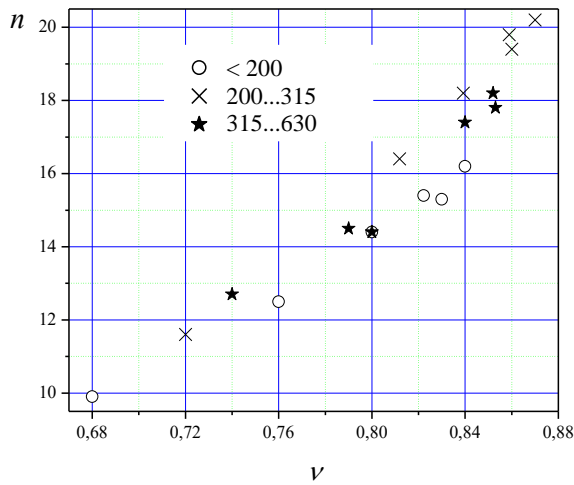


Рис. 3. Расчетные зависимости показателя степени n от плотности прессовок из сложной шихты

Заметно, что по мере возрастания плотности прессовки значение n увеличивается, причем увеличивается по закономерности, близкой к линейной, что дает основания для поиска функции $n = f(\vartheta)$ в виде:

$$n = k\vartheta + t, \quad (31)$$

где k и t – коэффициенты аппроксимации.

Зависимость же величины показателя степени n от размера фракции достаточно слабая в рабочем диапазоне плотности прессовок. Однако она существует и выражается преимущественно в изменении угла наклона функции $n = f(\vartheta)$ по отношению к оси абсцисс. Особенность этой зависимости состоит в ее нелинейном характере: существует максимум k при средних значениях размера частиц основного компонента шихты.

Физическое различие в составах шихты в зависимости от гранулометрического состава основного компонента состоит в разной количественной доле частиц основного компонента в единице объема для любой одинаковой плотности прессовки. Следствием этого является различное число контактов, приходящихся на одну частицу в рассматриваемый момент уплотнения:

$$K_\alpha = K\vartheta, \quad (32)$$

где K – число контактов, приходящихся на одну частицу при $\vartheta = 1$.

Для шихты сложного состава при расчете ϑ следует учитывать только объем твердой фазы кварца. Расчет числа контактов K_α для порошка кварца различного гранулометрического состава, спрессованного в составе сложной шихты при различной объемной доле кварца (от 20 до 50 %) в принятом диапазоне давлений осуществляли по формуле [24]:

$$K_\alpha = \frac{(\Pi + 3) + \sqrt{\Pi^2 - 10\Pi + 9}}{2\Pi}, \quad (33)$$

где Π – пористость материала, отнесенная лишь к порошку кварца.

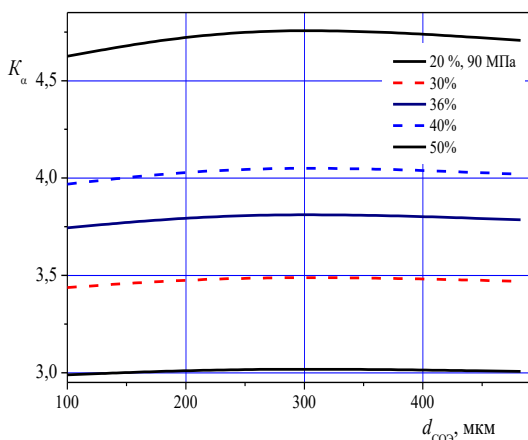


Рис. 4. Зависимость числа контактов одной частицы основного компонента шихты от гранулометрического состава в прессовке

Было установлено, что величина K_α изменяется в пределах 2,84...4,85 и возрастает с увеличением давления прессования и ростом объемной доли кварца в шихте, что вполне логично.

Анализ зависимости K_α от гранулометрического состава порошка кварца показал, что K_α также как и k стабильно имеет максимум в интервале средних значений размера частиц кварца (рис. 4). Это может объясняться тем, что, как показано в работе [11], механическая деструкция частиц кварца при их деформировании происходит наиболее активно среди частиц среднего размера, причем при деформировании в составе шихты в этом случае образуется наибольшее количество частиц соизмеримых размеров.

