

Исследование процесса литья керамического шликера под низким давлением

М. А. Петров¹, М. В. Корнюшин², А. В. Смирнов², В. В. Рыбальченко³

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Российский университет транспорта, Москва, Россия

Аннотация. Современные технологии изготовления керамических деталей развиваются вместе с развитием и самих инженерных материалов. Интересным является способ литья керамической суспензии под низким давлением. В статье рассматриваются эксперименты по изучению реологических характеристик корундового шликера, который при температурах литья представляет собой густую суспензию, и численное моделирование простых и сложных прототипов деталей. Получено хорошее совпадение результатов по экспериментальному и численному изучению литейной способности шликера.

Ключевые слова: алюмооксидная керамика, вязкость керамической суспензии, течение суспензии, литейная способность суспензии, литьё под низким давлением, численное моделирование, CFD.

Research into the low pressure casting of ceramic slurry

M. A. Petrov¹, M. V. Kornyushin², A. V. Smirnov², V. V. Rybalchenko³

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

³Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Abstract. Modern technologies for ceramic parts manufacturing are developing parallel with the development of engineering materials. A low-pressure casting process of slurry is a rather new one process, applied to engineering ceramics. To master it, a series of experiments are conducted to study the rheological characteristics of corundum-based slurry, which represents thick slurry at casting temperatures, and numerical simulation of simple and complex prototypes manufacturing. Good agreement was obtained between the results of experimental and numerical study of the slurry's flowability.

Keywords: alumina ceramics, viscosity of ceramic slurry, slurry flow, flowability of ceramic slurry, low-pressure casting, numerical simulation, CFD.

Введение

Изготовление керамических деталей является актуальной задачей. Технологии обработки керамических материалов до готовых изделий включают следующие способы формообразования: сухое, мокрое и пластическое. При сухом варианте керамические порошки спрессовывают или компактируют под высокими давлениями (одноосное или всестороннее сжатие). При мокром варианте керамический материал доводится до вида суспензии, которой далее одним из методов литья (шликерное, на ленту, намораживание, под давлением и т.д.) придаётся требуемая форма. В третьем варианте керамический материал представляет собой пластическую массу, которой методами обработки давлением придают нужную форму. После выполнения формообразующей операции получаемые «зелёные», хрупкие изделия подвергают термообработке, в процессе которой удаляется связующее и достигается консолидация частиц, повышаются прочностные характеристики детали.

Технология горячего шликерного литья (ГШЛ) [1, 2] расширила группу технологических процессов по работе с керамическими суспензиями. На рисунке 1 представлена УГШЛ, которая по своей схеме напоминает установку для литья под низким давлением или ЛНД (данный способ также известен, как литьё под регулируемым давлением, литьё на компрессорных машинах), применяемую в литейном производстве [3, 4], для которого избыточное давление, оказываемое воздействие на поверхность расплава, составляет, как правило, не более 1 атм. Преимуществом данного процесса является плавное заполнение полости формы за счёт создания ламинарного потока шликера, поднимающегося из тигля по литнику (металлопроводу) к питателью и в форму. Время заполнения и значение прикладываемого внешнего давления (P) регулируется и влияет на качество заполнения формы, согласно уравнению (1). Ламинарное течение позволяет избежать турбулентно-дисперсионного течения материала в форме. Соблюдение ламинарного течения является выполнение условия, согласно уравнению (2). В

упрощённом виде скорость потока и/или заполнения формы может быть определена по уравнению (3) [5, 6].

$$P = P_{\phi} + P_m = k \rho g (h_{\phi} + h_m), \quad (1)$$

$$Re_{\text{лам}} = \frac{\nu d}{\eta} = \frac{\nu d \rho}{\eta} < 2300, \quad (2)$$

$$\nu = k \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \quad (3)$$

где P_{ϕ} и P_m – давление, необходимое для заполнения формы и для поднятия суспензии по металлопроводу соответственно, [Па]; ρ – плотность суспензии, [$\text{кг}/\text{м}^3$]; g – ускорение свободного падения, [$\text{м}/\text{с}^2$]; h_{ϕ} и h_m – высота формы отливки и металлопровода соответственно, [м]; k – коэффициент, учитывающий гидравлические сопротивления, [-]; ν – скорость потока суспензии, [$\text{м}/\text{с}$]; d – средний диаметр потока, [м]; ν – кинематическая вязкость, [$\text{м}^2/\text{с}$]; η – динамическая вязкость, [Па с].

