

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ШЛИКЕРНОГО ФОРМОВАНИЯ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

© 2012 П.Н. Скрипова, Л.Д. Сиротенко, С.Е. Порозова, А.М. Ханов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 13.03.2012

Представлены результаты численного исследования процесса центробежного формования суспензий на основе порошка диоксида циркония. Численное моделирование проводилось с использованием программного комплекса Flow Vision. Показано влияние схемы центробежного литья и скорости вращения формы на распределение концентрации, скорости, плотности и давления в объеме суспензий в процессе формования заготовок.

Ключевые слова: *центробежное формование, суспензия на основе диоксида циркония, численная модель, изоповерхность*

Центробежное формование является перспективным методом получения заготовок на основе шликерных составов, обеспечивающим высокую степень однородности микроструктуры и низкие значения пористости отливки по сравнению с традиционными методами шликерного литья [1, 2]. Сущность центробежного способа получения заготовок заключается в том, что в процессе вращения формы с равномерно распределенной в ней суспензией вокруг неподвижной оси в формуемой системе возникает прессующее давление, под воздействием которого происходит уплотнение твердой фазы, а из суспензии вытесняется слабосвязанная жидкая фаза со взвешенными в ней ультрадисперсными фракциями. Наиболее значимыми параметрами процесса центробежного формования являются характеристики суспензии и параметры формования. К характеристикам суспензии относятся: размер и форма частиц твердой фазы, их концентрация в шликере, вязкость дисперсионной среды и суспензии. Параметрами формования являются время и угловая скорость центробежного литья, распределение давления по объему суспензии, которое в значительной степени определяется геометрией контура формы и ее расположением относительно неподвижной оси в процессе вращения. Анализ литературных источников в области центробежного формования показывает, что наиболее эффективные результаты

по исследованию процесса формования заготовок удается получить, используя методы численного моделирования [3-5].

Цель работы: численное исследование влияния схемы и скорости центрифугирования на параметры формования керамических заготовок из диоксида циркония.

Для получения суспензии использовались дисперсионная среда и дисперсная фаза в соотношении 1:1. Дисперсионной средой служил 4% раствор поливинилового спирта, дисперсной фазой – нанопорошок диоксида циркония ZrO_2 , стабилизированный оксидом иттрия Y_2O_3 (дисперсная фаза), плотностью 6000 кг/м^3 . Для формования заготовок использовалась центрифуга марки MPW-351R. Центрифугирование производилось в течение 20 минут при значениях скорости 5000, 10000, 15000 об/мин, после чего происходило разделение суспензии на твердую и жидкую фазу, которая впоследствии удалялась (рис. 1). После сушки заготовки спекались в течение 2 часов при температуре 1400°C , затем методом гидростатического взвешивания определялась плотность образцов. Данные условия эксперимента были использованы для численного моделирования процесса центробежного формования с использованием модели свободной поверхности и модели концентрации программного комплекса Flow Vision. Численная модель предназначена для исследования двухфазных течений со свободной поверхностью, при этом физическая модель течения в общем случае предполагала трехмерную динамическую постановку задачи, многофазный поток (раствор поливинилового спирта и порошок диоксида циркония) и стандартную k-ε модель турбулентности.

Модель концентрации базируется на уравнениях Навье-Стокса, уравнении переноса функции заполнения F , уравнении концентрации и замыкается уравнениями турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Математическое описание процесса в указанной постановке включает в себя следующие соотношения:

Скрипова Полина Николаевна, ассистент кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: polinaskripova@gmail.com

Сиротенко Людмила Дмитриевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: sirotenko@pstu.ru

Порозова Светлана Евгеньевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Порошковое материаловедение». E-mail: keramik@pm.pstu.ac.ru

Ханов Алмаз Муллаянович, доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru

