

РАСЧЕТ ЛИТЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОСКОЙ ФИЛЬЕРЫ УСТАНОВКИ ЛИТЬЯ

Проведен расчет гидродинамики и теплообмена процесса литья длинномерных керамических изделий из оксида бериллия в плоской формообразующей полости.

Высокоплотная керамика из оксида бериллия находит широкое применение благодаря ряду ценных свойств и, прежде всего, уникальной теплопроводности. В настоящее время основным методом формования сложных изделий, а также деталей в виде трубок и стержней является метод литья термопластичных шликеров [1]. Сущность этого метода изготовления заключается в придании жидкому термопластичному шликеру конфигурации изделия при заполнении формообразующей полости под давлением и последующей фиксации приобретенной формы посредством изменения агрегатного состояния среды по мере его охлаждения.

Литейная система представляет собой многофазную среду, в которой в качестве дисперсионной фазы используется термопластичная связка сложного состава с коагуляционным свойством [2, 3]. Реологические характеристики шликера определяются соотношением между кинетически свободной и связанной дисперсионной фазами. Сведения о свойствах оксида бериллия показывают, что он является перспективным ма-

териалом для ряда специальных областей техники. Однако его уникальная теплопроводность на этапе формования обуславливает повышенную «жесткость» литейных систем, что затрудняет управление структурообразованием при движении шликера. В этой связи для улучшения качества изделий и повышения производительности литья представляется целесообразным использование при формовании динамических методов воздействия на перерабатываемый материал. Одним из наиболее эффективных методов воздействия считается обработка ультразвуком [4, 5].

Гидродинамику термопластичного шликера при литье следует отнести к классу физических процессов деформации и течения. Поток шликера после выхода из питателя сохраняет свою конфигурацию. При этом скорость и давление потока являются постоянными. В опытах было установлено, что в диапазоне возможных скоростей литья режим движения термопластичного шликера в литейной форме является ламинарным. Шликер поступает в литейную форму при температуре

75–85°C, охлаждается в ней до температуры, при которой отливку можно извлекать из формы без коробления, т.е. до 30–45°C. Движение и теплообмен шликера в литевой форме можно рассматривать как совокупность этапов:

- 1) движение и теплообмен шликера в жидком состоянии;
- 2) движение и теплообмен шликера с учетом кристаллизации;
- 3) движение и теплообмен отливки в твердом состоянии.

Создание и реализация литья носили в основном эмпирический характер, и проведение детального анализа гидродинамики и теплообмена позволит более обоснованно подойти к технологии литейного режима шликера. Ниже приводятся математическая модель процесса и расчетные данные литейных характеристик.

Математическая модель. Рассматривается движение жидкого термопластичного шликера в фильере плоской формы установки литья (изделие – тонкая керамическая пластина из оксида). В плоский канал под давлением втекает горячий жидкий шликер с температурой 75°C. По опытным данным максимальное значение скорости литья не превышает 2 мм/мин, т.е. процесс литья очень медленный и режим течения – ламинарный. Шликерная масса, двигаясь вдоль фильеры, охлаждается за счет теплообмена через внешнюю стенку. Контур охлаждения разделен на три части, в первой части температура охлаждающей воды равна $T_{гор} = 73^\circ\text{C}$, во второй – $T_{мен} = 59^\circ\text{C}$, в третьей – $T_{хол} = 45^\circ\text{C}$. Общая длина плоской фильеры составляет 0,071 м, длина горячей, теплой и холодной фильеры равна 0,0184, 0,0263 и 0,0263 м. Интенсивность теплообмена между горячим шликером и охлаждающей жидкостью зависит от режима течения, теплофизических характеристик шликера, температуры охлаждающей жидкости, материала стенки фильеры и ее геометрических размеров. В процессе теплообмена не только изменяются основные характеристики шликера, но и происходит его кристаллизация.

Схема плоской фильеры приведена на рис. 1. Ширина пластины 30 раз больше толщины, поэтому движение и теплообмен шликера в плоской фильере можно рассмотреть в постановке узкого канала:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau) + \rho g,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0, \\ \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L_k \frac{d\rho}{dt} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Градиент давления в уравнении движения определяется из условия сохранения массового расхода:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \rho u dy = \rho_o u_o h. \quad (4)$$

Предполагается непроницаемость стенок плоского канала и имеет место скольжение шликера на стенке канала из-за ультразвуковой вибрации. Граничные условия для температуры выражают теплообмен на стенке и условие симметричности на плоскости симметрии.