Постановка задачи

Исследуемый материал – парафиновый шликер на основе корундовой шихты с содержанием оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) не менее 94 %, марки ВК-94-1 или 22ХС. Химический состав вакуумплотной керамики представлен в таблице 1. Шликер находится в твёрдом состоянии при комнатной температуре и плавится/криSTALLизуется в температурном интервале 70 °С...100 °С.

Таблица 1. Химический состав ВК-94-1 (согласно ГОСТ Р 70659-2023)

Al_2O_3	SiO_2	Cr_2O_3	MgO_2
94,4	2,8	0,5	2,3

На рисунке 1 представлена упрощённая схема установки горячего шликерного литья (УГШЛ) от компании «ЭКОН» [2], являющаяся также расчётной схемой для численного моделирования процесса ЛНД. Задачи для численного моделирования разделены на две группы. Первая группа задач направлена на определение текучести материала. Задачи второй группы подразумевают изготовление нескольких отливок-демонстраторов. Детали размещаются внутри формы по одной, а также в виде гроздей (рис. 2).

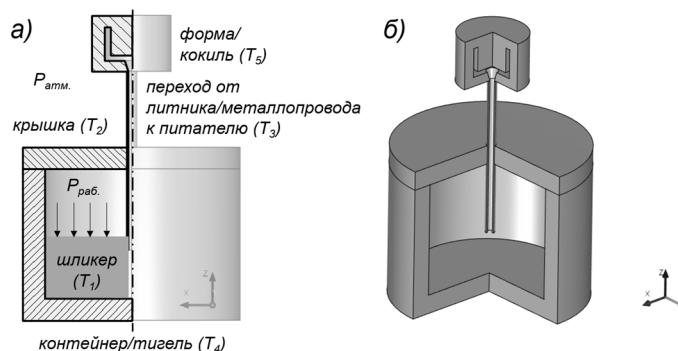


Рисунок 1. Исходная геометрия в 2D-постановке (а), с указанием пяти контролируемых областей нагрева, и 3D-постановке (б)

При литье керамического шликера необходимо учитывать процессы теплообмена с тиглем и формой, так как при температуре свыше 160 °С парафин начинает кипеть и испаряться. Поскольку перед заливкой формы подвергаются вакуумированию, то растворимость выделяющегося газа в жидкой фазе снижается. Этот этап необходим для устранения внутренней пористости керамической отливки. В процессе движения шликера по каналам его жидкотекучесть может изменяться. Так, с падением температуры увеличивается внутреннее трение или динамическая/кинематическая вязкость, и жидкотекучесть снижается.

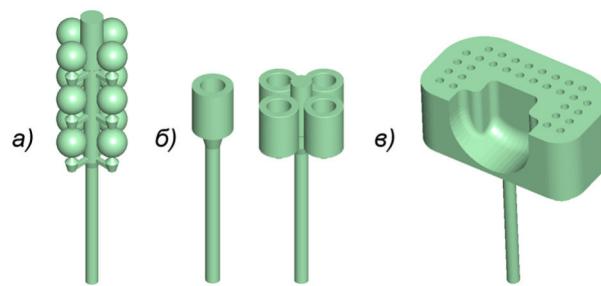


Рисунок 2. Группа отливок, рассматриваемых в рамках задачи 2: шарик (а), стаканчик (б) и смеситель (в)

Описание изменения вязкости материала или его реологические свойства с изменением температуры могут быть описаны уравнением (4) для густой суспензии, которое состоит из двух слагаемых: первое слагаемое отвечает за характер течения суспензии внутри ёмкости по всему объёму, а второе – за пристеночное течение, а также уравнением (2), закон Гершеля-Балкли, согласно уравнению (5) [7, 8, 9].

$$P = 2(\sigma_0 + \alpha_1 V^m) \ln\left(\frac{D_0}{D}\right) + 4(\tau_0 + \beta_1 V^n) \frac{L}{D}, \quad \sigma_0 = \frac{F}{\pi L^2 \tan^2 \theta}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

где σ_0 – предел текучести материала, измеренный при помощи конусного пенетрометра, [Па]; F – прикладываемая сила, [Н]; θ – половина угла конуса при вершине, [град]; L – глубина внедрения, [м]; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, [с^{-1}]).

