

# СОВЕРШЕНСТВО В МОДЕЛИРОВАНИИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Данной публикацией мы хотим открыть цикл статей, целью которого, как это подчеркнуто в названии, является освещение современных тенденций в области моделирования. Эти тенденции мы видим не в возможности моделирования тех или иных физических процессов литейной технологии как таковых, а в более полном моделировании самой технологии и в повышении точности такого моделирования. В этом случае подразумевается возможность отслеживания с высокой степенью точности состояния расплава (качества отливки), начиная от плавильной печи, его транспортировки к литейной форме, заливке, затвердевании, охлаждении и, наконец, выбивки.

В рамках этого цикла мы планируем ознакомить читателя с современными математическими моделями и численными алгоритмами, которые обеспечивают высокую точность моделирования, и расширяют его возможности за счет литейных процессов, которые ранее с трудом или вовсе не поддавались численному анализу. Так, литейные процессы отрабатываются и внедряются в коммерческом пакете **FLOW-3D®** ([www.flow3d.com](http://www.flow3d.com), [www.flow3d.ru](http://www.flow3d.ru)).

Началом этой рубрики следует считать публикации в журналах «Литейщик России» №№ 6 и 11 (И.Н.Вольнов. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы; И.Н.Вольнов. Моделирование литейных процессов – современные вычислительные технологии), в которых дан краткий обзор моделирующих пакетов и некоторых математических моделей и алгоритмов. Содержание рубрики составят как оригинальные, так и переводные статьи, в которых более детально будут рассмотрены модели и алгоритмы и приведены примеры моделирования.

В данной публикации речь идет о новой уникальной модели, позволяющей моделировать взаимодействие расплава с подвижными твердыми телами: заливочными ковшами, прессовыми поршнями в камере прессования и т.п. Модель открывает новый ресурс повышения качества отливок за счет возможности более детального рассмотрения процессов заливки в различных вариантах литейной технологии и, как следствие, возможности управления этими процессами с целью недопущения сильного снижения качества металла и предотвращения брака отливок по этой причине.

М. Бархударов, Д. Вей (Flow Science, Inc., USA)

## Моделирование литейных процессов с изменяемой геометрией<sup>1</sup>

В последние годы моделирование литейной технологии стало общепринятым и даже необходимым элементом процесса проектирования изделия. Современные инструменты компьютерного моделирования позволяют решать задачи течения металлического расплава в литейной форме, его охлаждения и затвердевания, а также прогноза структурных параметров отливок для многих вариантов литейной технологии. При этом в большинстве случаев моделирования используется стационарная геометрия отливки или литейной формы. Однако существует множество литейных процессов, в которых задействованы подвижные элементы, непосредственно контактирующие с расплавленным металлом. Например, при плавке металлического расплава, транспортировке и заливке его в литейную форму такими элементами являются подвижные плавильные печи и ковши, при литье под давлением (ЛПД) – это камера прессования с пресс-пор-

шнем, перемещением которого обеспечивается запрессовка расплава в полость пресс-формы. При центробежном литье и литье в поворотные формы подвижным элементом является сама литейная форма, наконец, при литье выжиманием формообразование отливки обеспечивается перемещением частей литейной формы.

В статье показана возможность моделирования таких вариантов литейной технологии. Новая модель, названная GMO (General Moving Object), обеспечивает эффективный и точный способ моделирования трехмерного движения объектов произвольной формы в неподвижной расчетной сетке. В одной расчетной области допускается наличие множества объектов, каждый из которых может совершать индивидуальное поступательно-вращательное движение, опережаемое или заданным законом движения, или динамическими силами взаимодействия объекта с

<sup>1</sup> Сокращенный вариант статьи опубликован в журнале «Modern Casting», August, 2006. Перевод с английского языка выполнен к.т.н. И.Н.Вольновым.

потоком расплавленного металла [1]. Реализация метода GMO на неподвижной расчетной сетке обеспечивает ему большую эффективность и универсальность в сравнении с методами на базе движущейся и деформируемой расчетной сетки. Форма движущегося объекта и характер его движения не имеют ограничений по сложности.

В основе GMO модели лежит специальный метод FAVOR™ (Fractional Area-Volume Obstacle Representation), который позволяет на неподвижной прямоугольной расчетной сетке определить геометрию литейной формы через использование специальных параметров: доли площади  $A_f$  и доли объема  $V_f$  [2]. В каждой расчетной ячейке или контрольном объеме  $V_f$  определяется как отношение объема, открытого для течения металла, к полному объему ячейки, а  $A_f$  – как отношение открытой площади грани ячейки к полной площади грани (рис. 1). В каждый расчетный момент времени  $A_f$  и  $V_f$  пересчитываются в соответствии с движением объекта для отражения изменения его положения.

Потенциальная область применения GMO-метода не ограничивается только литейной технологией, она затрагивает также многие другие инженерные задачи. Ниже, после краткого описания новой модели, приведено несколько примеров ее использования для моделирования литейных процессов. В каждом примере подвижные части геометрии движутся по определенному закону.

### Математическая модель

Общее движение твердого тела может быть представлено поступательной и вращательной, относительно какой-либо точки отсчета, составляющими. Для движения с шестью степенями свободы в качестве точки отсчета удобно выбрать центр масс объекта. Уравнениями, определяющими эти два вида движения для каждого движущегося объекта являются [3]:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{U}_G}{dt}, \tag{1}$$

$$\vec{T}_G = [J] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times ([J] \cdot \vec{\omega}), \tag{2}$$

где  $\vec{F}$  – общая сила,  $m$  – масса движущегося объекта,  $\vec{T}_G$  – общий момент относительно центра масс в системе координат, связанной с объектом,  $\vec{U}$  – скорость центра масс,  $\vec{\omega}$  – угловая скорость и  $[J]$  – тензор момента инерции относительно центра масс. Уравнение (1) решается в инерциальной системе координат, связанной с расчетной сеткой, а уравнение (2) – в системе координат, связанной с объектом, начало которой находится в его центре масс. Каждый движущийся объект имеет свою собственную систему координат, а также матрицу преобразования координат между инерциальной и связанной с объектом системами, которая рассчитывается как функция времени для отслеживания положения объекта и его ориентации в пространстве. На каждом шаге по времени в процессе моделирования для воспроизведения формы объекта в расчетной сетке используется матрица преобразования и

начальное определение формы объекта (например, файл с CAD данными) [4].

Уравнение неразрывности, включающее доли площади и объема:

$$\frac{V_f}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \vec{u} A_f) = - \frac{\partial V_f}{\partial t}, \tag{3}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\vec{u}$  – ее скорость. Источниковый член в правой части уравнения (3) отражает эффект перемещения границы (например, стенки литейной формы) в потоке и может быть выражен через скорость  $\vec{U}_{obj}$  и нормаль  $\vec{n}$  к этой границе:

$$- \frac{\partial V_f}{\partial t} = (\vec{U}_{obj} \cdot \vec{n}) \cdot s_{obj}, \tag{4}$$

где  $s_{obj}$  – удельная площадь поверхности (площадь на единицу объема) движущейся границы объекта в контрольном объеме (см. рис. 1). Такое представление источникового члена (4) удобно при отслеживании движения границы в неподвижной расчетной сетке.

