



The results of numerical modeling as compared to water analog are given for casing under pressure. The described approach in identification of numerical models allows to reveal their disadvantage at low costs.

Е. И. МАРУКОВИЧ, И. Л. ЗАХАРОВ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, Д. В. ДОВНАР,  
ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.791:658.562

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Актуальность моделирования литья под давлением алюминиевых сплавов**

Способом литья под давлением из алюминиевых сплавов производится широкая гамма деталей для автомобильной, тракторной и транспортной промышленности. Различают три основных типа литья под давлением: гравитационное литье, литье под низким и высоким (время заполнения формы порядка 0,01 с) давлениями. Важной особенностью литья под давлением по сравнению с другими видами литья является низкая стоимость производства отливок сложной геометрической формы (таких, как головки блоков цилиндров, коллекторы и др.), которые при этом не требуют дальнейшей механической обработки.

В настоящее время в мире исследованию процесса литья под давлением уделяется большое внимание ввиду постоянно растущей потребности промышленности на детали такого рода. С развитием вычислительной техники важное место стало занимать численное моделирование литья под давлением, которое позволяет существенно экономить средства на освоение новой номенклатуры отливок и способствует снижению брака при производстве. Моделирование используется при конструировании литниковой системы для контроля дефектов образования раковин и усадки.

Широко известными мировыми центрами, разрабатывающими программное обеспечение для моделирования литья под давлением являются MAGMA Gmb, г.Аахен, Германия (Magmasoft) [1]; EEK Inc. (CAPCAST) США; CSIRO, Австралия; UES, Inc. (ProCAST), США; (Polygon), Санкт-Петербург и др.

**Методы моделирования литья под давлением**

*Численное моделирование*

Известно несколько основных методов численного моделирования литья под давлением [2].

Для моделирования литья под высоким давлением (случай изотермического заполнения) широко используются модели, основанные на уравнении непрерывности потока жидкости [3] и методе сглаженных частиц (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) [1, 4].

Рассмотрим уравнение непрерывности для потока. Математическая модель основана на решении интегродифференциальных уравнений [5]. Уравнение непрерывности для потока жидкости имеет вид

$$\nabla V = 0, \quad (1)$$

где  $V$  – вектор скорости. Уравнение Навье–Стокса запишем следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) V = G - \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nabla^2 V, \quad (2)$$

где  $G$ ,  $\rho$  и  $P$  – соответственно вектор ускорения, плотность расплавленного металла и давление. Уравнение энергетического баланса имеет вид

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T + \rho c v \rho L \frac{\partial \psi_s}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где  $T$ ,  $c$  и  $L$  – соответственно температура, тепловая энергия жидкости и скрытая теплота;  $\psi_s$  – твердая составляющая;  $v$  – кинематическая вязкость;  $\alpha$  – теплопроводность. Уравнение для объема жидкости:

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

где  $t$  и  $F$  – время и доля объема жидкости. Метод расчета объема жидкости использует функцию доли объема  $F(x, y, z, t)$  для вычисления границ свободной жидкости. При усреднении по узлам расчетной сетки усредненная величина  $F$  в узлах сетки равна доли объема, занимаемой жидкостью. Единица величины  $F$  соответствует элементарному объему жидкости (ячейке), нулевое значение

в ячейке означает отсутствие жидкости. Величина в ячейке  $F$  между нулевым значением и единичным означает свободную поверхность:

$$F = \frac{\text{объем жидкости в ячейке}}{\text{объем ячейки}} \quad (5)$$

Метод расчета объема жидкости учитывает количество  $F$  выливаемой через поверхность ячейки жидкости с шагом  $\Delta t$ . Количество  $F$  за один шаг времени равно  $\delta F$ , где

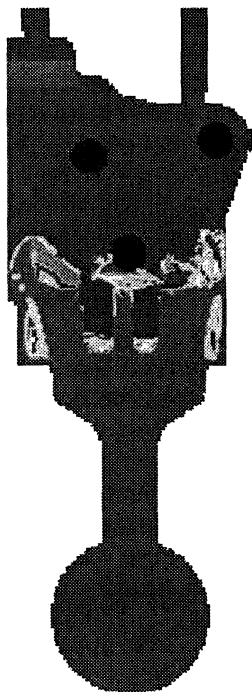
$$\delta F = \text{MIN} [F_{AD} |V_x| + CF, F_D \delta x_D], \quad (6)$$

$$CF = \text{MAX} [(1,0 - F_{AD}) |V_x| - (1,0 - F_D) \delta x_D, 0.0], \quad (7)$$