Целью исследования является численное моделирование процесса ЛНД для получения отливок сложной конфигурации из корундовой керамики. Обозначенная цель достигается выполнением следующих задач: 1) выполнение экспериментов для оценки реологических свойств керамического шлиker'a; 2) геометрическое проектирование области для выполнения численного моделирования; 3) проверка качества геометрии при помощи технологии быстрого прототипирования – настольная фотополимерная 3D-печать (технология LCD); 4) задание граничных условий и свойств шлиker'a; 5) анализ полученных результатов.

Экспериментальные исследования

На рисунке 3 показана схема выполнения эксперимента по характеристике материала с определением контрольных интервалов температур стабильного агрегатного состояния и его визуальной фиксацией. На нагреваемое основание (1) устанавливается тигель с материалом (2) и закрывается защитным экраном для уменьшения конвективного теплообмена с окружающей средой. При помощи четырёх термопар типа К выполняется измерение температур: в донной части тигля (T1), окружающей среды (T2), периодическое измерение температуры основания (T3) и на расстоянии 100 [мм] от основания тигля внутри защитного экрана (T4). Литейная способность начинает резко снижаться при температуре 80 °C и ниже. В жидком состоянии шлиker'я является весьма густым.

Определение вязкости выполнено на реометре AntonPaar QC по схеме «цилиндр–цилиндр» ($\varnothing 27$ мм), оборудованном нагревательной камерой C-PTD 180/AIR/QC. На рисунке 4 представлены графики изменения динамической вязкости в интервале температур 70...110 °C, для максимальной скорости сдвига/среза $\dot{\gamma} = 100$ [с^{-1}].

Оценка текучести шлиker'a выполнялась в специальной оснастке ПЛС-1 (рис. 5), устанавливаемой вертикально на машине ЭКОН-УГШЛ. Исходными условиями проведения эксперимента являлись давление на входе 2...3 [атм], температура шлиker'a $t_{ш} = 75$ °C, температура формы $t_{Ф} = 20$ °C. В зависимости от процента наполнителя ($\omega = 10...12\%_{\text{мас.}}$) и давления высота подъёма шлиker'a составляла 65...122 [мм]. Следует отметить, что при одном и том же проценте наполнения литейные способности увеличиваются с повышением прикладываемого давления.

