

УДК 532.546

## **Исследование процесса формования бериллиевой керамики методом горячего литья**

**У.К. Жапбасбаев, Г.И. Рамазанова, З.К. Саттинова**

*Казахстанско-Британский технический университет, Алматы*

E-mail: uzak.zh@mail.ru

Приводятся результаты моделирования процесса формования керамических изделий методом горячего литья. Математическая модель описывает движение жидкого термопластичного шликера оксида бериллия в цилиндрической формообразующей полости с учетом отвердевания. Получены поля скорости и температуры, обеспечивающие однородные свойства керамики оксида бериллия в процессе формования методом горячего литья.

**Ключевые слова:** термопластичный шликер, метод горячего литья, процесс формования, литейные характеристики керамики.

### **Введение**

Процесс формования керамики методом горячего литья включает стадии [1, 2]: движения и теплообмена в жидком состоянии, движения и теплообмена с учетом отвердевания, движения и теплообмена отливки в твердопластичном состоянии. На этапе заполнения формообразующей полости и выдержкой под давлением наиболее важно обеспечить максимальное разрушение структуры для получения однородной суспензии [2]. Это достигается путем ультразвукового воздействия (УЗВ) [2, 3]. В процессе отвердевания необходимо достигнуть минимального трения о стенки формообразующей полости и максимальной пластичности, не разрушая вновь образующуюся структуру отливки.

Гидродинамику термопластичного шликера при литье следует отнести к классу физических процессов течения и деформации. Поток шликера после выхода из питателя сохраняет свою конфигурацию. Опытным путем было установлено, что в диапазоне возможных скоростей литья режим движения термопластичного шликера в литейной форме является ламинарным [2]. Шликер поступает в литейную форму при температуре 75 °С и охлаждается в ней до 45 °С. При этой температуре отливку можно извлекать из формы без коробления [2].

Создание и реализация метода горячего литья носили в основном эмпирический характер, и проведение детального анализа движения и теплообмена позволит более обоснованно подойти к процессу формования керамики. Ниже приводятся результаты моделирования процесса формования керамики оксида бериллия методом горячего литья.

### Реологическая модель термопластичного шликера

Термопластичный шликер (высоковязкая суспензия) представляет собой двухфазную дисперсную систему, где твердая минеральная фаза — порошок оксида бериллия, а жидкая — органическая связка [2]. Органическая связка состоит из 3-х компонентов: парафина, пчелиного воска и олеиновой кислоты в соотношении 82 % : 15 % : 3 %. Для описания реологического свойства, взаимосвязи касательного напряжения  $\tau$  и скорости сдвига  $\partial u / \partial r$  термопластичного шликера использовалась реологическая модель Шведова–Бингама (1):

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига,  $\tau_0$  — предел текучести,  $\mu$  — коэффициент пластической вязкости.

Ультразвуковое воздействие оказывает влияние на реологические свойства шликера. Коэффициент пластической вязкости  $\mu$  (Па·с) и предел текучести  $\tau_0$  (Па) шликера зависят от температуры  $T$ , и опытные данные при относительном массовом содержании связки  $\omega = 0,1$  до УЗВ описываются эмпирическими зависимостями:

$$\begin{aligned} \mu &= 5,5 + 6,2 \exp(-(T - 334)/6), \\ \tau_0 &= 19 + 11,41 \exp(-(T - 340)/5,47), \end{aligned} \quad (2)$$

а после УЗВ:

$$\begin{aligned} \mu &= 2,5 \cdot 10^{14} \exp(-0,09068 T), \\ \tau_0 &= 5,93 \cdot 10^8 \exp(-0,04968). \end{aligned} \quad (3)$$

Плотность термопластичного шликера ( $\text{г/см}^3$ ) определяется концентрациями порошка оксида бериллия и связки:

$$\rho = \rho_{mb} \cdot \rho_{cb} / ((1 - \omega)\rho_{cb} + \omega \cdot \rho_{mb}), \quad (4)$$

где  $\rho_{mb}$  — плотность оксида бериллия,  $\rho_{cb}$  — плотность связки,  $\omega$  — относительное массовое содержание связки в долях единицы.

