

УДК 666.3.032.5:532.546

У.К. Жапбасбаев¹, Г.И. Рамазанова¹, З.К. Саттинова^{2*}¹Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: sattinova_zamira@mail.ru

Исследование структурных изменений при формировании термопластичного шликера оксида бериллия в плоской фильере

Аннотация. Приводятся результаты моделирования процесса формирования керамических изделий методом горячего литья. Определены литейные характеристики, обеспечивающие однородные свойства керамики в процессе формирования методом горячего литья.

Ключевые слова: термопластичный шликер, керамика, метод горячего литья, математическая модель.

Керамические изделия, изготовленные из оксида бериллия (BeO), обладают уникальными физико-химическими свойствами, сочетающими в себе высокую химическую, термическую, радиационную стойкость, теплопроводность, прозрачность для вакуумного ультрафиолетового, рентгеновского, сверхвысокочастотного излучения [1-3]. Перечисленные свойства BeO делают его перспективным материалом для применения в электронике, радиотехнике, приборостроении, ядерных реакторах и др. [1,2]. Производство деталей бериллиевой керамики должно осуществляться при строгом соблюдении технологических требований, которые обеспечивают сохранение комплексных свойств и однородности структуры сопутствующими гидродинамическими, релаксационными и физико-химическими процессами, протекающими на стадии формирования литья. Процесс литья термопластичного шликера предъявляет весьма жесткие требования к свойствам изделий и представляет значительную сложность, обусловленную, в первую очередь, высокой теплопроводностью. В результате на практике из-за сложности управления структурообразованием полуфабриката зачастую не достигается необходимого качества отливок, низка производительность и выход годных изделий. Значительную роль в формировании однородной структуры получаемых изделий играет ультразвуковое воздействие. Сложность

проведения экспериментов на реальных литейных установках делает актуальным использование расчетно-теоретических методов исследования. Поэтому математическое моделирование является оперативным и экономичным методом анализа процесса литья керамических изделий. Ниже излагаются результаты формирования термопластичного шликера оксида бериллия в плоской фильере.

Математическая модель

Рассматривается неизотермическое течение термопластичного шликера оксида бериллия в плоской фильере (рис.1), на внешней поверхности которого происходит теплообмен с охлаждающей жидкостью.

Горячий жидкий шликер поступает с начальной скоростью u_0 , мм/мин в узкий зазор плоского канала с толщиной $2h=1,5$ мм (рис.1). Шликерная масса, двигаясь вдоль полости, охлаждается за счет теплообмена через внешнюю стенку. Контур охлаждения разделен на три части. В первой части температура охлаждающей воды – $T_1=73^\circ\text{C}$, во второй – $T_2=59^\circ\text{C}$, в третьей – $T_3=45^\circ\text{C}$. Общая длина фильеры $L=0,071$ м, длина первой, второй и третьей части фильеры равна соответственно $L_1=0,0146$ м, $L_2=0,0295$ м, $L_3=0,0269$ м.

Процесс формирования происходит в стационарном режиме, и термопластичный шликер по мере движения в фильере претерпевает три

состояния: 1) течение и теплообмен шликера в жидком состоянии; 2) течение и теплообмен шликера с учетом отвердевания; 3) течение и теплообмен отливки в твердопластичном состоянии. Структурообразование термопластичного шликера определяется закономерностью перехода из одного агрегатного состояния в другое. Переход агрегатного состояния шликера зависит от скорости литья, интенсивности переноса тепла за счет конвекции, теплопроводности, диссипации кинетической энергии движения шликерной массы и теплоты фазового перехода. По опытным данным [2] для термопластичного шликера из оксида бериллия температура фазового перехода равна $T_f=55^\circ\text{C}$ при массовой концентрации связки – $\omega=11,7\%$.

Плотность шликерной массы является переменной и возрастает по мере отвердевания. Ско-

рость литья направлена вертикально вниз по оси ОХ, а также имеется поперечная составляющая скорости по оси ОУ из-за подпитки жидкого шликера со стороны стенки, пока не происходит полное отвердевание отливки. Термопластичный шликер с тиксотропным характером течения в пределах изменения скорости сдвига (0.005:1200) 1/сек можно отнести к вязкопластичным жидкостям Шведова – Бингама [2].