При записи уравнений импульса в неконсервативной форме какие-либо дополнительные члены, связанные с движущейся границей, в этих уравнениях будут отсутствовать:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (\vec{u} A_f \cdot \nabla \vec{u}) = - \frac{1}{\rho} [\nabla p + \nabla \cdot (\tau A_f)] + \vec{G}, \tag{5}$$

где  $p$  – давление,  $\tau$  – тензор вязких напряжений и  $\vec{G}$  – гравитация. Ясно, что тангенциальная скорость движущегося объекта должна быть учтена в членах, содержащих касательные напряжения на границах объекта.

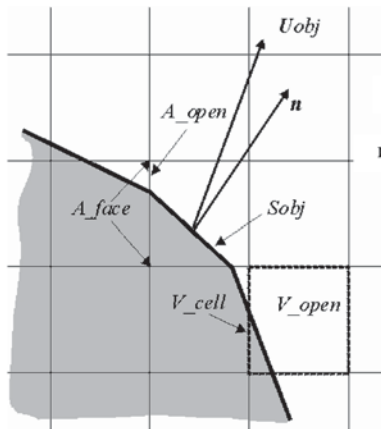
Для отслеживания свободной поверхности расплава используется метод *volume-of-fluid* (VOF) [5]. Функция доли жидкости  $F$  (VOF-функция) принимает значение 1,0 внутри жидкости и 0,0 вне ее. Усредненная по контрольному объему, содержащему свободную поверхность, доля жидкости изменяется интервале от 0,0 до 1,0 и в общем случае является функцией времени и координаты при движении жидкости через расчетную область. Кинематическое уравнение переноса для VOF-функции:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla \cdot (F \vec{u} A_f) = - \frac{F}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t}. \tag{6}$$

Уравнение (6) решается с использованием численной схемы отслеживания свободной поверхности высокого порядка точности, которая использует геометрическую реконструкцию этой поверхности для сохранения требуемой точности при ее адвекции [4].

Линейные и угловые скорости объекта рассчитываются по уравнениям движения (1) и (2). Определяется действие гидравлической силы (давление и трение), гравитационной силы, а также внешнего управляющего воздействия – внешних сил и моментов, приложенных к объекту (например, движущая сила гребного винта моторной лодки). Для объектов, движущихся по заданному закону, функции времени линейных и угловых скоростей являются необходимой исходной информацией для выполнения расчета.

Для определения течения жидкости от действия движущегося объекта уравнения неразрывности и им-



доля объема:  $V_j = V_{open} / V_{cell}$   
 доля поверхности:  $A_j = A_{open} / A_{face}$   
 источникный член:  $U_{obj} \cdot n S_{obj} / V_{cell}$

**Рис. 1.** Схема расчета в прямоугольной сетке долей площади и объема  $A_j$  и  $V_j$  твердого объекта (закрашенная область). Для центрального контрольного объема показан расчет источникного члена в уравнении неразрывности

пульса (3)–(5) решаются совместно. Отслеживается положение и ориентация всех объектов и, соответственно, обновляются доли поверхности и объема. Может быть учтена теплопередача между расплавом и подвижными или стационарными объектами. В этом случае, для обеспечения необходимой точности решения, уравнение теплопереноса для подвижных объектов решается с использованием численной схемы 2-го порядка точности.

На рис. 1 показана схема расчета долей площади и объема, а также источникного члена в правой части уравнения (4) для случая двумерной прямоугольной сетки. В контрольном объеме с границей твердого тела, эта граница аппроксимируется плоской поверхностью, что позволяет упростить расчет внешней нормали и площади поверхности для каждого такого элемента поверхности. Метод FAVOR™ обеспечивает средства приложения точных граничных условий для течения жидкости и теплопереноса. Благодаря высокому порядку точности представления геометрии общая площадь поверхности и объем твердого тела приближаются к их точным значениям при уменьшении шага расчетной сетки.

### Примеры

Ниже приведены примеры использования GMO-модели для некоторых литейных процессов с подвижными элементами геометрии. В этих примерах движение каждого объекта происходит по заданному закону, определенному в табличном виде как функция времени. Прямого сравнения результатов моделирования с количественными экспериментальными данными не проводили. Во всех случаях численное решение было устойчиво, хорошо сходилось и имело достаточную точность. Кроме реалистичного предсказания течения расплава численная ошибка, связанная с сохранением объема расплавленного металла, была меньше 1,0% его общего объема.

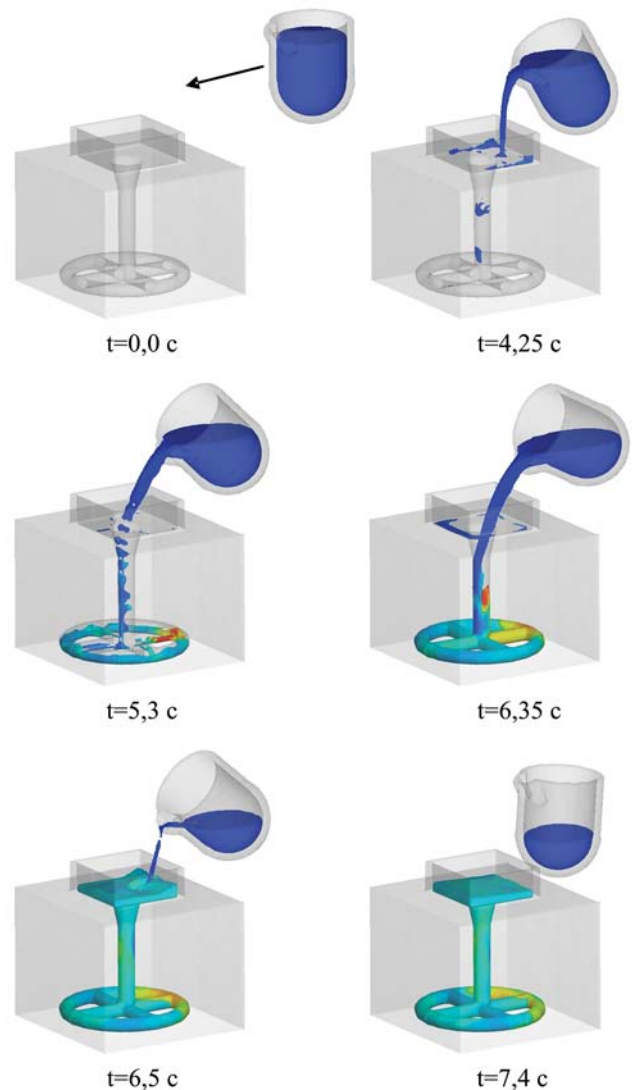
Все расчеты выполнены на персональной двухпроцессорной ЭВМ на базе процессоров Opteron™. Время расчета (CPU) для каждого случая не превысило нескольких часов.