Плотность связки ( $\text{г/см}^3$ ) зависит от температуры и определяется эмпирической формулой:

$$\rho_{cb} = 0,8485 + 0,0755 \cdot \cos(0,0571 \cdot T - 16,736).$$

Плотность оксида бериллия составляет  $\rho_{mb} = 3,047 \text{ г/см}^3$ . Плотность связки в диапазоне температур от 348 по 313 °С изменяется в пределах  $\rho_{cb} = 0,773\text{--}0,9 \text{ г/см}^3$  и при отвердевании плотность термопластичного шликера возрастает от 2,355 до 2,46  $\text{г/см}^3$  для  $\omega = 0,1$ .

Как показывают опытные данные [2], УЗВ практически не оказывает влияния на теплопроводность и теплоемкость шликера, они зависят от температуры в виде:

$$\lambda = 7,1 \exp(-0,01 T + 2,73) \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \quad (5)$$

$$c_p = 1000 \exp(0,00345 T - 0,94), \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (6)$$

Таким образом, реологические свойства термопластичного шликера оксида бериллия являются функциями температуры, и в процессе формовки происходит агрегатное изменение жидкой суспензии в твердопластичное состояние.

### Математическая модель

Рассматривается движение и теплообмен термопластичного шликера в цилиндрической формообразующей полости (рис. 1). Конструкция данной полости выполнена в виде соосно расположенных труб. Внутренняя труба с радиусом  $r_1$  — формообразующая полость, а кольцевой слой с радиусами  $r_2$  и  $r_3$  — кожух для циркуляции охлаждающей жидкости. Жидкий шликер втекает в формообразующую полость с начальной температурой  $T_0 = 75^\circ\text{C}$  и под давлением выходит из нее. Движение термопластичного шликера происходит в ламинарном режиме. По мере движения шликерная масса охлаждается и затвердевает, приобретая конструкционную форму на выходе из полости. Отличительной особенностью шликера оксида бериллия является высокая теплопроводность, однако число Прандтля  $\text{Pr} = \mu c_p / \lambda$  намного больше единицы из-за высокой вязкости термопластичного шликера. Стенка формообразующей полости охлаждается водой, циркулирующей в кольцевом кожухе. Зона охлаждения разделена на три части: в первом отсеке температура воды  $T_1 = 73^\circ\text{C}$ , во втором —  $T_2 = 59^\circ\text{C}$ , в третьем —  $T_3 = 45^\circ\text{C}$ . Общая длина полости составляет  $l = 0,108$  м, длины первой, второй и третьей части равны соответственно  $l_1 = 0,022$  м,  $l_2 = 0,045$  м,  $l_3 = 0,041$  м.

Интенсивность теплообмена между горячим шликером и охлаждающей жидкостью зависит от режима течения, теплофизических характеристик шликера, температуры охлаждающей жидкости, материала стенки трубы и геометрических размеров кожуха. Реологические свойства жидкого шликера изменяются вследствие отвердевания, и на поверхности перехода агрегатного состояния выделяется теплота. Теплообмен с охлаждающей жидкостью может привести к неравномерности профиля температуры и реологических свойств выдавливаемого шликера. Отвердевание начнется со стороны стенки, тогда как в центральной части полости шликер, возможно, будет в жидком состоянии. В результате может произойти подпитка отвердевающего шликера жидким для компенсации внутренней усадки на этапе отверждения отливки в охлаждаемой зоне полости.