Ширина канала – намного больше, чем толщина (рис.1). Сила трения при течении термопластичного шликера в поперечном направлении намного превосходит трения в продольном направлении. Поэтому при рассмотрении процесса формирования в плоской фильере можно пренебречь силу трения и перенос тепла за счет теплопроводности в продольном направлении.

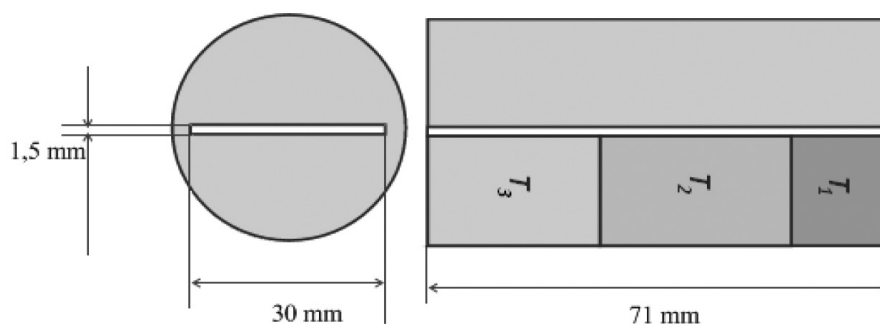


Рисунок 1 – Схема плоской фильеры

Математическая модель процесса формирования включает уравнения движения, неразрывности и энергии с учетом диссипации кинетической энергии, температурной зависимости реологических свойств и теплоты изменения агрегатного состояния при отвердевании жидкого шликера.

Стационарное течение шликера происходит в ламинарном режиме под действием силы давления, тяжести и трения. При указанных выше условиях систему уравнения движения и теплообмена в плоской фильере можно записать в приближении узкого канала [4,5]:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial \tau_0}{\partial y} + \rho g \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\rho u c_p \frac{\partial t}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + H_k \left(u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения: x, y – продольная и поперечная координаты; u, v – продольная и поперечная компоненты вектора скорости; $p, \rho, t, \tau, c_p, \mu, \lambda$ – давление, плотность, температура, предельное напряжение сдвига, коэффициенты теплоемкости, пластиче-

ской вязкости и теплопроводности шликера, соответственно, H_k – теплота изменения агрегатного состояния.

Плотность термопластичного шликера определяются плотностями порошка оксида бериллия и связки, концентрацией связки:

$$\rho = \frac{\rho_{mb} \cdot \rho_{cb}}{(1 - \omega)\rho_{cb} + \omega \cdot \rho_{mb}} \quad (\text{г/см}^3), \quad (4)$$

где ρ_{mb} – плотность оксида бериллия, ρ_{cb} – плотность связки, ω – объемная концентрация связки.

Плотность связки зависит от температуры и определяется эмпирической формулой по опытными данным [2]:

$$\rho_{cb}(T) = 0,83 + 0,062 \cdot \cos[\pi(0,035 \cdot (t + 273) - 5,15)] \quad (\text{г/см}^3) \quad (5)$$

Плотность оксида бериллия составляет $\rho_{mb} = 3,047$ г/см³. Плотность связки в диапазоне температур от 75°C до 40°C изменяется в пределах $\rho_{cb} = (0,773 - 0,9)$ г/см³ и в соответствии с этим при отвердевании плотность термопластичного шликера возрастает от $\rho = 2,355$ г/см³ до $\rho = 2,48$ г/см³.

Ультразвуковое (УЗ) воздействие оказывает

влияние на реологические свойства шликера. Коэффициент пластической вязкости μ и предел текучести τ_0 шликера зависят от температуры t и опытные данные при относительном массовом содержании связки $\omega = 0,117$ до УЗ воздействия описываются эмпирическими зависимостями по опытными данным [2,6]:

$$\mu(t) = 293,6259 \cdot \exp(-0,05816 \cdot t) \quad (\text{Па} \cdot \text{с}) \quad (6)$$

$$\tau_0(t) = 11,4 + 11,41 \cdot \exp\left(-\frac{t - 70,05}{5,47}\right) \quad (\text{Па}) \quad (7)$$

а после УЗ воздействия:

$$\mu(t) = 629,544 \cdot \exp(-0,0709 \cdot t) \quad (\text{Па} \cdot \text{с}) \quad (8)$$

$$\tau_0(t) = 18,1 + 8,3 \cdot \exp\left(-\frac{t - 69}{4,8}\right) \quad (\text{Па}) \quad (9)$$