### Заливка из ковша

В этом примере для моделирования процесса заливки жидкого металла из ковша в песчаную форму

использован закон движения, включающий как поступательное, так и вращательное движение, переменное во времени. Моделирование операций транспортировки металлического расплава перед его заливкой в литейную форму является важным расширением возможностей моделирования процесса заливки. Несмотря на то, что на этом начальном этапе качество металлического расплава может существенно ухудшиться за счет образования оксидных плен и их замешивания вместе с атмосферным воздухом в расплав, этим этапом, как правило, пренебрегают при обычном анализе процесса заливки. Его заменяют граничным

условием постоянного расхода или фиксированного давления на верхней границе литниковой чаши. Новая модель позволяет исследовать этот существенно нестационарный процесс, протекающий с высо-



**Рис. 2.** Результаты моделирования заливки алюминиевого расплава в песчаную форму из ковша с использованием GMO-модели. Ковш движется по заданному закону. Цветом показана объемная доля замешанного в расплав воздуха по шкале от 0,0 (синий цвет) до 8,0% (красный цвет)

кой степенью турбулентности, и, комбинируя его с теплопереносом и моделью отслеживания дефектов, более детально рассчитать процесс заливки литейной формы.

Вертикально ориентированный, заполненный расплавом ковш, горизонтально перемещается к литейной форме и останавливается в положении над литниковой чашей. После остановки ковш поворачивается на 60 град. вперед, опорожняется и по окончании заполнения формы поворачивается назад и возвращается в исходное положение – весь процесс занимает 10 с. На рис. 2 показаны некоторые слайды с результатами моделирования. Цветом обозначено количество воздуха, замешанного в расплав, выраженное через объемную долю воздуха в смеси воздух/металл. Замешивание воздуха определяется совокупным действием нескольких факторов: турбулентности, гравитации и поверхностного натяжения [7].

Наибольшее количество воздуха захватывается расплавом в стояке, где свободно падающая струя жидкого металла смешивается с металлом, который уже там находится. Здесь имеют место: *a* – самая высокая скорость течения металла и *b* – самая высокая степень турбулентности. Кроме того, место падения струи постоянно меняется, что добавляет еще больше турбулентности и переменности течения в стояке и литниковой чаше. Если необходимо минимизировать потери качества металла в данной зоне в процессе заливки, эти аспекты течения должны быть подробно исследованы.

### Камера прессования ЛПД

В этом примере использовано линейное, одномерное, переменное во времени движение цилиндрического пресс-поршня 0,06 м в диаметре для моделирования процесса запрессовки металлического расплава из камеры прессования в пресс-форму при ЛПД. Так же как в примере заливки из ковша для машины ЛПД с холодной камерой прессования характер перемещения расплава прессовым поршнем в пресс-цилиндре имеет критическое значение для получения литья высокого качества. Скорость поршня должна быть тщательно подобрана, чтобы избежать захвата воздуха в результате опрокидывания волны, и может быть задана как произвольная функция времени.

Камера прессования в исходном состоянии заполнена на 50% жидким металлом. Движение поршня разделено на медленную стадию, длительностью 0,6 с и скоростью поршня 0,2 м/с, и быструю со скоростью поршня 2 м/с. Переход между этими стадиями линейный и происходит за 0,05 с, как это показано на рис. 3. Результаты моделирования приведены на рис. 4 (расплав окрашен по скорости). В течение медленной стадии запрессовки перед поршнем возникает небольшая волна. До того, как она успевает достичь конца камеры прессования, поршень ускоряется и производит волну значительно большего размера.

Заливка металла в камеру прессования из раз-

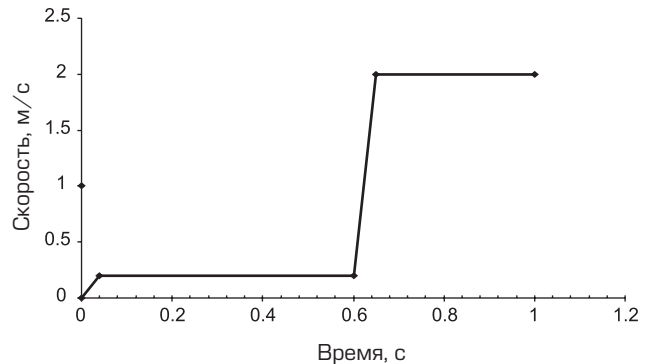


Рис. 3. Изменение скорости движения прессового поршня во времени для моделирования процесса запрессовки на машине ЛПД с холодной камерой прессования

даточного ковша также может быть добавлена к модели камеры прессования для более детального описания течения металла. Процесс заливки часто приводит к тому, что перед началом процесса запрессовки в расплаве будет сохраняться значительное остаточное движение.

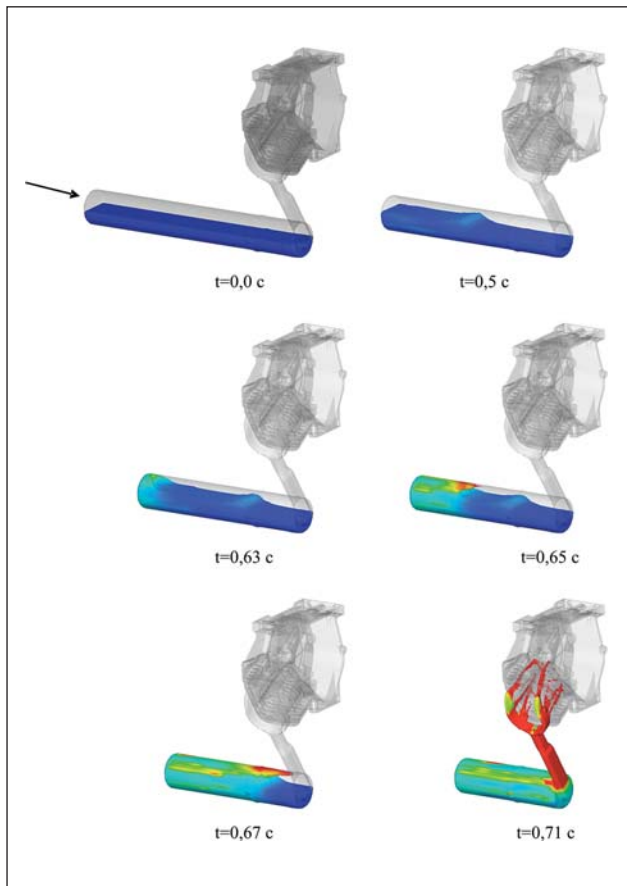
### Центробежное литье

Процесс центробежного литья по сравнению с обычным гравитационным литьем позволяет получать в отливках более благоприятную кристаллическую структуру и низкий уровень пористости. Однако расплескивание и турбулентность на начальной стадии заполнения могут превысить допустимый уровень из-за высокой скорости вращения формы. Важное значение для предотвращения сильного окисления расплава и его преждевременного затвердевания имеет геометрия стояка и питателей.