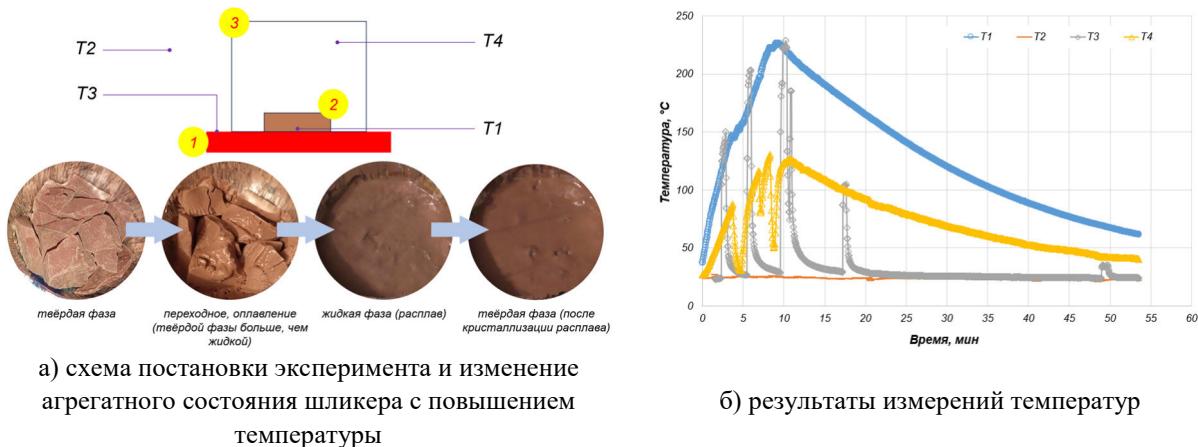


Рисунок 3. Изучение консистенции шликера

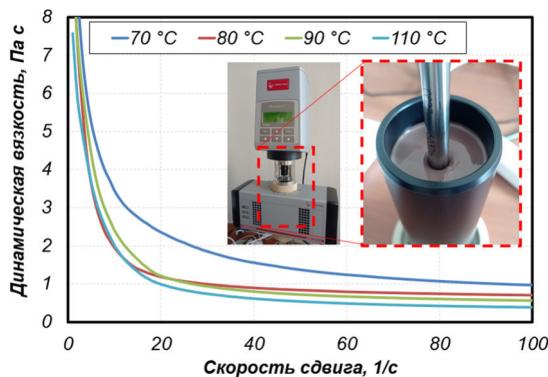


Рисунок 4. Графики изменения динамической вязкости от скорости сдвига

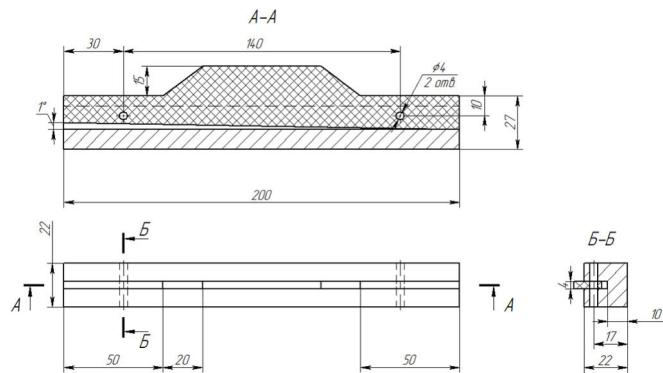


Рисунок 5. Чертёж оснастки для ПЛС-1

Численное моделирование

Численное моделирование в трёхмерной постановке выполнялось по методу многофазного течения материалов, находящихся в разных агрегатных состояниях. Volume of Fluid (VOF) [10, 11], позволяющий определить долю вещества в определённый момент времени, для которого решается уравнение переноса фаз, представлено уравнением (6). В качестве веществ выбраны воздух (газовая фаза) и парафин (жидкая фаза).

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V \nabla f = 0, \quad (6)$$

где f – объёмная доля фазы в ячейке.

Абсолютные значения температуры и давления (T_{abs} , P_{abs}) рассматриваются как суммы опорных значений (T_{ref} , P_{ref}) и избыточных, прикладываемых величин (T , P) [11]. За опорные значения приняты нормальные атмосферные условия: $T_{ref} = 293,15$ [К], $P_{ref} = 101000$ [Па]. Рассматривались две задачи на основании которых были сделаны выводы о наиболее благоприятных значениях граничных условий проведения процесса ЛНД. В первой задаче проверялись литейные способности шликера (ПЛС-1), а во второй задаче рассматривался собственно процесс изготовления прототипов отливок деталей.

Массовая скорость шликера определялась как отношение массового расхода к площади поперечного сечения входа (inlet). Для задачи проверки литейной способности шликера (задача 1) он составил 715 [$\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$], а для серии задач изготовления прототипов деталей (задача 2) – 2105 [$\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$]. Теоретическое время заполнения при заданном общем массовом расходе 0,01 [$\text{кг}/\text{с}$] для задачи 1 составило 0,126 [с], а для задачи 2 время заполнения 0,0341 [с]. Шаг по времени составил 0,001 [с].

Проверка корректности геометрии модели

Для численного моделирования процессов вычислительной гидродинамики (CFD) применяются специальные форматы представления геометрии. Для этого в программах компьютерного

геометрического моделирования (CAD) инструментами твердотельного моделирования проектируют интересующий объект, который затем экспортят в формат полигональной или фасеточной 3D-модели (*.stl, *.vrml, *.obj, *.ply и другие). Качество полигональной модели (ПМ) может не всегда удовлетворять требованиям, которые необходимы для выполнения численного моделирования. В современных CFD-программах, в том числе и в FlowVision, встроены инструменты контроля и исправления геометрии, помогающие сократить время на подготовку геометрии. Ещё одним способом проверки как качества геометрии, так и самой разработанной в виртуальной среде инструментами цифрового проектирования геометрии, является её изготовление методами быстрого прототипирования, например, при помощи настольной фотополимерной 3D-печати (метод Liquid Crystal Display (LCD)).

В качестве материала был выбран керамоподобный фотополимерный материал с массовой долей наполнителя не более $\omega = 10\ldots15\%_{\text{мас.}}$. Для 3D-печати выбрано оборудование Creality HalotOne. Подготовка управляющей программы выполнена в программе Halot Box. На рисунке 6 показаны этапы подготовки и результаты 3D-печати. Установлено, что диаметр канальцев, связывающих шарики с питателями, достаточно хрупки, что может привести к их разрушению при извлечении прототипов из формы УГШЛ в случае реализации технологии ЛНД. Также оказалось, что для изучаемых прототипов важны правильный выбор угла наклона к основной платформе и наличие поддерживающих структур.