Как показывают опытные данные [2], ультразвуковое воздействие практически не оказывает влияния на теплопроводность и теплоемкость

шликера, и зависят от температуры в виде для $\omega = 0,117$:

$$\lambda = 1,6 + 4,8 \cdot \exp(-0,017 \cdot t), \quad (10)$$

$$c_p(t) = 70 + 1070 \cdot \exp(0,0027 \cdot t) \quad (11)$$

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

Теплота перехода агрегатного состояния при отвердевании шликера оксида бериллия находилась по опытным данным и равна $H_k = 7800$ Дж/кг [7].

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

$$\int_0^h \rho u dy = \rho_0 u_0 h. \quad (12)$$

Система уравнения (1) – (3) решается при граничных условиях. Распределения скорости и температуры на входе принимаются постоянной

по сечению канала, соответственно, постоянны все теплофизические свойства шликера:

$$\text{при } x = 0: u = u_0, v = 0, T = T_0. \quad (13)$$

На осевой плоскости полости принимаются условия симметричности:

$$\text{при } x > 0, y = 0: \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = v = 0, \quad (14)$$

В процессе формования имеет место скольжение термопластичного шликера на стенке. Скорость скольжения определяется под действи-

ем силы давления и трения. Условие скольжения для продольной скорости на стенке можно найти из выражения:

$$\text{при } x > 0, y = h: -\frac{dp}{dx} = \frac{1}{h} \left(\tau_{0w} + \left(\mu_0 \frac{\partial u}{\partial y} \right)_w \right). \quad (15)$$

Теплообмен в полости происходит в соответствии с величинами температуры в контурах охлаждения. Предполагается, что температура стенки полости на каждом участке поддерживается постоянной, равной температуре охлажда-

ющей жидкости. Обозначая температуру воды в первом, втором и третьем контурах T_1, T_2, T_3 соответственно, граничные условия для температуры на стенке имеют вид [8]:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq z < l_1, r = r_1: T &= T_1, \\ \text{при } l_1 \leq z < l_2, r = r_1: T &= T_2, \\ \text{при } l_2 \leq z < l_3, r = r_1: T &= T_3. \end{aligned} \quad (16)$$

Для удобства решения система уравнений (1)–(16) приводится к безразмерным переменным. Координаты x, y делятся на половину толщины плоской фильеры h , компоненты вектора скорости u и v на u_0 , давление p на динамический напор $\rho_0 v_0^2$, температура T на T_0 , плотность, предел текучести, коэффициенты теплоемко-

сти, вязкости, теплопроводности на значения этих величин при температуре T_0 . При безразмерных переменных в систему уравнений (1) входят определяющие критерии Рейнольдса $Re = \rho_0 v_0 h / \mu_0$, Прандтля $Pr = c_p \mu_0 / \lambda_0$ и Пекле $Pe = Re \cdot Pr$.

Решение системы уравнения (1)-(12) при граничных условиях (13)–(16) проводится численным методом. Рассматриваемая область разбивается на элементарные ячейки со сторонами $\Delta z_i, \Delta r_j$. Разностные аналоги уравнения движения и энергии получены по неявной схеме Кранка-Никольсона второго порядка точности, а разностный аналог уравнения неразрывности – двухслойной схемой второго порядка точности. Градиент давления определяется методом расщепления из условия сохранения расхода (12), интеграл решается методом Симпсона 4-го порядка точности. Данный алгоритм расчета системы уравнения (1)-(12) был использован для решения задачи [9].

Обсуждение расчетных данных

Расчеты проводились при двух значениях половины толщины $h=0,75$ мм, 1,5 мм и ширине мм формообразующей полости, скоростях литья 1,0 м/мин, 2,0 м/мин. Числа Рейнольдса – низкие из-за высокой вязкости и малости толщины плоской полости, изменялись от $Re=0,0096$ до $Re=0,0386$. Число Прандтля, вычисленное по начальным свойствам шликера, равнялись $Pr=1431,6$ при ультразвуковом воздействии и $Pr=1783,7$ – без ультразвукового воздействия. Число Пекле изменялось в пределах от $Pe=13,7$ до $Pe=68,8$. Отсюда следует, что на перенос тепла влияние может оказать не только теплопроводность, но и конвекция за счет литейной скорости шликерной массы.