В этом примере форма вращается вокруг вертикальной оси с постоянной скоростью 400 об./мин. Имеются три одинаковые сферические полости, отстоящие друг от друга в горизонтальной плоскости на угол 120 град. и связанные со стояком прямоугольными питателями. Расплав заливают в верхнюю часть стояка с постоянной скоростью, время заливки составляет 2,5 с.

На рис. 5 приведены результаты моделирования в виде последовательности слайдов через каждые 0,5 с, которые соответствуют 3,33 оборотам формы. Следует отметить расплескивание расплава в начале заливки. Под действием центробежных сил расплав затекает в питатели и далее в полость формы. Вдоль оси вращения формируется вертикальная воронка. Процесс затвердевания отливки при вращении формы, как это имеет место в реальном технологическом процессе, здесь не рассматривается.

Из-за высокой сложности геометрии и характера ее движения данное моделирование является наиболее показательным. Поверхность внутренней полости формы вращаясь, многократно охватывает область течения расплава в процессе заполнения формы. Тем не менее, численная ошибка в определении объема залитого металла к концу заполнения была менее 1,5% его полного объема.



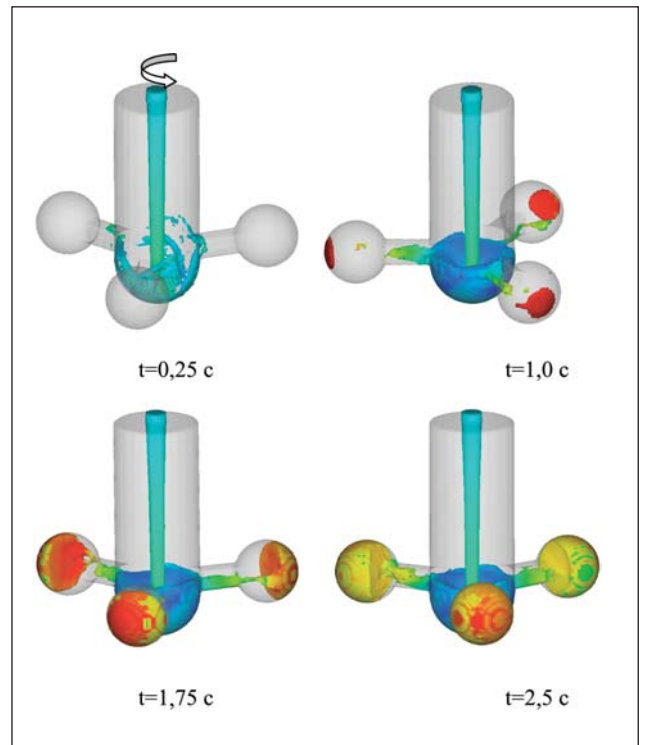
**Рис. 4.** Течение расплава в камере прессования с медленной и быстрой стадиями процесса запрессовки. Цветом обозначена скорость расплава по шкале от 0,0 (синий цвет) до 10 м/с (красный цвет)

### Литье выжиманием

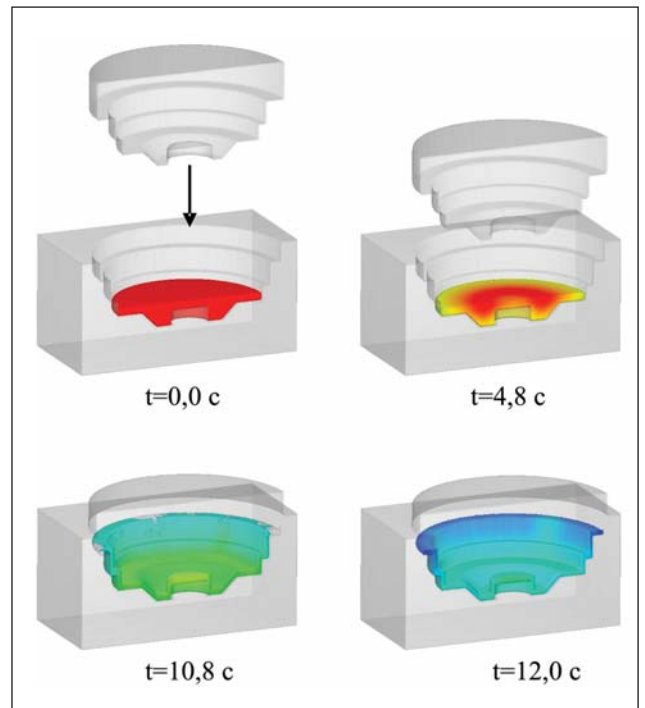
Последний пример – литье выжиманием, которое также называют жидкой штамповкой. Литейная форма состоит из двух полуформ, одна из которых является подвижной. Нижняя полуформа покоится, тогда как верхняя совершает поступательное движение вверх и вниз и формирует полость как зазор между полуформами. В исходном состоянии верхняя полуформа поднята, а полость формы открыта. Расплавленный металл располагается в предварительно разогретой нижней полуформе. Движением вниз верхней полуформы расплав выдавливается в зазор между полуформами и, в конечном счете, принимает форму кольцевой заготовки с одинаковой толщиной стенки 5 мм. Отливки, изготовленные таким образом, обычно имеют повышенный уровень механических свойств, приближающийся к уровню кованных заготовок, и при этом имеют меньшую себестоимость.

Верхняя полуформа движется вниз с начальной скоростью 1 м/с, которая затем линейно уменьшается до нуля к концу процесса и рассчитывается из тех соображений, что в момент остановки величина зазора между частями формы достигает заданного значения.

На рис. 6 приведены четыре стадии процесса, показывающие начальное положение полуформ и рас-



**Рис. 5.** Последовательные этапы процесса заполнения при центробежном литье. Цветом обозначена скорость металлического расплава по шкале от 0,0 (синий цвет) до 5,25 м/с (красный цвет)



**Рис. 6.** Последовательность формирования отливки при литье выжиманием. Приведена только половина геометрии. Цветом обозначена температура металла по шкале от 605°C (синий цвет) до 645°C (красный цвет)

плава, две промежуточной стадии процесса и конечное положение формы с отливкой.

### Заключение

Разработана и внедрена в коммерческом CFD пакете **FLOW-3D®** модель свободного движения твердых объектов в жидкости (GMO), реализованная на неподвижной расчетной сетке [6]. Модель допускает движение объектов с шестью степенями свободы, полностью совмещенное с течением жидкости. Представление твердотельной геометрии в прямоугольной расчетной сетке с использованием долей площади и объема обеспечивает эффективный и точный способ моделирования общего движения геометрически сложных объектов.

Данная модель может быть применена для расчета широкого диапазона таких литейных процессов, включающих подвижную геометрию, как заливочные операции, запрессовка в камере прессования при ЛПД, центробежное литье и литье выжиманием. Совместно с теплопередачей и моделями захвата воздуха и оксидных плен, данная модель позволяет лучше понять суть этих процессов, а также дает возможность инженерам расширить знание и понимание

сложных взаимосвязей между различными параметрами процесса.