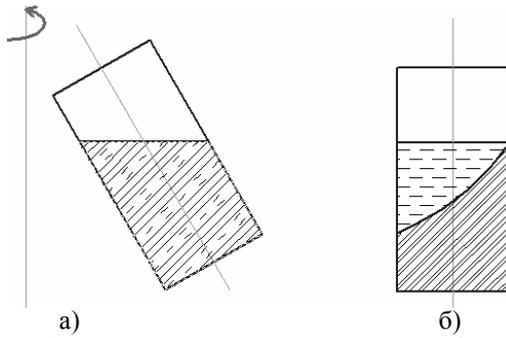


Рис. 1. Схема процесса центробежного формования: а) процесс центробежного формования; б) полученная заготовка

1. Уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot (V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu + \mu_m)(\nabla V + (\nabla V)^T) + \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g \quad (1)$$

$$\nabla V = 0 \quad (2)$$

2. Уравнение переноса функции заполнения:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0 \quad (3)$$

3. Уравнение концентрации:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (V \cdot C) = 0 \quad (4)$$

4. Уравнение турбулентной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \nabla \cdot (\rho V K) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_K} \right) \nabla K \right) + \mu_m G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

где $G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$, $D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot V + \frac{\rho K}{\mu_m} \right) \delta_{ij}$, S_{ij} – удвоенный тензор скоростей деформации,

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$$

5. Уравнение скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho V \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu_m G - C_2 f_1 \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (6)$$

где $\sigma_\varepsilon=1,3$, $C_1=1,44$, $C_2=1,92$ - константы.

Турбулентная вязкость определяется по формуле Колмогорова-Прандтля

$$\mu_m = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}$$

где $C_\mu=0,09$ – константа.

В уравнениях (1)-(6) приняты следующие обозначения: P – давление, Па; V – скорость, м/с; μ – вязкость, кг/м·с; μ_m – турбулентная вязкость; g – вектор силы тяжести, м/с²; ∇ – оператор Гамильтона; Δ – оператор Лапласа; t – время; ρ – плотность суспензии, кг/м³; ρ_{hyd} – плотность дисперсионной среды; F – степень заполнения

жидкостью ячейки: 0 – пустая ячейка; 1 – полностью заполненная ячейка; C – объемная концентрация твердой дисперсионной фазы, при этом концентрация дисперсионной среды определяется как $C_0=1 - C$; K – турбулентная энергия; $\sigma_K=1$ – константа; G – скорость генерации турбулентной энергии; ε – скорость диссипации турбулентной энергии.

Первые три этапа решения задачи, предполагающие отработку методики расчета и эксперимента, представляют численное моделирование течения дисперсионной среды без дисперсионной фазы при различных схемах центробежного формования. На первом этапе производилось численное моделирование течения дисперсионной среды, при условии, что геометрическая ось литейной формы совпадает с осью вращения (рис.2, а-в).