Задача исследуется в цилиндрической системе координат с осями  $z$  и  $r$ , направленными вдоль полости и радиально к ней. По направлению скорости литья движение шликера считается установившимся и для его изучения используется система уравнения движения неньютоновской жидкости [4] с привлечением модели Шведова–Бингама для выражения  $\tau$  согласно (1):

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_0) + \rho g, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho v}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

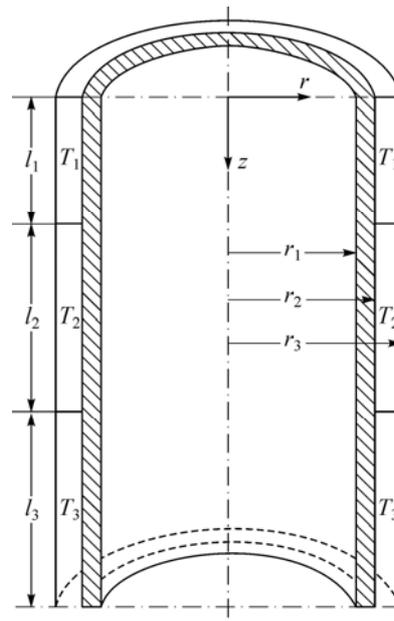


Рис. 1. Схема течения термопластичного шликера в цилиндрической полости.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial z} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + H_k \frac{d\rho}{dt} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2. \quad (9)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $z, r$  — осевая и радиальная координаты;  $u, v$  — компоненты вектора скорости;  $p, \rho, T, \tau, c_p, \mu, \lambda$  — давление, плотность, температура, касательное напряжение сдвига, коэффициенты теплоемкости, вязкости и теплопроводности шликера, соответственно.

Теплота отвердевания шликера оксида бериллия находится по опытным данным и равна  $H_k = 7800$  Дж/кг [5]. Реологические свойства шликера выражаются в соответствии с вышеприведенными эмпирическими формулами (1)–(5). Условие сохранения массового расхода позволяет определить градиент давления для выдавливания термопластического шликера из литевой формы:

$$2\pi \int_0^{r_1} \rho u r dr = \pi r_1^2 \rho_o u_o. \quad (10)$$

Распределения скорости и температуры на входе принимаются постоянными по сечению канала, соответственно, постоянны все теплофизические свойства шликера:

$$\text{при } z = 0: u = u_o, v = 0, T = T_o. \quad (11)$$

На оси круглой полости принимаются условия симметричности:

$$\text{при } z > 0, r = 0, \partial u / \partial r = \partial T / \partial r = v = 0. \quad (12)$$

На стенке ставятся условия непроницаемости и скольжения шликера:

$$\text{при } z > 0, r = r_1: v = 0, -dp/dz = \frac{2}{r_1} \left( \tau_{oi} + (\partial u / \partial r)_{iw} \right), i = 1, 2. \quad (13)$$

Теплообмен в полости происходит в соответствии с величинами температуры в контурах охлаждения. Предполагается, что температура стенки полости на каждом участке поддерживается постоянной, равной температуре охлаждающей жидкости. Обозначая температуру воды в первом, втором и третьем контурах  $T_1, T_2, T_3$  соответственно, имеем граничные условия для температуры на стенке [6]:

$$\text{при } 0 \leq z < l_1, r = r_1: T = T_1, \quad (14)$$

$$\text{при } l_1 \leq z < l_2, r = r_1: T = T_2, \quad (15)$$

$$\text{при } l_2 \leq z < l_3, r = r_1: T = T_3. \quad (16)$$

Для удобства решения система уравнений (7)–(16) приводится к безразмерным переменным. Координаты  $z, r$  делятся на радиус  $r_1$ , компоненты скорости  $u$  и  $v$  на  $u_o$ , давление  $p$  на динамический напор  $\rho_o u_o^2$ , температура  $T$  на  $T_o$ , плотность, предел текучести, коэффициенты теплоемкости, вязкости, теплопроводности делятся на значения этих величин при температуре  $T_o$ . При безразмерных переменных в систему уравнений (7)–(9) входят определяющие критерии Рейнольдса  $Re = \rho_o u_o r_1 / \mu_o$  и Прандтля  $Pr = c_{p0} \mu_o / \lambda_o$ .

Система уравнений (7)–(10) при граничных условиях (11)–(16) решается численным методом. Рассматриваемая область разбивается на элементарные ячейки со сторонами  $\Delta z_i, \Delta r_j$ . Разностные аналоги уравнений движения (7) и энергии (9) получены по неявной схеме Кранка–Никольсона второго порядка точности, а разностный аналог уравнения (8) — двухслойной схемой второго порядка точности [7]. Градиент давления определяется методом расщепления [7] из условия сохранения массового расхода (10).