На рис. 2 представлены распределения температуры и продольной компоненты скорости в трех тепловых контурах плоской фильеры при толщине полости мм и скорости литья $u_0=1,0$ м/мин без ультразвукового (рис.2,a) и с ультразвуковым воздействием (рис.2,b). Продольная компонента скорости и температура шликера на входе в канал постоянны по сечению, и равны $u=u_0, T=T_0$. Ввиду высокой вязкости термопластичного шликера профиль продольной компоненты скорости принимает форму сдвигового течения жидкости вблизи входного сечения (рис. 2). На стенке значение скорости скольжения практически равно нулю. В первом контуре охлаждения температура стенки равна $T_1=730$ С и в этой области поле температуры изменяется от $T=75^{\circ}\text{C}$ до $T=73^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Изолинии температуры (изотермы) показывают области постоянных значений температуры и внутреннюю структуру шликерной массы, находящейся в жидком состоянии.

Во втором контуре охлаждения температура стенки равна $T_2=59^{\circ}\text{C}$. Резкое снижение температуры стенки вызывает рост интенсивности охлаждения шликерной массы, а также приводит к изменению реологических и теплофизических свойств шликера. Динамическая вязкость $\mu(T)$, плотность $\rho(T)$ и предельное напряжение сдвига $\tau_0(T)$ возрастают с понижением температуры, и вязкопластическое свойство шликера явно начинает проявляться. Шликер скользит по стенке полости, и скорость скольжения возрастает вниз по длине второго контура. Это приводит к тому, что профиль продольной компоненты скорости вниз по течению будет выпрямляться с постоянным ядром в приосевой области (рис. 2,a).

Рост теплосъема стенки во втором контуре охлаждения приводит к снижению поле температуры (рис. 2). В начале второго контура имеются переходная область, где поле температуры переменное и выражает переход шликера из жидкого состояния в вязкопластическое. В этой области температура шликера изменяется от $T=73^{\circ}\text{C}$ до $T=59^{\circ}\text{C}$ и определяет верхнюю границу области с постоянной температурой $T=59^{\circ}\text{C}$. Вблизи стенки шликерная масса находится в вязкопластическом состоянии из-за теплосъема, тогда как в средней части полости шликер находится в жидком состоянии. Наличие различных структурных состояний по сечению приводит к изменению реологических и теплофизических свойств шликера. По мере движения шликерной массы изотермы становятся плоскими, и температурное поле будет равномерным по сечению полости. Теплофизические свойства становятся однородными, и вся масса шликера переходит в вязкопластическое состояние.

Температура стенки в третьем контуре охлаждения равна $T_3=45^{\circ}\text{C}$, что приводит к дальнейшему охлаждению шликерной массы и снижению температуры от $T=59^{\circ}\text{C}$ до $T=45^{\circ}\text{C}$ в области перехода. Согласно опытным данным изменение агрегатного состояния происходит при температуре $T_f=55^{\circ}\text{C}$. В уравнении энергии (3) выделение тепла при изменении агрегатного состояния происходит из-за отвердевания вязкопластичного шликера. Отвердевание приводит к изменению плотности шликера. В области перехода имеются градиенты плотности $\frac{\partial \rho}{\partial x}, \frac{\partial \rho}{\partial y}$, и на распределение поле температуры

оказывает влияние теплота перехода агрегатного состояния.

В третьем контуре наблюдается дальнейшее возрастание скорости скольжения на стенке, что приводит к выравниванию продольной компоненты скорости по сечению полости и на выходе из фильеры имеет место практически поршневое распределение (рис.2). В этой области происходит переход от вязкопластического состояния в твердопластическое, изотермы – практически плоские линии, реологические и теплофизические свойства – однородны (рис.2). Шликерная масса полностью отвердевает в формообразующей полости. Это может означать, что керамическое изделие из оксида бериллия BeO полностью приобрело конструкционную форму для дальнейшей обработки.

Отсюда следует, что при скорости литья $u_0=1$ м/мин завершается формирование шликерной

массы по длине плоской фильеры и на выходе получается плоская керамическая пластина из оксида бериллия.