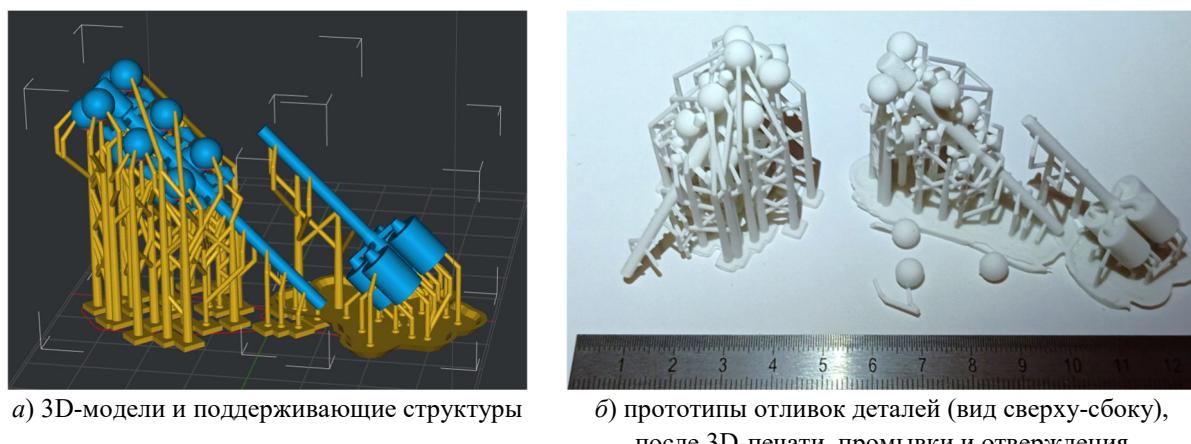


Рисунок 6. Подготовка управляющей программы (gcode, а) и готовые прототипы отливок (б)

Это обстоятельство может быть также важно и при ЛНД, так как каналцы могут играть роль местного сопротивления, что будет менять характер течения шликера. Полезным будет отметить и то, что из нескольких исследованных коммерческих керамоподобных шликеров при общем времени отверждения в УФ-печи 30 минут лишь при $\omega = 15\%_{\text{мас.}}$ тактильно чувствуется выступание наполнителя на поверхности прототипов. Отделение от поддержек целесообразнее производить до проведения отверждения в УФ-печи, так как поддерживающие структуру более пластичны до обработки, чем после. Отсутствие поддерживающих структур не позволяет напечатать шарики. Вышеизложенных проблем в случае изготовления грозди стаканчиков не наблюдается.

Обсуждение результатов

Установлено, что при разной температуре стенки (60°C против 80°C) вид полей фазового распределения (VOF) и температуры практически не изменяется, но изменяются численные значения, например $83,625^{\circ}\text{C}$ против $87,886^{\circ}\text{C}$. Поле же динамической вязкости отличается, так как в случае более высокой температуры стенки вязкость шликера ниже и его жидкотекучесть выше (рис. 7). При увеличении температуры наблюдается и рост проходимого шликером расстояния или его литейная способность, которое составляет $87,4\text{ [мм]}$ при температуре стенки 80°C . Так, в эксперименте при температуре стенки 20°C , давлении подачи $0,3\text{ [МПа]}$, или 3 [атм] , и $\omega = 10\%_{\text{мас.}}$ расстояние составляет 85 [мм] .