Для верификации численного метода решена задача переноса тепла при ламинарном течении неньютоновской жидкости в круглой трубе при постоянной температуре стенки. Полученные результаты численных расчетов по изменению критерия Нуссельта для круглой полости совпадают с аналитическим решением А.Х. Мирзаджанзаде и А.А. Абасова для вязкопластичной жидкости [8].

### Обсуждение расчетных данных

Расчеты проводились для шликера с учетом реологических свойств до и после УЗВ.

На рис. 2–4 приведены расчетные данные шликера до УЗВ при следующих режимных параметрах:  $u_0 = 5, 25, 50$  мм/мин,  $r_1 = 0,025$  м. Числа Рейнольдса и Прантдля, найденные по входным данным, были равны, соответственно:  $Re = 8 \cdot 10^{-4}$ ,  $4,0 \cdot 10^{-3}$ ,  $8 \cdot 10^{-3}$ ,  $Pr = 2355,6$ .

Как видно из рис. 2, имеется различие в распределениях продольной скорости и температуры. Входной стержневой профиль продольной скорости  $u$  вытягивается и приобретает параболическую форму под действием сил давления, инерции и трения в пределах первого контура охлаждения (рис. 2, *a*). Видно, что сила вязкого трения превалирует над силами инерции и длина начального гидродинамического участка будет незначительной. Форма профиля продольной скорости подобна движению вязкой жидкости (рис. 2, *a*) и на стенке скорость скольжения равна нулю. В свою очередь, входное поршневое распределение температуры по сечению полости изменяется незначительно, а по длине начинает снижаться из-за теплообмена на стенке (рис. 2, *b*).

Во втором контуре растет теплообмен между горячим шликером и охлаждающей жидкостью, что снижает температуру вблизи стенки, увеличивает пластическую вязкость и предел текучести. Сдвиговое течение вязкой жидкости начинает перестраиваться в форму движения вязкопластической жидкости. Проявление и возрастание неньютоновских свойств жидкости вызывает рост скорости скольжения шликера на стенке (рис. 2, *a*). В зоне третьего контура профиль скорости стремится к стержневой форме из-за отвердевания термопластичного шликера (рис. 2, *a*).

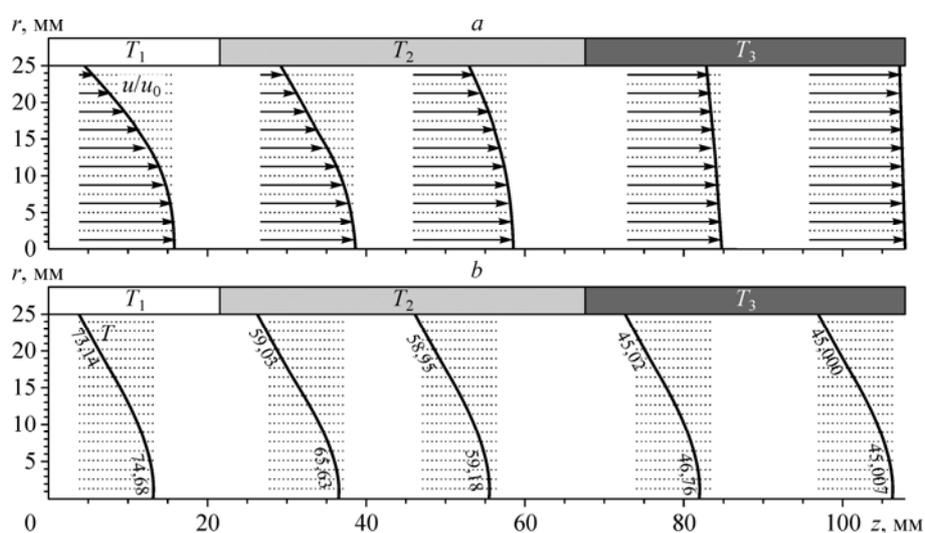


Рис. 2. Распределения продольной скорости (*a*) и температуры (*b*) по длине цилиндрической полости до УЗВ.