Сравнивая температурное поле шликера в полости без ультразвукового (рис.2,a) и с ультразвуковым воздействием (рис.2,b) можно заметить различие в распределениях изотерм. В случае ультразвукового воздействия (рис.2,b) в зонах перехода контура охлаждения структурное изменение шликера занимает больше области, чем без ультразвукового воздействия. Это объясняется повышением текучести шликера при ультразвуковом воздействии из-за улучшения реологических свойств.

Расчетные данные подтверждают опытный факт, что ультразвуковое воздействие, повышая текучесть шликера, снижает величину скорости литья в процессе формирования для получения керамического изделия.

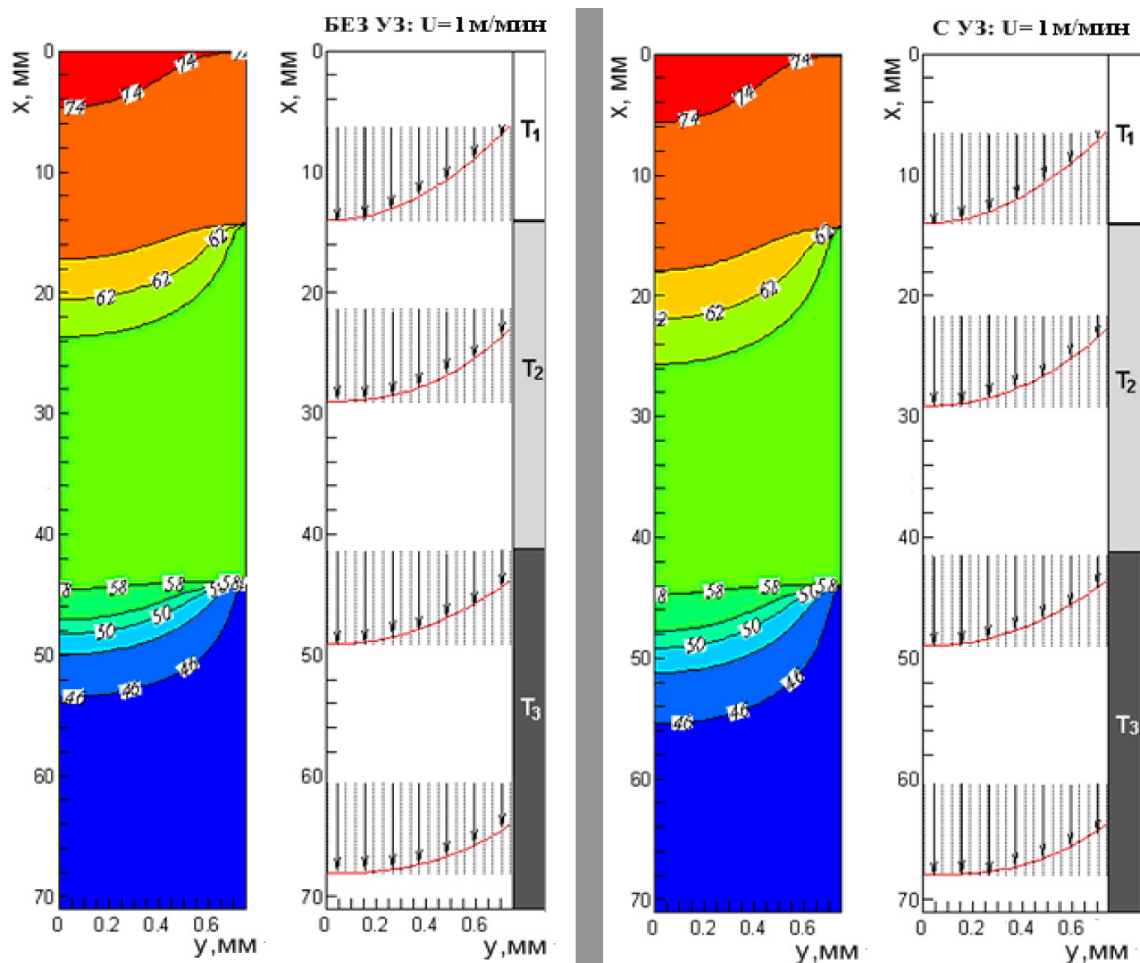


Рисунок 2 – Распределение температуры и продольной скорости в полости без (а) и с ультразвуковым воздействием (б): $h = 0.75$ мм, $u_0 = 1,0$ м/мин

Рост скорости литья в два раза 2,0м/мин при прочих одинаковых условиях оказывает влияние на структурное изменение шликера. Здесь также

приведены расчетные данные без ультразвукового (рис.3,а) и с ультразвуковым воздействием (рис.3,б).