### Список литературы

1. **Wei, G.**, A Fixed-Mesh Method for General Moving Objects in Fluid Flow // *Modern Physics Letters B*, Vol. 19, Nos. 28–29, 1719–1722, 2005.
2. **C. W. Hirt and J. M. Sicilian**, A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes // *Proc. Fourth International Conf. Ship Hydro.*, National Academic of Science, Washington, DC, Sept. 1985.
3. **H. Goldstein, P. Charles and J. Safko**, *Classical Mechanics* (Boston, MA, Addison Wesley and Company, 2002).
4. **FLOW-3D® Theory Manual**, (Flow Science Inc., 2006).
5. **C. W. Hirt and B. D. Nichols**, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *J. Computational Physics*, 39 (1981), 201–225.
6. **Flow Science, Inc.**, Santa Fe, New Mexico, USA, [www.flow3d.com](http://www.flow3d.com).
7. **C.W. Hirt**, Modeling of Turbulent Entrainment of Air at a Free Surface // (Technical Note TN-61, Flow Science Inc., 2003).

А.Ю.Коротченко, А.М.Зарубин, И.А. Коротченко (МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «АРМ-Лайн»)

## Моделирование заполнения расплавом пресс-форм литья под давлением

Одна из главных особенностей изготовления отливок при литье под давлением – кратковременность заполнения рабочей полости пресс-формы расплавом, что является одной из причин образования, во многих случаях недопустимой, сосредоточенной газоусадочной пористости в отливках.

Традиционно такие дефекты исключают путем обеспечения равномерности толщины стенок отливки, выбором места подвода расплава, расположением и объемом промывников, конструкцией вентиляционной системы и другими технологическими приемами. При разработке технологии изготовления простых по геометрии отливок оптимальные параметры обычно достигаются уже на этапе проектирования использованием справочной и другой технической литературы. При решении этой задачи для сложных по геометрии отливок часто приходится прибегать к значительному объему работ по отладке технологического процесса, что во многих случаях требует доработки пресс-форм.

С целью сокращения операций по отладке технологических процессов в настоящее время все шире используются пакеты прикладных программ группы CAE, которые позволяют моделировать процессы, происходящие в литейной форме во время ее заполнения расплавом, и последующие этапы формирования отливки.

На кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана для расчета параметров литниковой, промывниковой и вентиляционной систем используется пакет прикладных программ Flow-3D. Описание пакета можно найти в работе [1], в данной статье отметим только

те его возможности, которые важны именно при литье под давлением: учет торможения потока расплава газом, находящимся в форме; учет замешивания газа в расплав; моделирование свободной поверхности расплава, что важно при турбулентном и дисперсном заполнении пресс-формы; расчет кавитации.

Прежде чем приступить к моделированию процессов, происходящих при формировании отливок сложной конфигурацией, необходимо убедиться в том, что выбранный пакет программ адекватно описывает процесс литья под давлением. Для этого провели ряд расчетов и сравнили результаты с экспериментальными данными.

В работе [2] приведены экспериментальные данные о заполнении расплавом простых полостей формы. В работах Л. Фроммера, как отмечено в работе [2], характер заполнения зависит от отношения площадей поперечных сечений питателя и отливки. Однако в работе [2] также отмечено, что такая связь не учитывает объемных перемещений потока в полости формы, и предлагается заполнение характеризовать отношением толщины питателя  $\delta_{пит}$  к толщине отливки  $\delta_{отп}$ . В зависимости от скорости расплава и отношения  $\delta_{пит}/\delta_{отп}$  предлагаются три вида заполнения формы после удара струи о преграду: ламинарное, турбулентное и дисперсное.

Для моделирования, как и в работе [2], была выбрана отливка в форме плиты габаритами  $L=0,085$ ,  $V=0,04$  и  $\delta_{отп}=0,01$  м. Вид отливки и ее чертеж показаны на рис. 1.

Расположение отливки в форме вертикальное.

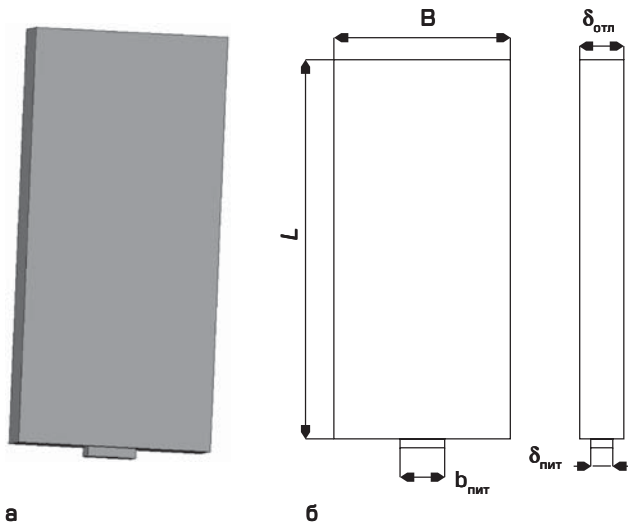


Рис. 1. Вид отливки (а) и ее чертеж (б)

Расплав подводится снизу через прямоугольный питатель, который расположен симметрично относительно нижнего торца отливки.

В расчетах  $\delta_{пит}$  составляла 0,0025 м и 0,005 м, тогда  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$  и 0,5. В расчетах также изменяли ширину питателя  $b_{пит}$ , что позволяло оценить влияние площади впуска на характер заполнения расплавом полости формы.

Начальным условием являлась скорость расплава на входе в питатель  $v_{пит}$ , которая менялась в диапазоне от 1 до 100 м/с.

На рис. 2 приведены наиболее типичные резуль-

таты расчетов, показаны пять отдельных кадров заполнения расплавом пластины при различных значениях  $\delta_{пит}$  и  $b_{пит}$ .

Расчетные данные подтверждают выводы работы [2] о влиянии на характер заполнения отношения  $\delta_{пит}/\delta_{отл}$ . На рис. 2, а, после удара струи о стенку формы образовался гидравлический подпор и турбулентное заполнение. На рис.2, б, после удара о стенку формы струя расплава при движении вниз распадается на отдельные струи, что свидетельствует о дисперсном заполнении.

Сравнивая данные рис.2, б и 2, в, можно сделать вывод о том, что и утверждение Л. Фроммера имеет место. На характер заполнения влияет и отношение площадей поперечных сечений питателя и отливки ( $F_{пит}$  и  $F_{отл}$ ).

**Вывод:** характер движения расплава при неизменных теплофизических параметрах системы «форма-отливка» зависит от скорости впуска, отношения  $\delta_{пит}/\delta_{отл}$  и отношения  $F_{пит}/F_{отл}$ .

Рассмотрим еще одно утверждение работы [2], где приведены данные о том, что при впуске струи с постоянной скоростью из прямого питателя расширение струи невозможно, то есть струя сохраняет постоянство конфигурации и направления.