$$u_0 = 5 \text{ мм/мин}, Re = 8 \cdot 10^{-4}, Pr = 2355,6.$$

По опытным данным температура отвердевания термопластичного шликера  $T_k = 55^\circ\text{C}$  и выделяющаяся теплота агрегатного изменения не оказывает существенного влияния и быстро рассеивается. В этом режиме для процесса формирования одинаковую роль играют как конвективный, так и молекулярный механизмы переноса тепла. Величина температуры изменяется незначительно по сечению полости и продолжает снижаться по ее длине из-за отвода тепла через стенку (рис. 2, *b*). Равномерное распределение температуры приводит к однородности реологических и теплофизических свойств шликера по сечению полости. В этом случае усадка термопластичного шликера становится равномерной, не образуются раковины и пустоты, приводящие к потере прочности керамических изделий из оксида бериллия. По изменению профилей продольной скорости и температуры по длине полости можно представить все стадии метода горячего литья термопластичного шликера (жидкое состояние, состояние с учетом отвердевания, твердопластичное состояние).

На рис. 3 представлены расчетные данные, полученные при скорости литья  $u_0 = 25$  мм/мин. Рост скорости термопластичного шликера вызывает увеличение конвективного потока тепла. Это особенно заметно по распределению температуры (рис. 3, *b*). Температура шликера вблизи стенки близка к температуре охлаждающей жидкости, которая начинает возрастать, достигая максимального значения на оси полости. Неоднородное распределение температуры приводит к тому, что шликер по сечению полости будет находиться в разных агрегатных состояниях, т. е. вблизи стенки — в твердопластичном, а в центральной части — в жидком состоянии.

Изменение агрегатного состояния по сечению полости влияет на профиль продольной скорости. В жидкой части текучесть больше и скорость выше, чем в твердопластичном состоянии, и в переходной зоне имеется перегиб в профилях продольной скорости (рис. 3, *a*). Этот эффект усиливается при скорости литья  $u_0 = 50$  мм/мин. Шликер остается жидким в центральной части полости по всей ее длине, а вблизи стенки отвердевает (рис. 4). Поэтому профиль продольной скорости постепенно трансформируется в струйную форму, описывающую полученную структуру термопластичного шликера (рис. 4, *a*).

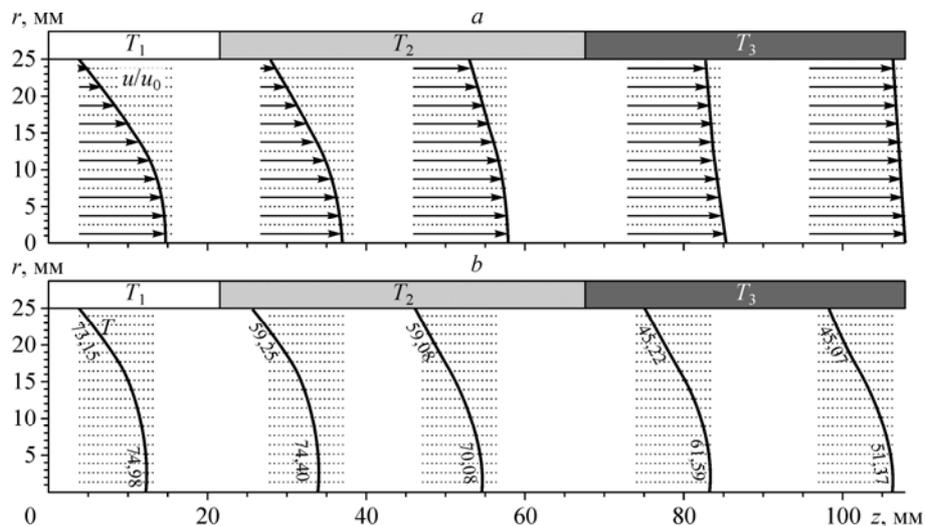


Рис. 3. Распределения продольной скорости (*a*) и температуры (*b*) по длине цилиндрической полости до УЗВ.