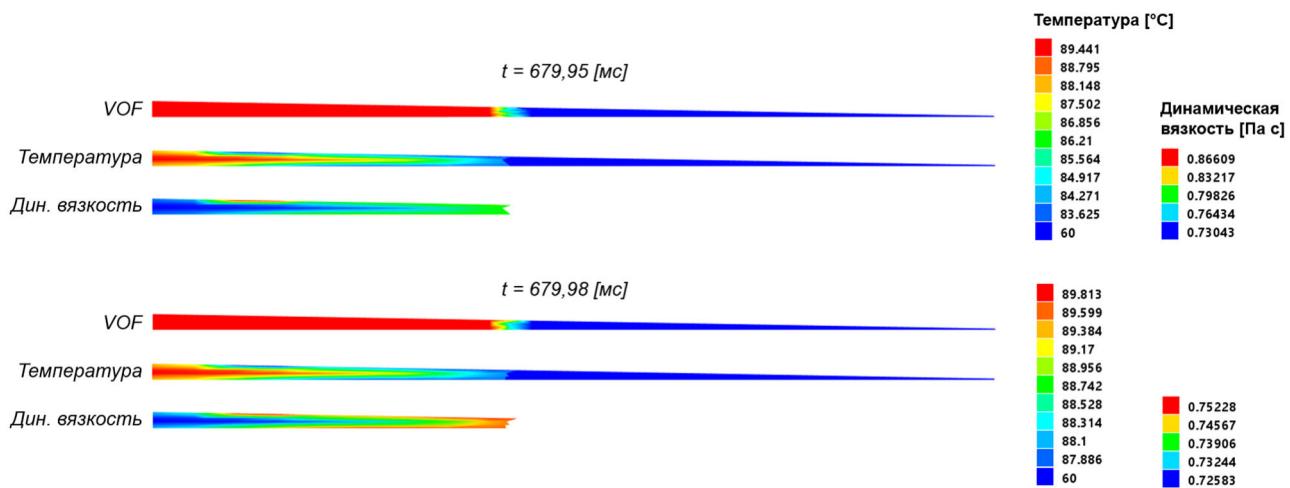


Рисунок 7. Расчётные поля для задачи 1, при разной температуре стенки: 60 °C (вверху) и 80 °C (внизу)

На рисунке 8 представлены полученные результаты по моделированию заливки грозди из 12 шариков. Начиная со среднего уровня, заполнение происходит неравномерно. К итоговому расчётному моменту времени 144,31 [мс] полного заполнения формы шликером не наблюдается, что указывает на необходимость увеличения входного давления. Задача о заполнении одного шарика показала, что, наоборот, давление на входе весьма высокое, так как вместо плавного заполнения формы наблюдается образование струи в полости шарика (эффект «фонтана»), её удар о верхнюю часть стенки и последующее турбулентно-дисперсное заполнение полости.

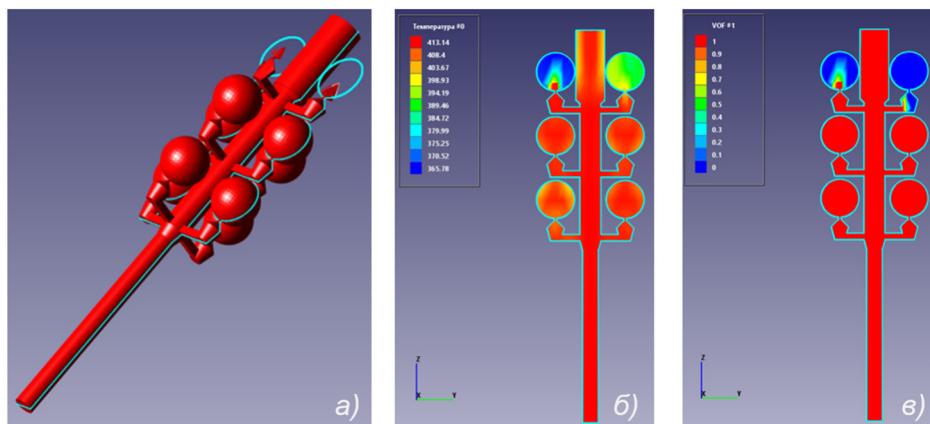


Рисунок 8. Поля распределения: доли шлиker'a к моменту времени 173,57 [мс] (а) и 172,02 [мс] (б),
и температуры к моменту времени 171,82 [мс] (в)

На рисунке 9 представлено распространение жидкой фазы (красный цвет) в рассматриваемом объёме для двухмерной и трёхмерной визуализации результатов по плоскости и по объёму соответственно для разных моментов времени (рис. 10). На основании полученной информации можно сделать вывод о том, что в области металлопровода происходит нерегулируемое заполнение по высоте, резкий удар в нижнюю часть формы, что может привести, как и в случае с отливкой шарика, к образованию турбулентно-дисперсионных потоков при смене направления движения суспензии и сильном её перегреве на этапе заполнения донной части стаканчика.

Также было установлено, что ближе к окончанию процесса заполнения формы в её верхней части наблюдается волнение жидкости, которое может нарушать процесс ламинарного течения, с образованием пор в верхних областях. Общее время заполнения формы составило 32,77 [мс] (рис. 10).