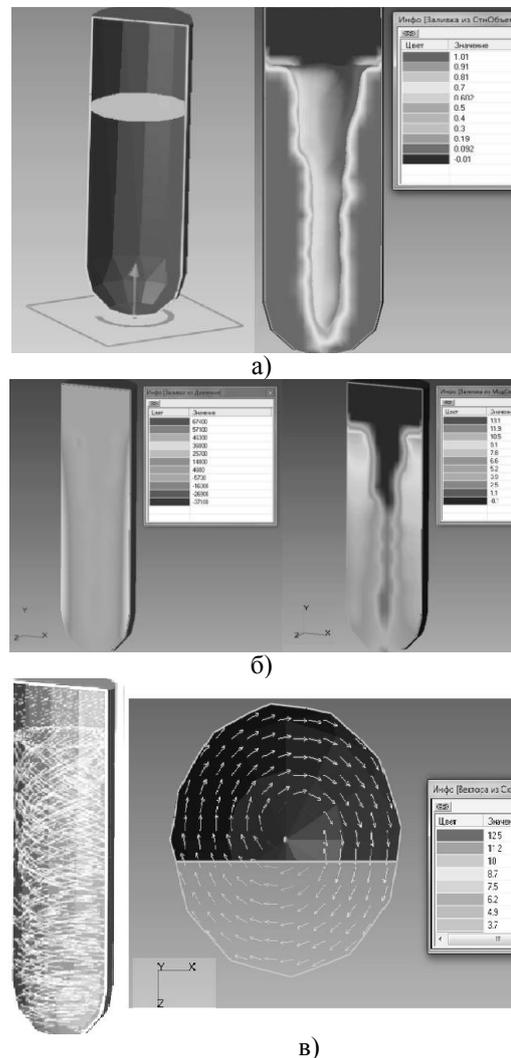


Рис. 2. Визуализация результатов численного моделирования течения дисперсионной среды при вращении вертикально расположенной литейной формы относительно своей оси:

а – схема центробежного формования и изоповерхность относительного объема жидкости (значение 1 соответствует жидкой среде); б – распределение давления и модуля скорости; в – «вспышки» скорости (линии тока жидкости) в продольном и вектора скорости в поперечном сечении формы

Второй этап решения задачи также предполагал моделирование течения дисперсионной среды без твердой дисперсной фазы, однако схема центробежного формования предполагала вращение вертикальной формы относительно оси, расположенной на расстоянии 0,089 м от оси литейной формы (рис 3, а-в). Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что при увеличении центробежного радиуса в соответствии с приведенными схемами центробежного формования давление на внешней стороне формы возрастает на два порядка, в то время как линейная скорость увеличивается в два раза.

Третий этап моделирования предполагал модификацию схемы центробежного формования дисперсионной среды, представленной на рис. 2, посредством наклона формы на угол 30°. Результаты визуализации параметров численного моделирования при скоростях вращения 10000 об/мин представлены на рис. 4, а-в.

Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что наклон формы следует считать целесообразным, поскольку область максимального давления (рис. 4в), отвечающая за формирование качества заготовки, более компактна и сосредоточена главным образом в нижней части формы.

Последующие этапы исследования предполагали численное моделирование формования суспензии на основе «модели концентрации» Flow Vision и схемы центробежного формования, представленной на рис. 4а. При этом соотношение 4% раствора ПВС и нанопорошка диоксида циркония составило 1:1. Плотность дисперсионной среды составила 1000 кг/м³, дисперсной фазы – 6000 кг/м³.