$$u_0 = 25 \text{ мм/мин, } Re = 4 \cdot 10^{-3}, Pr = 2355,6.$$

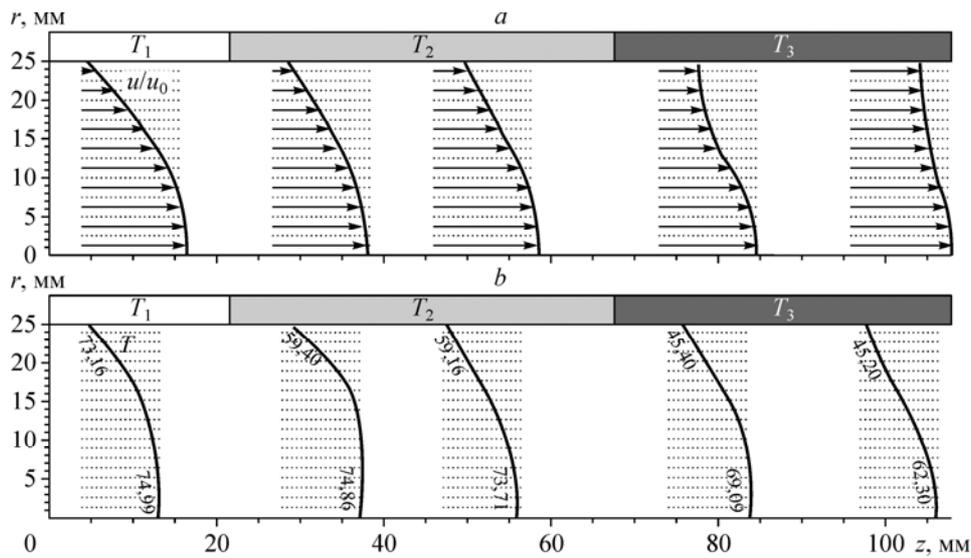


Рис. 4. Распределения продольной скорости (а) и температуры (b) по длине цилиндрической полости до УЗВ.

$$u_0 = 50 \text{ мм/мин}, \text{Re} = 8 \cdot 10^{-3}, \text{Pr} = 2355,6.$$

На рис. 5–7 приведены расчетные данные шликера после УЗВ. Для удобства сравнения расчеты проведены при тех же скоростях литья  $u_0 = 5, 25, 50$  мм/мин и внутреннем радиусе  $r_1 = 0,025$  м. Числа Рейнольдса и Прандтля были равны, соответственно:  $\text{Re} = 9,93 \cdot 10^{-4}, 4,965 \cdot 10^{-3}, 9,93 \cdot 10^{-3}$ ,  $\text{Pr} = 1908$ . При воздействии ультразвука снижается коэффициент пластической вязкости  $\mu$ , предел текучести  $\tau_0$  и число Прандтля, а число Рейнольдса, наоборот, возрастает. Произведение этих критериев дает число Пекле, значение которого практически не меняется до и после УЗВ. Для  $u_0 = 5$  мм/мин число Пекле составляет  $\text{Pe} = 2,16$ , профили температуры и продольной скорости до и после УЗВ имеют идентичный характер (рис. 5). Число Пекле близко к единице и конвективный перенос тепла будет идентичен для обоих случаев, несмотря на улучшение текучести шликера после УЗВ.