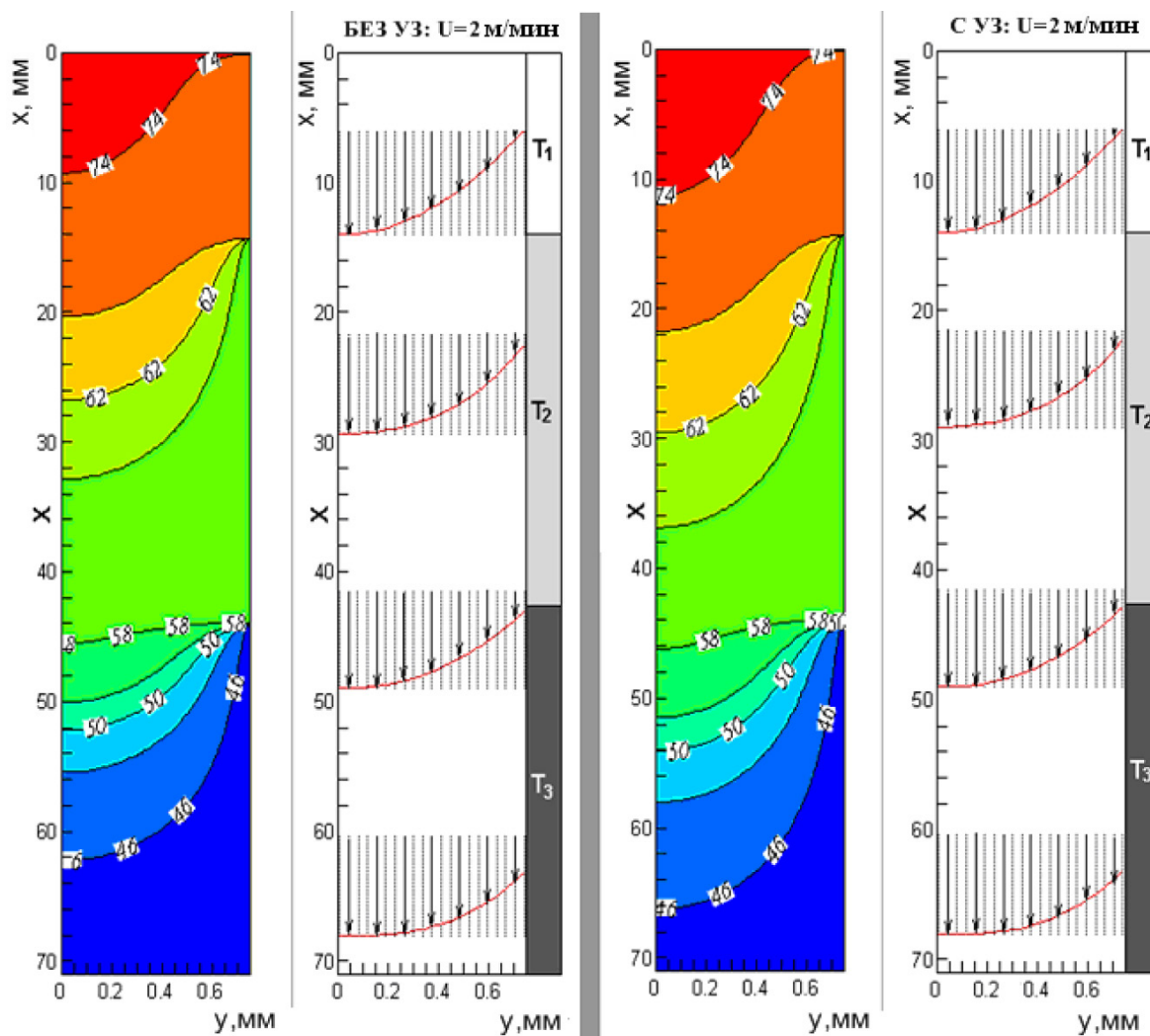


Рисунок 3 – Распределение температуры и продольной скорости в полости без (а) и с ультразвуковым воздействием (б): $h = 0,75$ мм, $u_0 = 2,0$ м/мин

В отличие от предыдущего режима формирования рост скорости литья приводит к увеличению области перехода структурных изменений из одного состояния в другое, т.е. от жидкого состояния в вязкопластическое состояние и от вязкопластического состояния в твердопласти-

ческое состояние. Это заметно из распределений изотерм, и объясняется ростом конвективной составляющей теплового потока.