Однако в работе [3], со ссылкой на других авторов, говорится о том, что дисперсное заполнение формы начинается уже при выходе струи из питателя при определенных скоростях потока. Критические скорости впуска при переходе от разбрызгивающегося потока к распыливающемуся для алюминиевых и магниевых сплавов лежат в пределах от 17,5 до 30 м/с, а для цинковых – от 13 до 22 м/с.

Таким образом, есть 2 точки зрения на характер движения расплава на выходе из питателя. В работе [2] тоже описывается разрушение струи на выходе из питателя, но для этого должны быть возмущающие факторы, среди которых: переменная скорость прессования и давление во время впуска; взаимодействие сил инерции и поверхностного натяжения; противодавление газов в полости формы; особенности конструкции литниковой системы; кавитация.

Для выяснения возможных причин разрушения струи на выходе из питателя была проведена серия вычислительных экспериментов.

### 1. Переменная скорость прессования

В расчетах задавали переменную скорость на входе в питатель. Габариты отливки  $L=0,045$ ,  $B=0,04$  и  $\delta_{отл} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. Результаты моделирования показаны на рис.3.

Из рис.3 видно, что свободная струя после выхода из питателя теряет постоянство конфигурации и начинает разрушаться. Таким образом, переменная скорость прессования может разрушить струю расплава после ее выхода из питателя.

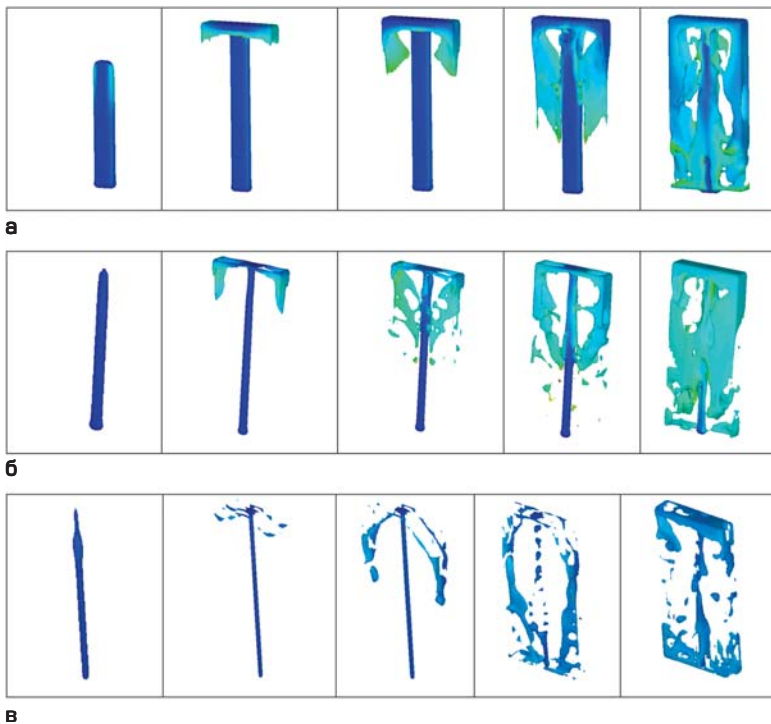


Рис. 2. Результаты расчетов характере заполнения при  $v_{пит} = 30$  м/с, где **а** –  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,5$ ;  $b_{пит} = 0,01$  м; **б** –  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$ ;  $b_{пит} = 0,005$  м; **в** –  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$ ;  $b_{пит} = 0,0025$  м

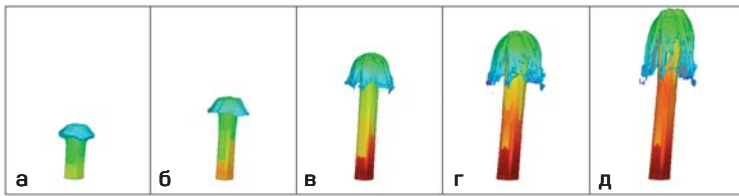


Рис. 3. а-д. Результаты моделирования характера движения расплава при переменной скорости на входе в питатель

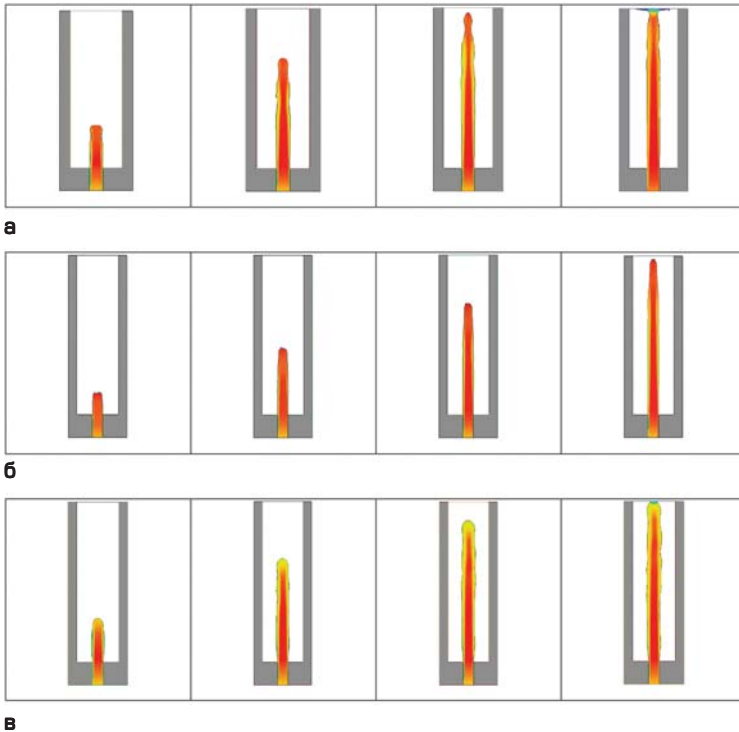


Рис. 4. Результаты моделирования формы струи при переменной скорости на входе в питатель и поверхностном натяжении: а -  $v_{пит} = 5$  м/с; б -  $v_{пит} = 10$  м/с; в -  $v_{пит} = 5$  м/с и  $\sigma = 0,85$  Дж/м<sup>2</sup>

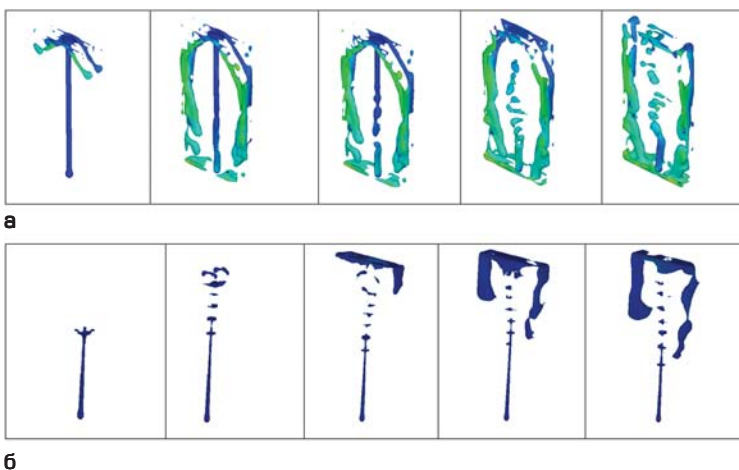


Рис. 5. Влияние на форму струи противодействия газа при различных скоростях на входе в питатель: а -  $v_{пит} = 30$  м/с; б -  $v_{пит} = 5$  м/с

**2. Силы инерции и поверхностного натяжения**

В расчетах задана сила тяжести. Меняли значение коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  и скорость на выходе из питателя  $v_{пит}$ . Габариты отливки и питателя не менялись. Резуль-

таты расчетов показаны на рис.4.