Исходя из сказанного, значения коэффициентов аппроксимации k и t уравнения (31) целесообразно определять как функции некоего параметра, который одновременно оказывает влияние и на изменение кинетики контактообразования при деформировании шихты

на основе кварца, и на силовые показатели процесса прессования. В качестве такого параметра примем величину насыпной плотности шихты ϑ_0 , поскольку она интегрально отражает и гранулометрический состав основного компонента шихты, и его массовую долю в объеме шихты. Кроме того, $n = f(\vartheta_0)$, что очевидно

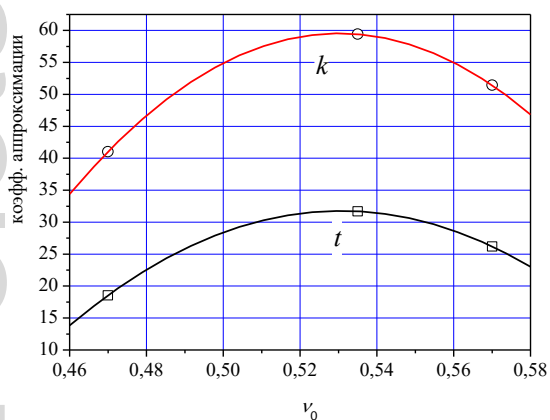


Рис. 5. Вид зависимостей коэффициентов аппроксимации от насыпной плотности шихты

Математическая модель прессования сложной шихты на основе кварца, таким образом, может быть представлена формулой (1), где показатель степени n определяется нелинейным уравнением (36).

Оценим достоверность полученной модели сравнением расчетных данных с экспериментальными (рис. 6) в принятом технологическом диапазоне давлений. Заметно, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными (погрешность расчета относительной плотности не превышает 3 %).

Заключение. Модели прессования порошковых материалов, хорошо подтверждающиеся экспериментально для большинства порошков металлов и сплавов, не могут быть напрямую использованы для описания деформационных процессов в уплотняемых дискретных телах из труднодеформируемых керамических порошков и требуют уточнения. Кроме того, наличие наполнителей в составе шихты по мере возрастания плотности приводит к изменению деформационного механизма уплотнения порошкового тела. Наполнитель, являясь пластифицированной массой с незначительной сжимаемостью, затрудняет объемную деформацию уплотняемого дискретного тела по двум основным причинам:

- во-первых, с ростом плотности наполнитель воспринимает все большую долю общей нагрузки, при этом имеет место рост сопротивлению движения массы наполнителя через поры и уменьшается возможность сдвига контактов частиц кварца, без которого невозможен рост плотности порошкового тела, поскольку статический коэффициент сопротивления сдвигу контактов существенно больше кинетического;

- во-вторых, условия нагружения частиц кварца приближаются к гидростатическому сжатию, что снижает напряжения сдвига по плоскостям дефектного строения кристаллов, затрудняя их разрушение и переориентацию. Поэтому модель деформирования малопластичных керамических порошков в составе сложной шихты целесообразно адаптировать к конкретной группе материалов, имеющих сходные реологические свойства, а повышение достоверности модели может быть обеспечена за счет использования при ее разработке физически обоснованных параметров, подлежащих экспериментальному определению.

Увеличение давления прессования сложной шихты на основе кварца за пределы 90 МПа не приводит к практически значимому для пористых проницаемых материалов росту плотности. Поэтому моделирование целесообразно проводить для принятого технологического диапазона.

Предложенная расчетно-экспериментальная методика позволила уточнить контактную модель уплотнения дискретных сред Г.М. Ждановича [20] для порошка природного кварца в составе сложной

но из выражений (11), (12), (26) – (29).

Зависимость коэффициентов аппроксимации k и t от начальной плотности шихты ϑ_0 имеет характер, близкий к параболическому (рис. 5).

Аппроксимацией полиномом 2-й степени установлены следующие зависимости:

$$k = -5084,83 + 17484,24\vartheta_0 - 14842,99\vartheta_0^2; \quad (34)$$

$$t = -3717,66 - 12747,13\vartheta_0 - 10824,39\vartheta_0^2. \quad (35)$$

С учетом выражений (34) и (35) уравнение (32) принимает вид:

$$n = (17484,24 \cdot \vartheta_0 - 14842,9 \cdot \vartheta_0^2 - 5084,83) \cdot \vartheta - (12747,13 \cdot \vartheta_0 - 10824,3 \cdot \vartheta_0^2 - 3717,66). \quad (36)$$

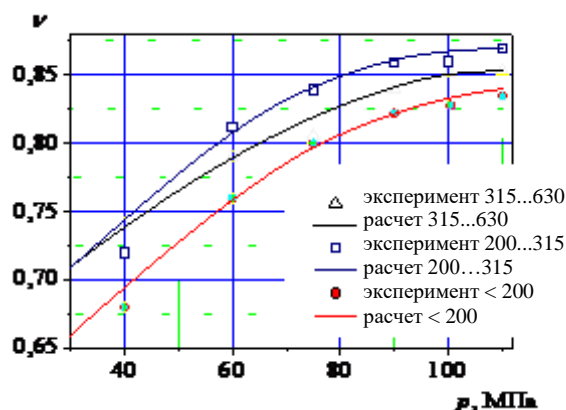


Рис. 6. Зависимости плотности прессовок из сложной шихты от давления прессования

шихты [21], что обеспечивает повышение точности прогнозирования свойств получаемых пористых проницаемых изделий в принятом технологическом диапазоне давлений прессования (40...80 МПа).