Теплофизические свойства термопластичных шликеров из оксида бериллия с ультразвуковой активацией были найдены по результатам лабораторных исследований [5, 6] в интервале температуры 30 °C Θ T Θ 80 °C и обобщены в виде эмпирических зависимостей:

$$\rho = \rho_o \{0,8325 + 0,0618 \cdot \cos[\pi(0,035T/T_o - 5,15)]\} \quad (\text{кг/м}^3);$$

$$\mu = 1,17 \cdot 10^9 \cdot \exp(-0,28 \cdot T/T_o) + 49,4 \quad (\text{Па}\cdot\text{с});$$

$$\lambda = 1,6 + 4,8 \cdot \exp(-0,017 \cdot T/T_o) \quad (\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{C}\cdot\text{град})); \quad (5)$$

$$\tau = 2,61 \cdot 10^{10} \exp(-0,339 \cdot T/T_o) + 22,34 \quad (\text{Па});$$

$$c_p = 1000 \exp(T/(T_o \cdot 290)) \quad (\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{C}\cdot\text{град})).$$

Теплота кристаллизации шликера из оксида бериллия L_k находится по опытным данным [6].

Распределения скорости и температуры на входном сечении плоского канала стержневые, соответственно постоянны все теплофизические характеристики шликера. Итак, граничные условия:

$$\text{при } x = 0: \quad u = u_o, \quad v = 0, \quad T = T_o$$

$$\text{при } x > 0, y = 0: \quad v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

$$\text{при } x > 0, y = h: -\frac{dp}{dx} = \left(\tau_w + \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)_w \right).$$

Граничное условие для температуры на стенке изменяется в соответствии с условиями в контурах фильеры. Обозначая температуру воды горячего контура T_1 , теплого – T_2 , холодного – T_3 , имеем граничное условие для температуры на стенке:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq x \leq l_1, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= k(T - T_1), \\ \text{при } l_1 \leq x \leq l_2, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= k(T - T_2), \\ \text{при } l_2 \leq x \leq l_3, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= k(T - T_3). \end{aligned} \quad (7)$$

Решение системы уравнений движения и теплообмена проводится численным методом. Уравнения движения и теплообмена аппроксимируются схемой Кранка-Никольсона второго порядка точности и решаются методом прогонки [7]. Градиент давления находится из условия сохранения массового расхода.

Результаты расчета. Расчеты проводились для плоской фильеры (рис. 1) длиной $L = 0,071$ м, шириной $b = 0,045$ м при двух значениях ее толщины $h = 0,0015$ м, $h = 0,00075$ м,

Средняя скорость шликера равнялась 2 мм/с, 2 мм/мин. Коэффициент теплопередачи (k) вычисляется по геометрическим размерам филь-

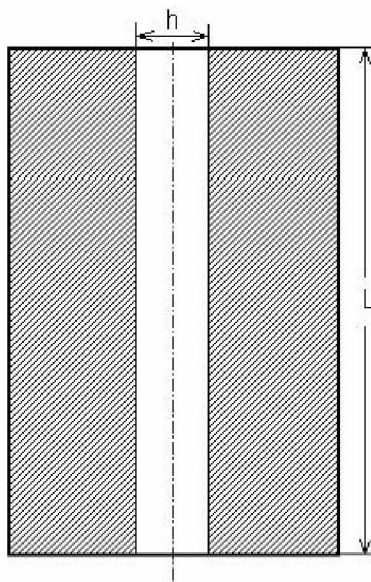


Рис. 1. Схема плоского канала

еры, физическим свойствам металла стенки фильеры и по величине коэффициента теплопроводности шликера (λ). Численное значение коэффициента теплопередачи изменяется от величины 0,3 и выше, поэтому в расчетах число Био (Био) принимается равным $Био=0,3$ и $Био=0,6$. Критерии Прандтля (Pr) и Рейнольдса (Re) найдены по теплофизическим свойствам шликера и равнялись $Pr=19419$, $Re=0,00108$ соответственно при скорости шликера 2 мм/м. Значения температуры охлаждающей воды для горяче-