Сравнив рис.4, а и б, можно сделать вывод о том, что сила тяжести оказывает влияние на форму свободной струи, и чем меньше скорость, тем сильнее искажение профиля струи. В этих расчетах влияние поверхностного натяжения на характер течения не учитывалось.

Рис.4, а, в показывают, что поверхностное натяжение также влияет на форму струи.

**3. Противодействие газов в полости формы**

Габариты отливки  $L = 0,085$ ,  $B = 0,04$  и  $\delta_{отл} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. В расчетах использовали модель «газового пузыря», то есть полость отливки заполнена газом. При впуске расплава в полость формы газ сжимается и препятствует свободному движению струи. В расчетах меняли значение  $v_{пит}$ . Результаты приведены на рис.5.

Из рис.5 видно, что противодействие газа существенно влияет на форму струи. После впуска в струе возникают сначала синусоидальные колебания, а затем и разрушение струи на отдельные капли. Чем меньше скорость, тем раньше происходит разрушение струи.

**4. Особенности конструкции литниковой системы**

На рис.6 показан вид отливки и ее чертеж.

Габариты отливки  $L = 0,085$  м,  $B = 0,02$  м и  $\delta_{отл} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. Питатель состоит из двух каналов, в расчетах меняли длину питателя  $l_{пит}$ , что влияет на характер

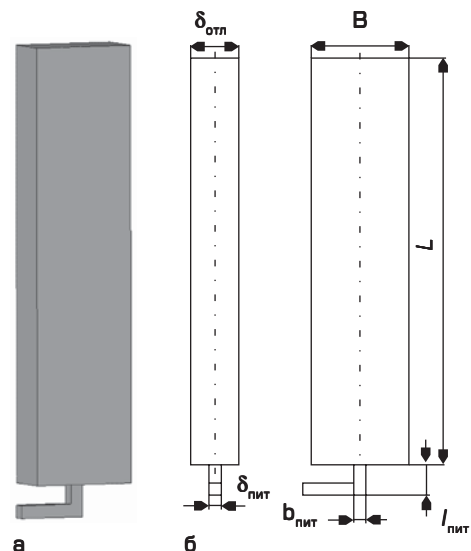
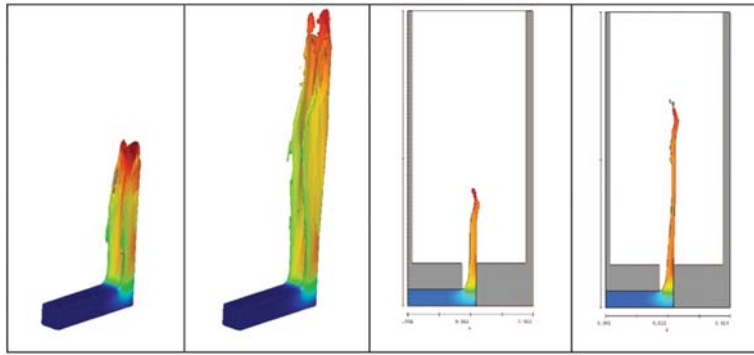
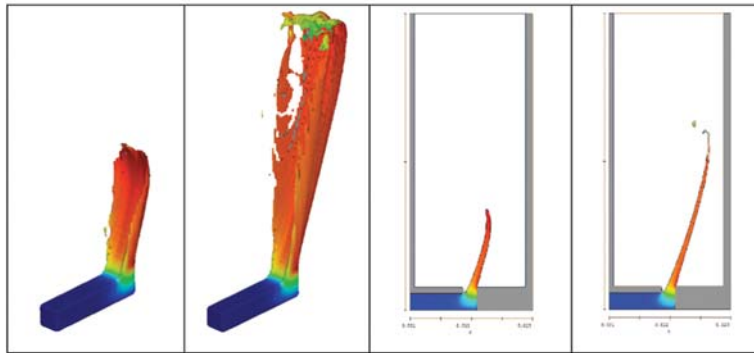


Рис. 6. Вид отливки 2 (а) и ее чертеж (б)



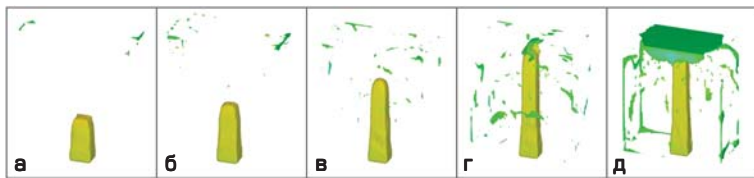


**а**

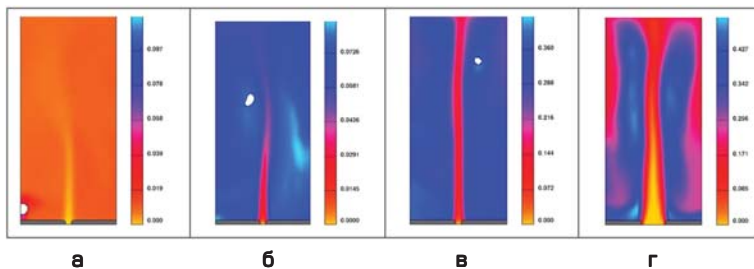


**б**

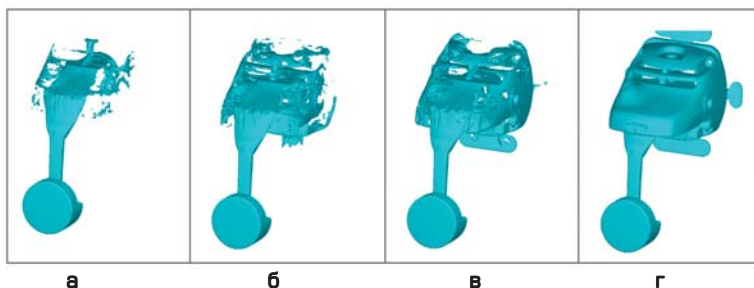
**Рис. 7.** Влияние длины питателя на движение струи металла на выходе из питателя: **а** -  $l_{\text{пит}} = 0,0065$  м; **б** -  $l_{\text{пит}} = 0,0035$  м



**Рис. 8, а-д.** Влияние резкого падения давления в литниковой системе на форму струи расплава на выходе из питателя



**Рис. 9.** Влияние скорости впуска на количество газовых включений, где **а** -  $v_{\text{пит}} = 5$  м/с; **б** -  $v_{\text{пит}} = 15$  м/с; **в** -  $v_{\text{пит}} = 50$  м/с; **г** -  $v_{\text{пит}} = 100$  м/с



**Рис. 10.** Моделирование процесса заполнения расплавом пресс-формы при литье под давлением

движения струи – установившийся или нет при выходе из питателя. Скорость  $v_{\text{пит}} = 20$  м/с. Результаты расчетов показаны на рис. 7.