Предложенная модель ориентирована на порошки кварца с гранулометрическим составом до 630 мкм, имеющие наибольшее распространение в отечественных месторождениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсосберегающая технология изготовления пористых многослойных материалов из отходов фарфорового производства / С.М. Азаров [и др.] // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. А.И. Свириденка и В.А. Бородули. – Гродно: ГрГУ, 2005. – С. 110 – 111.
2. Петюшик, Е.Е. Исследование проницаемости пористых изделий из природного кварца / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш // Машиностроение: в 2-х т. – Минск, 2005. – Вып. 21, Т. 2. – С. 100 – 104.
3. Степаненко, А.В. Обработка давлением порошковых сред / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.Е. Харлан. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 167 с.
4. Витязь, П.А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А. Витязь, В.М. Капцевич, В.К. Шелег // 40 лет порошковой металлургии в Республике Беларусь: сб. ст. – Минск, 2000. – С. 137 – 176.
5. Дударев, Е.Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов / Е.Ф. Дударев. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988. – 256 с.
6. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энцикл., 1983. – 928 с.
7. Stokes, R.J. // Fracture. – N.Y.-London: Academic, 1972. – Vol. 7. – P. 157 – 165.
8. Шубников, А.В. Избранные труды по кристаллографии / А.В. Шубников. – М.: Наука, 1975. – С. 359 – 366.
9. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Наука, 1972. – 308 с.
10. Бальшин, М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М.Ю. Бальшин. – М.: Металлургия, 1972. – 335 с.
11. Деструкция порошков природного кварца при радиальном обжати / Е.Е. Петюшик [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы VII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 – 17 мая 2006 г. – Минск: НИИ ПМ НАН Б, 2006. – С. 121 – 122.
12. Влияние размера частиц порошка на структурные характеристики пористых проницаемых макротел на основе природного кварца / О.П. Реут [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы VII междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16 – 17 мая 2006 г. – Минск: НИИ ПМ НАН Б, 2006. – С. 125 – 126.
13. Кочегаров, Г.Г. Неупругость твердых тел при малых деформациях / Г.Г. Кочегаров // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, Вып. 17. – С. 29 – 35.
14. Van Bueren, H.G. Interfections in crystals / H.G. Van Bueren. – Amsterdam: North-Holland, 1960. – 624 p.
15. Павлов, П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов. – М.: Высш. шк., 1985. – 384 с.
16. Бриджмен, П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / П.В. Бриджмен; пер. с англ. А.И. Лихтера; под ред. Л.Ф. Верещагина. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 444 с.
17. Грозин, Б.Д. Механические свойства закаленной стали / Б.Д. Грозин. – М.; Киев: Машгиз, 1951. – 217 с.
18. Жданович, Г.М. Теория прессования металлических порошков / Г.М. Жданович. – М.: Металлургия, 1969. – 262 с.
19. Макушок, Е.М. Усложняющаяся контактная модель прессования порошковых материалов / Е.М. Макушок, О.П. Реут // Доклады НАН Б. – 2000. – Т. 44, № 4. – С. 116 – 119.
20. Жданович, Г.М. Сопrotивление порошковых материалов / Г.М. Жданович. – Минск: Бестпринт, 1999. – 340 с.
21. Кухлинг, Х. Справочник по физике: пер. с нем. / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
22. Петюшик, Е.Е. Шихта на основе природного кварца для получения спеченных фильтрующих элементов / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш // Проблемы инженерно-педагогического образования в Республике Беларусь: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2004 г. / под общ. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: Технопринт, 2004. – С. 286 – 291.
23. Реут, О.П. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов / О.П. Реут, Л.С. Богинский, Е.Е. Петюшик. – Минск: Дэбор, 1998. – 258 с.
24. Пористая конструкционная керамика / Ю.Л. Красулин [и др.]; под ред. Ю.Л. Красулина. – М.: Металлургия, 1980. – 100 с.

Поступила 28.09.2006