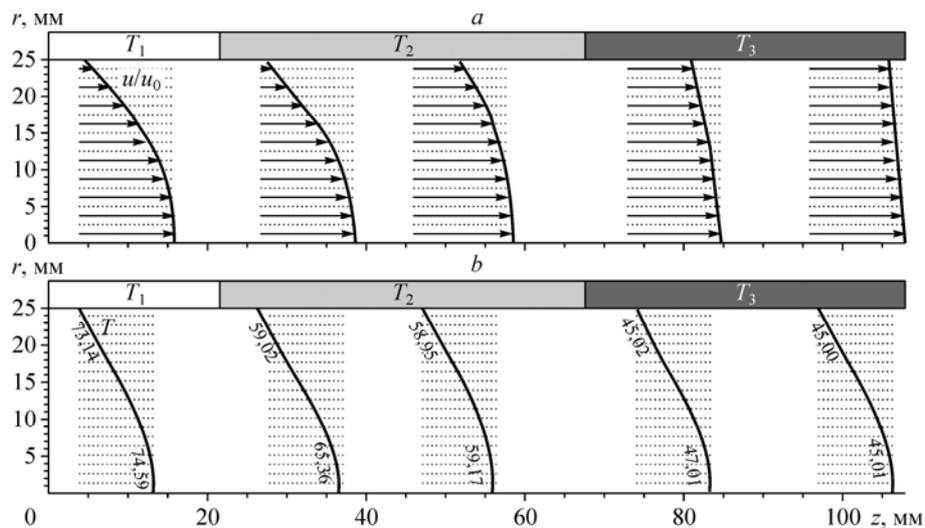


Рис. 5. Распределения продольной скорости (а) и температуры (b) по длине цилиндрической полости после УЗВ.

$$u_0 = 5 \text{ мм/мин}, \text{Re} = 9,93 \cdot 10^{-4}, \text{Pr} = 1908.$$

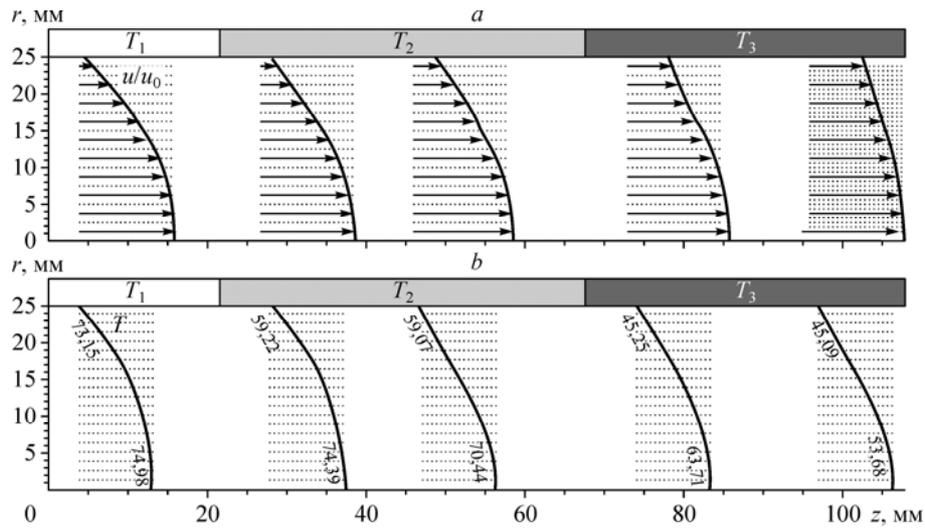


Рис. 6. Распределения продольной скорости (а) и температуры (б) по длине цилиндрической полости после УЗВ.

$$u_0 = 25 \text{ мм/мин}, \text{Re} = 4,965 \cdot 10^{-3}, \text{Pr} = 1908.$$

При  $u_0 = 25$  мм/мин число  $\text{Re} = 9,47$ . Как и в случае без УЗВ, шликер остается жидким в центральной части полости до  $z = 0,090$  м и далее начинает отвердевать (рис. 6). Распределение продольной скорости показывает твердопластичное состояние шликера вблизи стенки и вязкопластичное — в центральной части полости (рис. 6, а).

При скорости литья  $u_0 = 50$  мм/мин шликер не застывает в центральной части по всей длине полости и основная текущая масса находится в жидком состоянии (рис. 7), т. е. УЗВ, улучшая реологию шликера, снижает литейные характеристики при методе горячего литья керамических изделий.