При уменьшении длины питателя движение струи на выходе из питателя становится неустановившимся и струя разрушается.

### 5. Кавитация

По мнению автора работы [2], разрыв впускной струи возможен также из-за резкого падения давления в литниковой системе, приводящего к кавитации. Для моделирования была выбрана расширяющаяся литниковая система. Габариты отливки  $L = 0,04$ ,  $B = 0,02$  и  $\delta_{\text{отл}} = 0,01$  м. Результаты расчетов показаны на рис.8.

На рис. 8 хорошо видно, как из основного потока вырываются отдельные струйки расплава и ударяются о стенки формы.

### Выводы

1. Расчеты подтвердили утверждение автора работы [2] о возможных причинах разрушения потока расплава на выходе из питателя.

2. Дисперсное заполнение формы уже при выходе струи из питателя [3] возможно лишь при наличии возмущающих факторов.

В заключение рассмотрим проблему замешивания газов в движущийся расплав. Известно, что чем меньше скорость впуска, тем крупнее газовые включения в расплаве (конечно, если не обеспечить требуемый газоотвод). Когда к отливке предъявляется требование по герметичности, то рекомендуют дисперсное заполнение расплавом полости формы. В этом случае газовые включения очень малы и не так сильно влияют на служебные свойства отливки.

Провели серию вычислительных экспериментов, в которых задано, что вентиляция формы отсутствует. Тогда весь газ, находящийся в форме, должен попасть в расплав. В расчетах меняли скорость впуска  $v_{\text{пит}}$ . Результаты расчетов представлены на рис.9.

Результаты моделирования соответствуют практике. С увеличением скорости впуска все больше газов замешивается в расплав, а размер газовых включений уменьшается.

### Заключение

Пакет прикладных программ Flow-3D адекватно описывает основные процессы при литье под давлением и в настоящее время широко используется специалистами кафедры «Литейные технологии» при разработке техпроцессов изготовления отливок литьем под давлением, в кокиль, под низким давлением и др.

В качестве примера на рис.10 показан

процесс моделирования заполнения расплавом пресс-формы при литье под давлением.

### Список литературы

1. **Вольнов И.Н.** Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспек-

тивы // Литейщик России. – 2007. – №6.

2. **Белопухов А.К.** Технологические режимы литья под давлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.

3. **Ноговицин Б. Ф.** Основы расчета и проектирования машин для литья под давлением. Иркутск: Иркут. ун-т, 1987. – 128 с.

М. Фрайн (фирма «Фосеко», Чехия), Р. Кендрик, В. Хопс (фирма «Фосеко», Европа)

## Эффективная футеровка ковшей INSURAL ATL для алюминиевых сплавов<sup>1</sup>

Затраты на энергию и экологические требования продолжают оказывать финансовое давление на литейную промышленность. Опасения глобального потепления климата подталкивают правительственные органы на создание дополнительных экономических санкций в отношении предприятий и индивидуальных хозяйств, которые не эффективно расходуют энергоресурсы. Для сохранения конкурентоспособности литейным предприятиям необходимо рассматривать каждый аспект производства на предмет сокращения затрат и проводить поиск наиболее эффективных методов выплавки и выдержки расплава, а также уделять внимание методам переработки возврата и отходов производства.

Одной из мер, повышающих экономическую эффективность производства, является применение специальной изоляционной футеровки для передаточных ковшей – Insural ATL, благодаря которой можно сохранять расплав в более узких температурных пределах и понизить температуру выдачи металла из плавильных печей.

Большинство предприятий используют для футеровки ковшей огнеупорный бетон, который является плохим теплоизолятором и требует длительного спекания. Такая футеровка может являться источником насыщения расплава алюминия водородом, так как полное спекание и стабилизация свойств футеровки может занять несколько дней или несколько переливов расплава.

Другие предприятия для футеровки ковша используют графитошамотные тигли, но данный материал по своей природе также является теплопроводным, и расплав в таких ковшах быстро теряет температуру.

При поиске идеальной футеровки для передаточных ковшей следует учитывать множество факторов, включая хорошую теплоизоляцию, отсутствие источников загрязнения расплава и скорость замены футеровки после износа.

Футеровка INSURAL ATL разработана с учетом всех вышеперечисленных факторов. INSURAL ATL представляет комплект теплоизоляционных материалов для быстрой футеровки ковша, включая тигель, подобранный по размеру металлической обечайки ковша, ригели для выполнения сливного носка, а также

наполнительную самотвердеющую сухую смесь для заполнения зазора между тиглем и обечайкой и мастикой для скрепления элементов и заделки швов. Подготовка ковша с применением комплекта INSURAL ATL занимает считанные минуты, и такой ковш может сразу же подаваться под раздачу металла без дополнительного прогрева или длительного спекания.

### Изоляция

Для оптимального использования энергии во время выплавки сплава все больше литейных предприятий используют централизованное плавильное отделение, которое быстро и экономично обеспечивает необходимыми сплавами все заливочные участки производства. Для предприятий такого типа все чаще используется внепечная обработка сплава непосредственно в транспортном ковше. Эта система позволяет сократить время между выдачей расплава из плавильной печи и заливкой форм. Рафинирование, дегазация, измельчение макрозерна и модифицирование микроструктуры может выполняться быстро, в частности, с применением систем роторной дегазации с автоматической подачей флюсов, такой, как FDU MTS 1500 производства фирмы «Фосеко». Но даже при применении этой установки общее время обработки расплава может составить до 10 мин. Для такого периода выдержки расплава передаточный ковш должен иметь повышенную теплоизоляцию.

Так, если используется традиционная футеровка, то тепловые потери расплава составляют примерно 8°C/мин, в таком случае, для компенсации тепловых потерь за 10 минут потребуются перегреть расплав в плавильной печи на 80°C, что может повлиять на образование дополнительных оксидных включений и/или увеличение объема растворенного водорода в сплаве. Футеровка INSURAL ATL позволяет сократить тепловые потери до 3°C/мин, поэтому при тех же условиях потребуются перегрев всего на 30°C. Это дает возможность снизить время подготовки сплава в плавильной печи и ведет к прямой экономии энергоресурсов предприятия.

На рис. 1 и 2 показано сравнение изоляции ковшей с традиционной футеровкой (рис. 1) и футеровкой Insural ATL (рис.2). Для сравнения выделяемой тепловой энергии от обеих ковшей используется инфракрасная камера, на рис. 2 снижение тепловых потерь очевидно.

<sup>1</sup> Перевод А.В.Чикунова (ООО «ФОСЕКО», Россия).