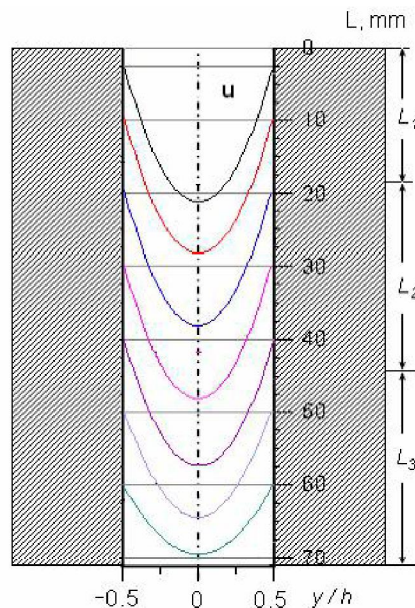


Рис. 2. Профили продольной скорости при $Био = 0,3$, $h = 1,5$ мм

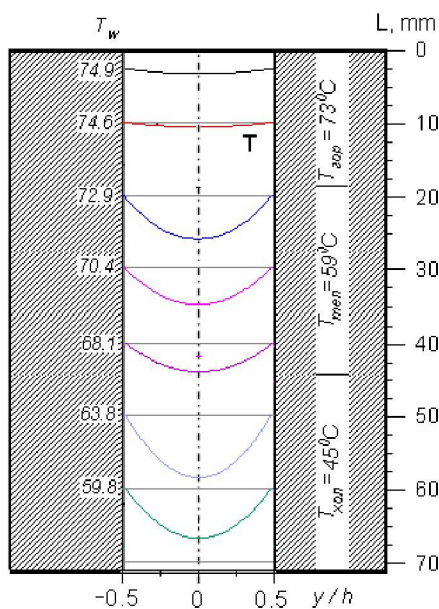


Рис. 3. Профили температуры при $Био = 0,3$, $h = 1,5$ мм

го, теплого и холодного контуров равны соответственно 73, 59, 45°C.

На рис. 2, 3 представлены распределения продольной скорости u и температуры T в разных сечениях плоской фильеры при толщине $h = 0,0015$ м и скорости литья 2 мм/с. Профили продольной скорости u показывают движение шликера по длине фильеры.

Входной профиль скорости u стрежневой, вытягивается и приобретает параболическую форму за счет действия сил давления, инерции и вязкости в пределах горячего и теплого контуров фильеры. В пределах теплого контура начинают сказываться неньютоновские свойства жидкости и на профиль скорости оказывает влияние пластическая вязкость из-за снижения температуры за счет теплообмена на стенке. Поэтому профиль скорости u начинает выхолаживаться. Деформация эпюры скорости усиливается в зоне холодного контура и стремится к стержневой форме (см. рис. 2).

На входе фильеры температура шликера постоянная и равна T_0 (рис. 3). В зоне горячего контура распределение температуры T приобретает известную форму параболы для течения вязкой жидкости в канале. В пределах горячего и теплого контуров фильеры работают конвективный и диффузионный механизмы переноса тепла. Процесс отвердевания начинается от стенки холодного контура фильеры и теплота кристаллизации также оказывает влияние на распределение температуры. В пределах холодного контура фильеры процесс кристаллизации охватывает все поперечное сечение канала и на выходе распределение температуры стремится к температуре отвердевания шликера.

Распределение теплового потока на стенке иллюстрирует резкое повышение его величины

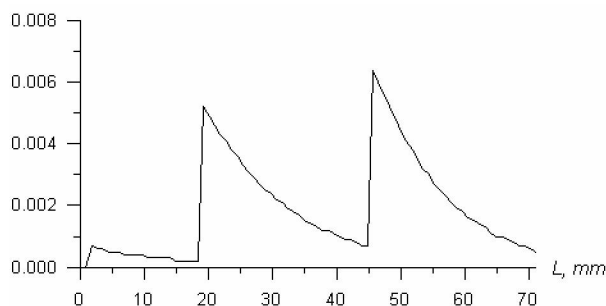


Рис. 4. Плотность теплового потока при $Bio = 0,3$, $h = 1,5$ мм

на границах между контурами из-за изменения температуры воды (рис. 4). Такое изменение теплового потока на стенке вызывает интенсивное охлаждение шликера и приводит к росту радиального градиента температуры по сечению фильеры (см. рис. 3).

Уменьшение толщины плоского канала в два раза ($h = 0,00075$ м) приводит к однородному распределению скорости и температуры по толщине пластины (рис. 5, 6). В этом случае массовый