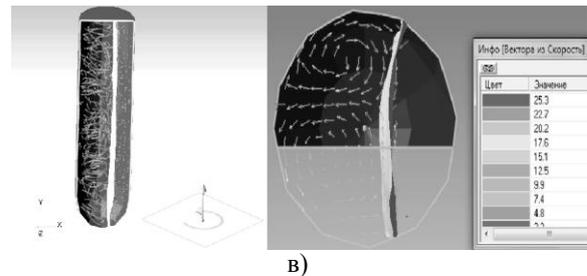
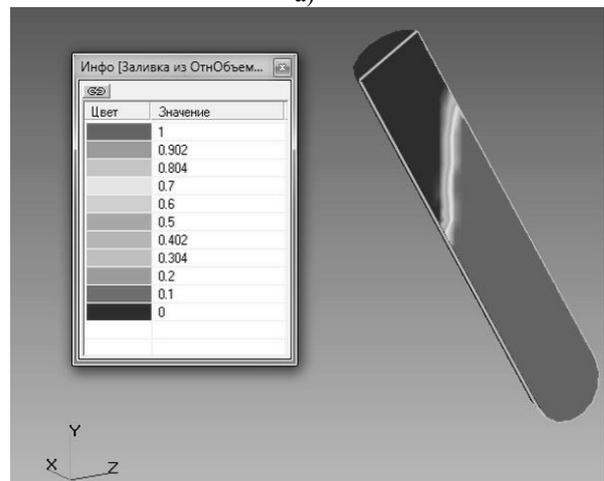
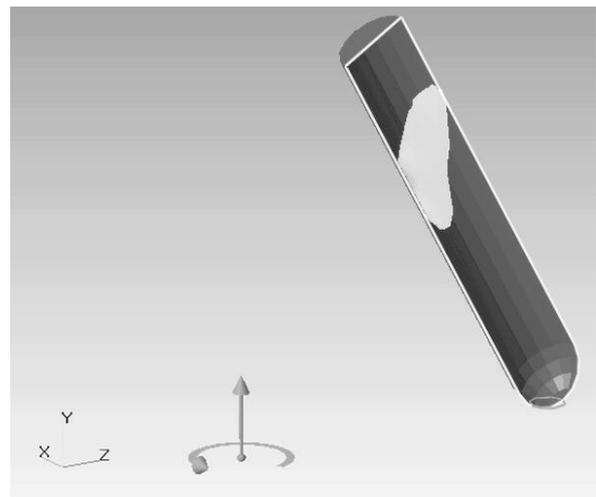
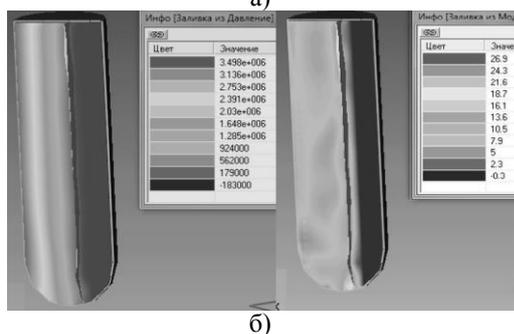
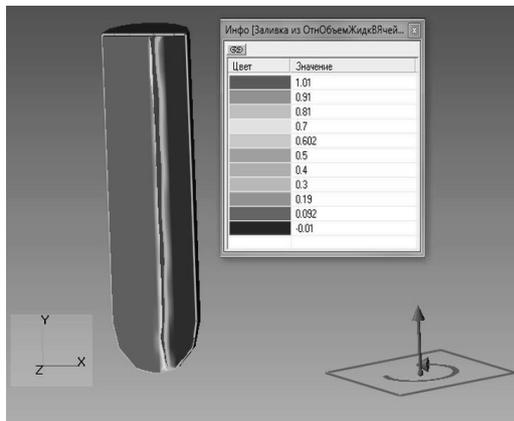
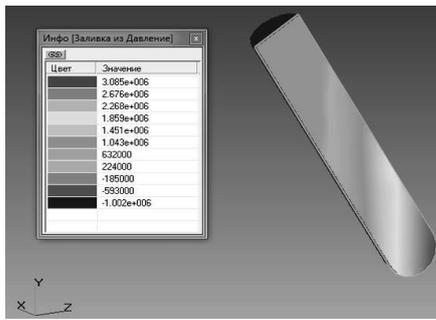


Рис. 3. Численное моделирование течения дисперсионной среды при вращении вертикальной формы относительно оси, расположенной на расстоянии от неподвижной оси литейной формы: а – изоповерхность относительного объема жидкости (значение 1 соответствует жидкой среде); б – распределение давления и модуля скорости; в – «вспышки» скорости (линии тока жидкости) в продольном сечении и вектора скорости в поперечном сечении формы

Численное моделирование параметров центробежного формования суспензии керамического порошка проводилось при скоростях вращения центрифуги 5000, 10000 и 15000 об/мин. Результаты моделирования представлены на рис. 5, а-г.