Плотность теплового потока на стенке характеризует теплообмен между шликером и стенкой полости и ее выражения имеет вид:

$$q_w = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_w, \quad (17)$$

Здесь переменные записаны в безразмерных переменных, как в уравнении энергии (3).

На рис. 4 приведено изменение плотности теплового потока по длине полости плоской фильеры для скорости литья $u_0 = 1,0$ м/мин и толщины плоской фильеры $h = 0,75$ мм.

В первом контуре охлаждения температура стенки равняется $T_1 = 73^\circ\text{C}$, наблюдается незначительное изменение плотности теплового потока на стенке q_w и вызвана небольшой разницей между начальной температурой горячего шликера T_0 и температурой стенки T_1 .

Во втором контуре охлаждения снижение

температуры стенки до $T_2 = 59^\circ\text{C}$ приводит к резкому росту плотности теплового потока q_w в узкой зоне переходной области из-за скачкообразного снижения температуры стенки от $T_1 = 73^\circ\text{C}$ до $T_2 = 59^\circ\text{C}$. Вниз по направлению движения q_w монотонно стремится к нулю из-за выравнивания температурного поля шликера.

Аналогичным образом происходит изменение плотности теплового потока в третьем контуре охлаждения из-за скачкообразное снижение температуры стенки от $T_2 = 59^\circ\text{C}$ до $T_3 = 45^\circ\text{C}$ с монотонным падением по мере выравнивания поле температуры.

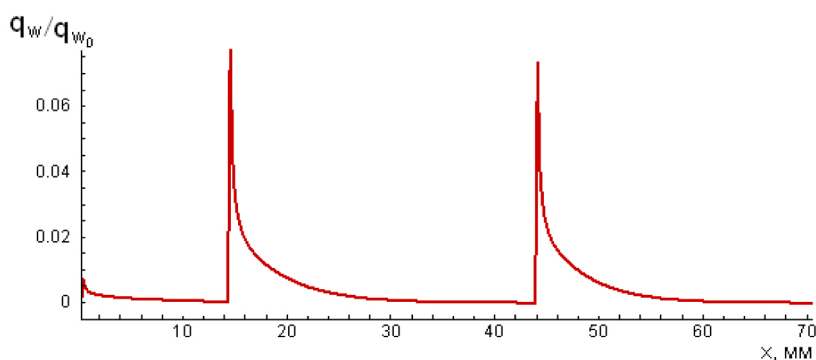


Рисунок 4 – Изменение плотности потока тепла на стенке по длине полости: $h = 0,75$ мм, $u_0 = 1,0$ м/мин

Процесс перехода шликера из одного структурного состояния в другое в полости можно судить и по изменению поле плотности. На рис. 5 показано изменение плотности шликера по длине осевой плоскости полости фильеры для скорости литья $u_0 = 1,0$ м/мин и толщины плоской фильеры $h = 0,75$ мм. По длине первого контура охлаждения изменение плотности – незначительное, т.е. шликер практически сохраняет на-

чальное жидкое состояние. Во втором контуре происходит рост плотности шликера практически от 1,0 до 1,02 и стабилизация ее значения до конца этого участка, т.е. имеет место переход шликера из жидкого состояния в вязкопластическое. В третьем контуре плотность шликера растет от 1,02 до 1,04, шликер отвердевает и переходит из вязкопластического состояния в твердопластическое [2,6].

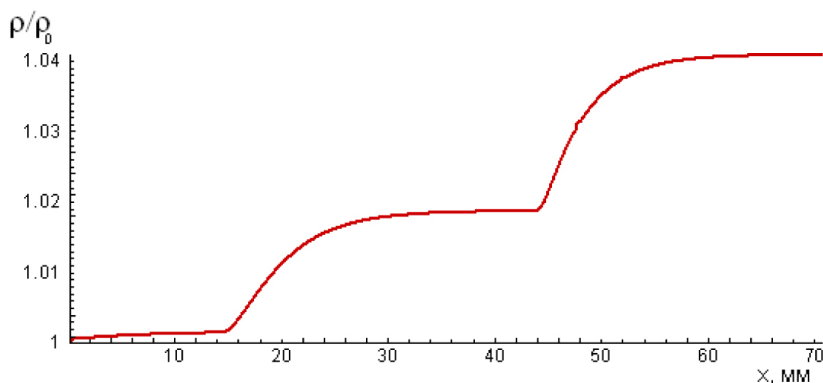


Рисунок 5 – Изменение плотности шликера по длине полости: $h = 0,75$ мм, $u_0 = 1,0$ м/мин