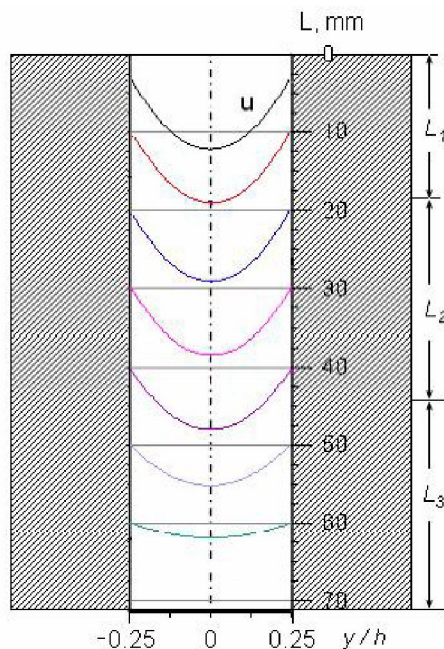


Рис. 5. Профиль скорости при $Bio = 0,3$, $h = 0,75$ мм

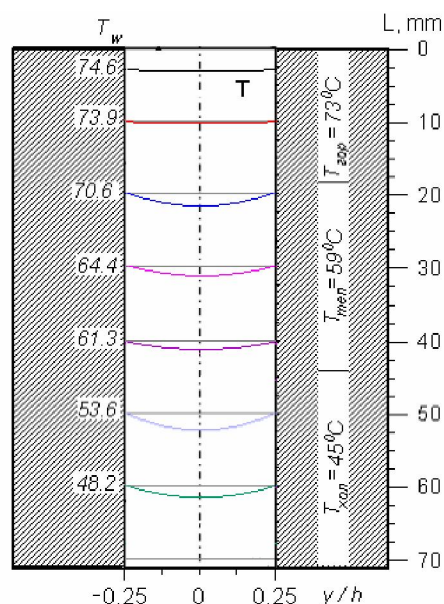


Рис. 6. Профиль температуры при $Bio = 0,3$, $h = 0,75$ мм

расход и теплосодержание шликера снижаются. Шликер охлаждается быстрее по сравнению с предыдущим случаем за счет теплообмена на внешней стенке. В пределах теплой фильеры начинается интенсивная кристаллизация шликера. Поэтому профили скорости (рис. 5) и температуры

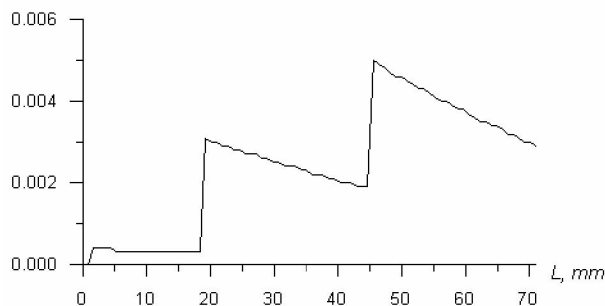


Рис. 7. Плотность теплового потока при $Bio = 0,3$, $h = 0,75$ мм

(рис. 6) становятся равномерными уже в средней части холодного контура.

Величина плотности теплового потока на стенке в этом случае несколько снижается (рис. 7).

Если скорость литья снизить до 2 мм/мин при прочих равных условиях, то процесс отвердевания происходит в пределах теплого контура фильеры и в начале холодной зоны полностью завершается. В этом случае габарит фильеры можно сократить на длину холодного контура.

Итак, расчетные данные описывают реальный процесс и позволяют определять оптимальные условия литья керамических изделий из оксида бериллия в фильере плоской формы.

Таким образом, разработана математическая модель гидродинамики и теплообмена термопластичного шликера в формообразующей полости установки литья. Модель включает систему уравнений движения неньютоновской жидкости, неразрывности и энергии с учетом эффекта кристаллизации. Сохранение массового расхода текущей среды в фильере позволяет найти перепад давления, необходимого для выдавливания керамических изделий из формообразующей полости. Сформулированы граничные усло-

вия, учитывающие скольжение и охлаждение термопластичного шликера на стенке фильеры. Создан эффективный метод численного решения системы уравнения.

Проведен вычислительный эксперимент математической модели при различных значениях режимных параметров, получены поля скорости, температуры, плотности, динамической вязкости, предельного напряжения сдвига. Данные расчетов показывают процесс отвердевания шликера по мере движения в формообразующей полости, увеличение плотности шликера в результате его кристаллизации, стремление скорости скольжения к средней скорости шликера по мере отвердевания. Все эти данные физически обоснованы и объясняют процесс литья керамических изделий в фильере установки литья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский А.Г. Шликерное литье. М.: Металлургия, 1977. 240 с.
2. Пивинский Ю.Е. Объемные фазовые характеристики и их влияние на свойства суспензий и керамических литейных систем // Огнеупоры. 1982. № 11. С. 50-57.
3. Пивинский Ю.Е. О фазовых соотношениях, важнейших технологических свойствах и классификации керамических и других вязущих систем // Огнеупоры. 1982. № 6. С. 49-59.
4. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко Л.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
5. Шахов С.А., Бицоев Г.Д. Применение ультразвука при производстве высокотеплопроводных керамических изделий. Усть-Каменогорск: ВКТУ, 1999. 177 с.
6. Двинских Ю.В., Попильский Р.Я., Костин Л.И., Кулагин В.В. Теплофизические свойства литейных шликеров некоторых высокоогнеупорных окислов // Огнеупоры. 1979. №12. С. 37-40.
7. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. Т. 2. 392 с.

Резюме

Мақала жазық пішінді фильерасында бериллий тотығынан ұзынша керамикалық бұйымдар құю үрдісінің гидродинамикасы мен жылу алмасуын есептеуге арналған.

Summary

The Paper is devoted to calculation of hydrodynamics and heat exchange of moulding process of long-length ceramic articles from beryllium oxide in flat bushing.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 2.06.06г.