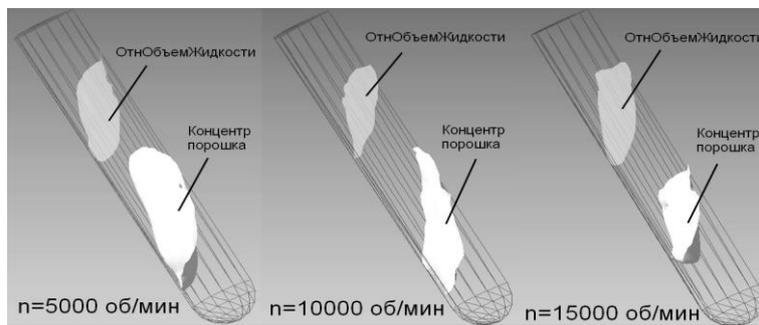




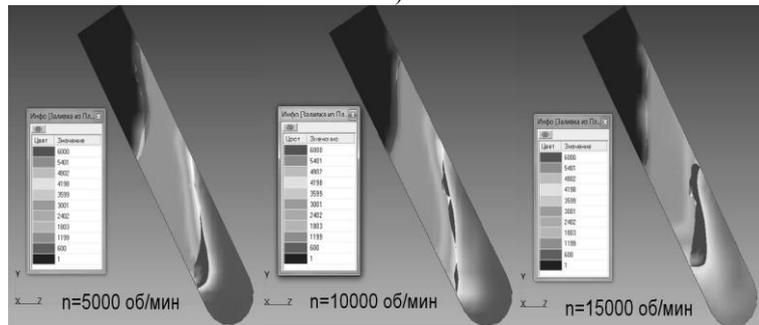
в)

Рис. 4. Численное моделирование течения дисперсионной среды в форме с наклоном 30°, расположенной на расстоянии от центра вращения: а – схема центробежного формования и изоповерхность относительного объема жидкости; б – распределение относительного объема жидкости (значение 1 соответствует жидкой среде); в – распределение давления

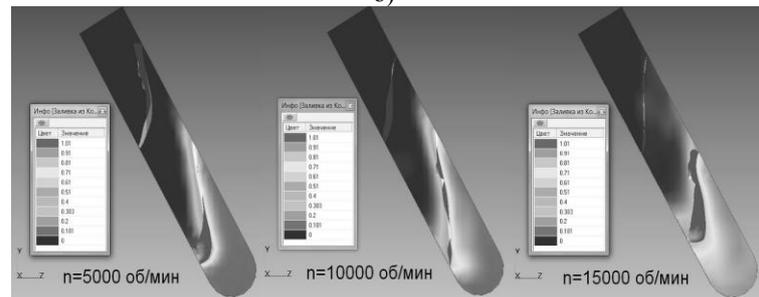
Полученные результаты, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что при увеличении скорости вращения ротора происходит уплотнение порошка и уменьшение занимаемого им объема (рис. 5б). Поскольку плотность дисперсионной среды меньше плотности дисперсной фазы, порошок ZrO_2 под действием центробежных сил и сил гравитации осажается в нижней части формы и также занимает различный объем в зависимости от скорости вращения ротора. Увеличение скорости вращения вызывает также значительный рост величины прессующего давления в области сосредоточения твердой фазы, что соответствует процессу уплотнения порошка.



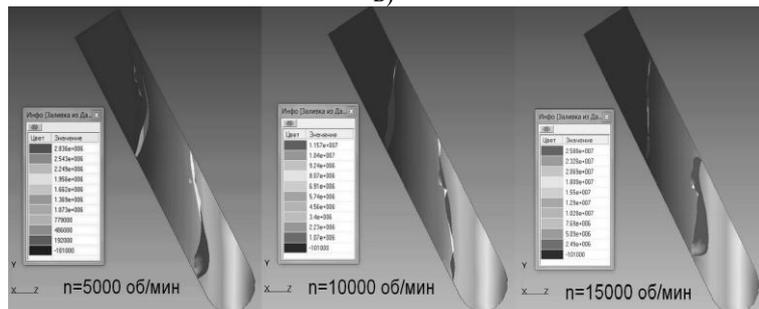
а)