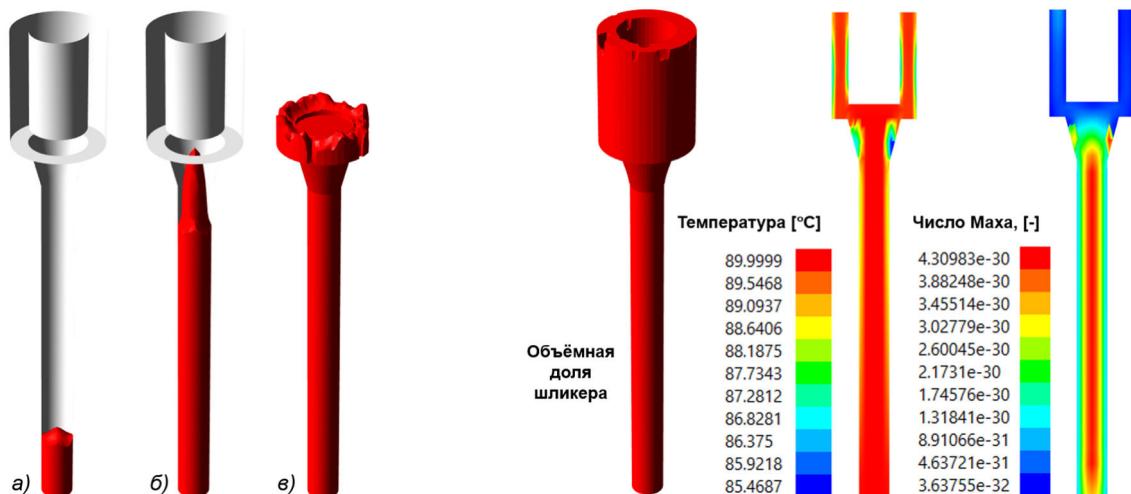


Рисунок 9. Распределение жидкой фазы в процессе её подачи в разные моменты времени:
(a) $t=1,35$ [мс]; (б) $t=10,40$ [мс]; (в) $t=18,35$ [мс]

Рисунок 10. Расчётные поля к моменту времени
 $t = 32,77$ [мс]

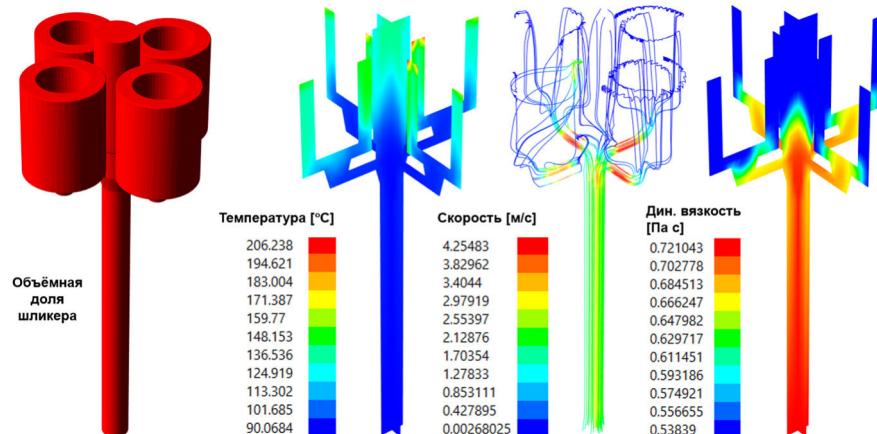


Рисунок 11. Расчётные поля к моменту времени $t = 170,08$ [мс]