Таким образом, расчетные данные показывают, что для заданной толщины полости плоской фильеры можно найти оптимальные значения скорости литья для получения керамических изделий из оксида бериллия.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы.

1. Разработанная математическая модель процесса формования керамики в плоской формообразующей полости позволяет описать структурное изменение шликера при перехода из жидкого состояния в вязкопластическое и из вязкопластического состояния в твердопластическое.

2. Расчеты проведены при высоких скоростях литья $u_0 = 1,0$ м/мин, $2,0$ м/мин для толщины плоской полости $h = 0,75$ мм, $h = 1,5$ мм без ультразвукового воздействия и с ультразвуковым воздействием. Ультразвуковое воздействие улучшает реологические свойства и повышает текучесть термопластичного шликера в формообразующей полости. Показано, что для заданной толщины плоской фильеры можно найти оптимальную скорость литья для получения керамического материала из оксида бериллия.

3. Расчетные данные описывают всю стадию формования керамики с учетом изменения ее агрегатного состояния и позволили:

- выявить закономерности движения и теплообмена, определяющие внутреннюю структуру процесса формования и установить влияние режимных параметров (скорости, температуры охлаждающей жидкости, конструктивных данных) на процесс отвердевания шликерной массы;

- определить закон изменения плотности теплового потока на стенке формообразующей полости для управления процессом формования бериллиевой керамики.

Литература

1 Кийко В.С., Макурин Ю.Н., Ивановский А.Л. Керамика на основе оксида бериллия: получение, физико-химические свойства, применение. – Екатеринбург: УРО РАН, 2006. – 440 с.

2 Шахов С.А., Бицоев Г.Д. Применение ультразвука при производстве высокотеплопроводных керамических изделий. – Усть-Каменогорск, 1999. – 145 с.

3 Кениг В.К., Зорин Б.Л., Кишлянова А.А., Аринова И.Р. Разработка технологии получения керамического материала из оксида бериллия с заданными свойствами // Цветные металлы. – 2011. – №1. – С. 70-72.

4 Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. Т.2: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 728–392 с.

5 Zhabbasbayev U.K., Kaltayev A., Bitsoyev G.D., Turnayev S.K. Hydrodynamics of moulding of ceramic articles from beryllium oxide with ultrasonic activation // Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando. – 2005. – Pt. 3. –177 p.

6 Шахов С.А., Гагарин А.Е. Реологические характеристики термопластичных дисперсных систем, обработанных ультразвуком // Стекло и керамика –2008. – №4. – С.19–21.

7 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.

8 Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с.

9 Жапбасбаев У.К., Рамазанова Г.И., Саттинова З.К. Математическая модель процесса формования керамики методом горячего литья // Стекло и керамика. –2011. –№7. – С.216–220.

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

Жазық фильерде бериллий қышқылының жылу иілімді шликерін қалыптастыру кезінде құрылымдық өзгерістерді зерттеу

Жазық каналда бериллий оксиді термопласт шликерін формалау процесінің математикалық моделімен сандық зерттеу нәтижелері келтіріледі. Ыстықтай құю әдісі арқылы формалау процесінде керамикаға біртекті құрылым беретін тиімді құю режимдері анықталған.

Түйін сөздер: жылу иілімді шликер, керамика, ыстық балқыту әдісі, математикалық модель.

U.K. Zhabasbayev, G.I. Ramazanov, Z.K. Sattinova

Research of structural changes in the molding of thermoplastic slip beryllium oxide in flat spinneret

The results of modeling of ceramic forming process by the hot casting method are illustrated. Mathematical model describes the motion of liquid thermoplastic ceramic slurry in molding cavity subject to solidification. Casting characteristics, which providing uniform property of ceramics in forming process by the hot casting method, are determined.

Keywords: thermoplastic slip, pottery, hot casting method, a mathematical model.