Таким образом, расчетные данные показывают, что в зависимости от скорости литья и теплопереноса можно добиться однородного изменения свойств шликера по сечению полости. Это важно для повышения качества керамических изделий. Тогда как

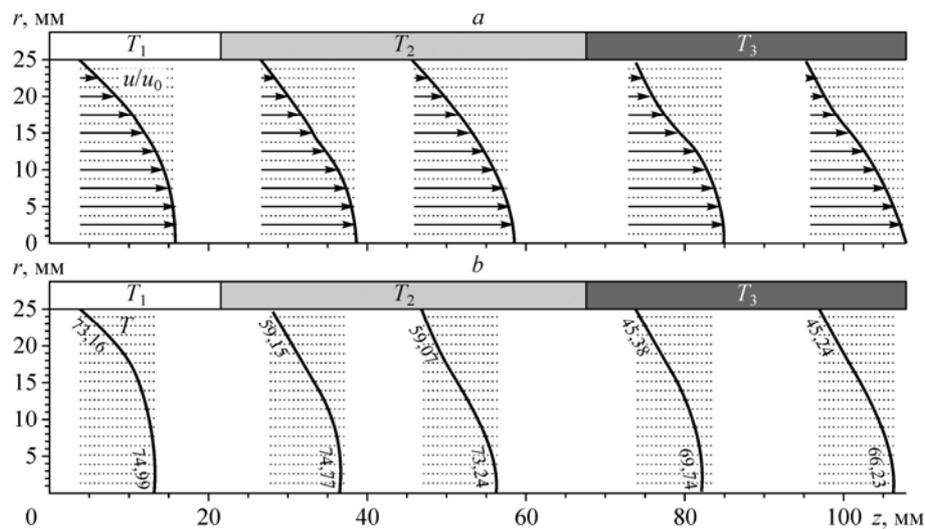


Рис. 7. Распределения продольной скорости (а) и температуры (б) по длине цилиндрической полости после УЗВ.

$$u_0 = 50 \text{ мм/мин}, \text{Re} = 9,93 \cdot 10^{-3}, \text{Pr} = 1908.$$

неоднородность свойств шликера по сечению полости может привести к его усадке, образованию раковин и пустот, потере прочности керамических изделий.

### **Заключение**

Результаты исследования показывают, что математическая модель описывает всю стадию формования керамики с учетом изменения ее агрегатного состояния. Поля скорости и температуры позволили выявить закономерности движения и теплообмена, определяющие внутреннюю структуру процесса формования, превращение вязкопластичного жидкого шликера в твердопластичное состояние и установить влияние параметров (скорости литья, температуры охлаждающей жидкости, реологических свойств) на процесс отвердевания шликерной массы. В расчетах можно найти оптимальные условия процесса формования керамики способом горячего литья, которые позволяют получить на выходе отвердевшее изделие с однородной структурой оксида бериллия.

### **Список литературы**

1. Добровольский А.Г. Шликерное литье. М.: Metallurgy, 1977. 240 с.
2. Шахов С.А., Бицоев Г.Д. Применение ультразвука при производстве высокотеплопроводных керамических изделий. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 1999. 145 с.
3. Шахов С.А., Гагарин А.Е. Реологические характеристики термопластичных дисперсных систем, обработанных ультразвуком // Стекло и керамика. 2008. № 4. С. 19–21.
4. Zhabasbayev U.K., Kaltayev A., Bitsoyev G.D., Turnayev S.K. Hydrodynamics of moulding of ceramic articles from beryllium oxide with ultrasonic activation // Proc. ASME Intern. Mech. Engng Congress and Exposition, Orlando. 2005. Pt. 3. P. 177.
5. Двинских Ю.В., Попильский Р.Я., Костин Л.И., Кулагин В.В. Теплофизические свойства термопластичных литейных шликеров некоторых высокоогнеупорных окислов // Огнеупоры. 1979. № 12. С. 37–40.
6. Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 592 с.
7. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т.Т. 2 / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 392 с.
8. Есьман Б.И., Габузов Г.Г. Термогидравлические процессы при бурении скважин. М.: Недра, 1991. 216 с.

*Статья поступила в редакцию 9 августа 2010 г.,  
после переработки 6 июля 2012 г.*