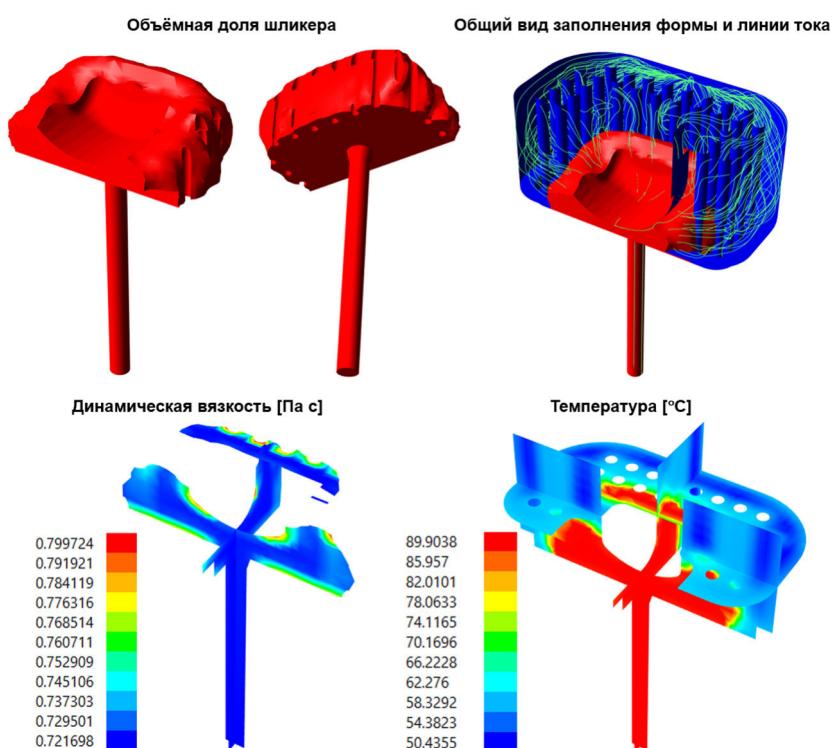


Рисунок 12. Расчётные поля к моменту времени $t = 169,06$ [мс]

Изготовление грозди из четырёх стаканчиков длится около 170 [мс] (рис. 11). Наблюдаются повышение скорости течения в питателе, что обусловлено уменьшением проходного сечения, хорошая литейная способность в области формы. И, наконец, наиболее сложная деталь – смеситель, показана 1/3 от общей высоты заливки, требует столько же времени заполнения, что и гроздь из четырёх стаканчиков (рис. 12). Наличие большого количества каналов с уменьшающимся в два раза диаметром по высоте может приводить к захолаживанию области и понижению литейной способности шлиkerа.

Выводы

В статье представлены результаты экспериментального и численного исследования процесса литья под низким давлением керамической суспензии. Показано, что в зависимости от сложности геометрии деталей и температурных условий изменяется жидкотекучесть корундового шлиkerа. Тurbulentno-dисперсное течение вызвано высокими скоростями заполнения. Для их устранения требуется более точный контроль давления на входе.

Было выполнено определение характера течения материала корундового шлиkerа и его консистенции в интересующем интервале температур обработки с графическим определением изменения динамической вязкости, которая использовалась для корректного описания течения шлиkerа в процессе численного моделирования ЛНД, и окна температур, гарантирующего жидкотекучесть шлиkerа. Изготовленные по технологии быстрого прототипирования (LCD) прототипы отливок из керамоподобного материала дали общее представление о правильности построения геометрии литейной грозди, в которой были отмечены слабые места. Моделирование литейной способности шлиkerа по схеме оснастки ПЛС-1 показало корректность задания граничных условий и свойств шлиkerа и хорошее совпадение с результатами экспериментов.

Список литературы

1. Грибовский П.О. Горячее литье керамических изделий: учеб. пособие. М.: Госэнергоиздат, 1961. 400 с.
2. ЭКОН. Установка горячего шликерного литья / НПП АО "Экон". URL: <https://econobninsk.ru/ru/produktsiya/litevye-ustanovki/ekon-ugshl> (дата обращения: 14.08.2025).
3. Степанов Ю.А., Баландин Г.Ф., Рыбкин В.А. Технология литейного производства. Специальные виды литья. М.: Машиностроение, 1983. 287 с.
4. Литьё под давлением / М.Б. Беккер, М.Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко, Р.А. Коротков, В.Я. Невзоров. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
5. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства. Специальные виды литья, М.: Академия, 2005. 352 с.
6. Белопухов А.К. Технологические режимы литья под давлением. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.
7. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.
8. Barnes H.A. A handbook of elementary rheology, Wales: Cambrian Printers, 2000. 200 p.
9. Открытый отчёт компании Anton Paar, Viscosity Measurement of Ceramic Slurries with the Rotational Rheometer RheolabQC. URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/services-support/document-finder/application-reports/ceramics-viscosity-measurement-of-ceramic-slurries-with-rheolabqc/> (дата обращения: 14.08.2025).
10. Sardarian M., Mirzaee O., Habibolahzadeh A. Numerical simulation and experimental investigation on jetting phenomenon in low pressure injection molding (LPIM) of alumina // Journal of Materials Processing Technology DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.12.014
11. FlowVision. Руководство пользователя FlowVision 3.13.04 / ООО «Тесис». 2023.