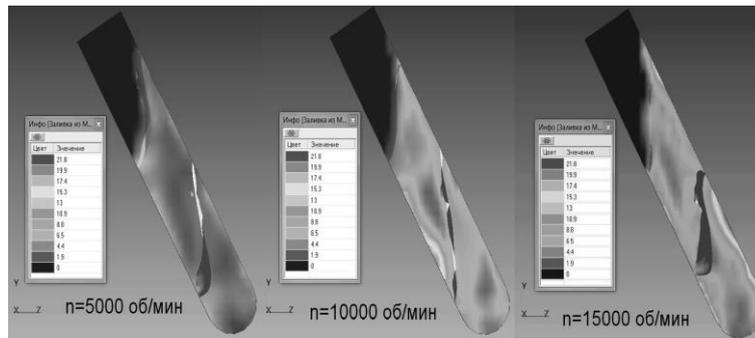
б)



в)



г)



д)

Рис. 5. Численное моделирование параметров центробежного формования суспензии порошка диоксида циркония при различных скоростях вращения литейной формы:

а – изоповерхность относительный объем жидкости и изоповерхность концентрации; б – распределение плотности; в – распределение концентрации; г – распределение давления; д – распределение модуля скорости

Выводы: численное моделирование является эффективным методом обоснования и регулирования технологических параметров центробежного формования заготовок на основе порошков материалов для получения материалов с однородной микроструктурой, требуемой плотностью и пористостью заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пивинский, Ю.Е. Изучение центробежного литья керамики. Основные параметры и закономерности процесса / Ю.Е. Пивинский, Т.И. Литовская, О.Н. Самарина и др. // Огнеупоры. 1991. № 11. С. 2-5.
2. Пивинский, Ю.Е. Изучение центробежного литья керамики. Свойства отливок / Ю.Е. Пивинский, Т.И.

3. Литовская, Ф.С. Каплан и др. // Огнеупоры. 1992. № 3. С. 6-9.
3. Bernad, S.I. Fluent numerical simulation of the mold filling process for titanium dental casting applications / S.I. Bernad, R. Susan-Resiga, S. Muntean // Southeastern Europe Fluent Users Group Meeting, Thessaloniki, Greece. 2002. P. 1-12.
4. Panda, E. Mathematical Modeling of Particle Segregation during Centrifugal Casting of Metal Matrix Composites / E. Panda, D. Mazumdar, S.P. Mehrotra // Metallurgical and Materials Transactions. 2006. V. 37, N. 5. P. 1675-1687.
5. Balout, B. Mathematical Modeling of Particle Segregation During Centrifugal Casting of Metal Matrix Composites / B. Balout, J. Litwin // Journal of Materials Engineering and Performance, 20 May 2011. P. 1-13.

NUMERICAL MODELLING THE PROCESS OF CENTRIFUGAL SLIP CASTING OF OXIDE COMPOSITIONS

© 2012 P.N. Skripova, L.D. Sirotenko, S.E. Porozova, A.M. Khanov

Perm National Research Polytechnical University

Results of numerical research the process of centrifugal moulding of suspensions on the basis of zirconium dioxide powder are presented. Numerical modeling was spent with use of program complex Flow Vision. Influence of centrifugal casting scheme and speed of the form rotation on distribution of concentration, speed, density and pressure in volume of suspensions in the course of formation the stock material is shown.

Key words: *centrifugal moulding, suspension on the basis of zirconium dioxide, numerical model, isosurface*

Polina Skripova, Assistant at the Department "Machine Design and Technology of Processing the Materials". E-mail: polinaskripova@gmail.com
Lyudmila Sirotenko, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Machine Design and Technology of Processing the Materials". E-mail: sirotenko@pstu.ru

Svetlana Porozova, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Powder Materials Technology". E-mail: keramik@pm.pstu.ac.ru
Almaz Khanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Mechanics and Technology Faculty. E-mail: mtf-dekanat@pstu.ru