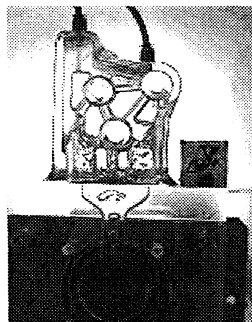
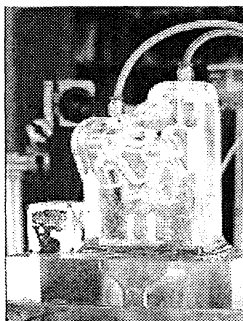
Выбор приращения времени необходим для стабильности, подчиняемой нескольким ограничениям. Сходимость осуществляется при условии

$$\Delta t < \frac{3\gamma}{4} \frac{\Delta x_i^2 \Delta y_j^2 \Delta z_k^2}{\Delta x_i^2 \Delta y_j^2 + \Delta y_j^2 \Delta z_k^2 + \Delta z_k^2 \Delta x_i^2} \quad (8)$$

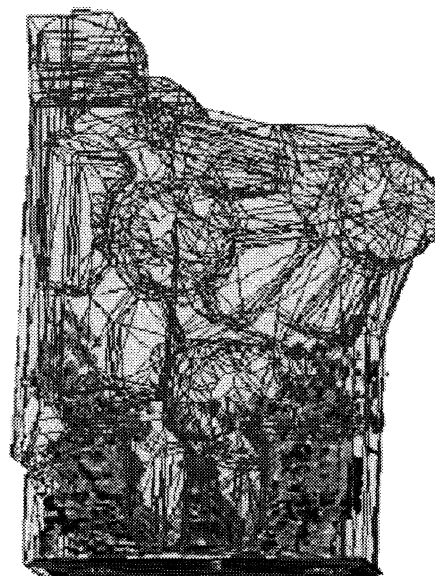
Результаты моделирования для начальной и конечной стадий заполнения приведены на рисунке, а, з.



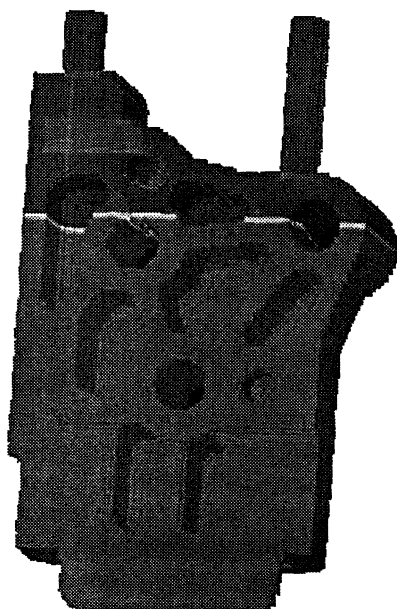
а



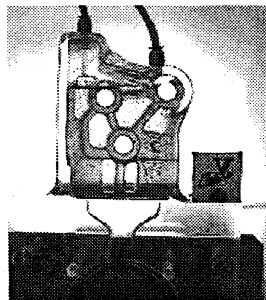
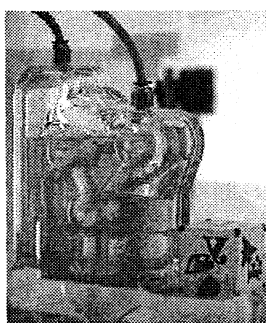
б



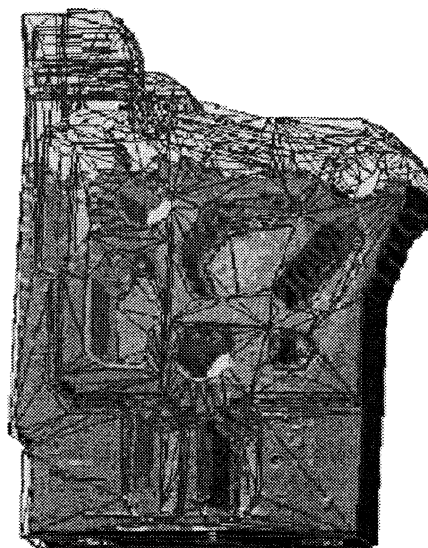
в



з



д



е

Результаты численного моделирования (а, з), аналогового водного моделирования (б, д) и трехмерного восстановления картины заполнения (в, е)

Моделирование процесса литья под давлением на основе метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) использует лагранжев метод моделирования потоков металла, аппроксимируемого свободно движущимися частицами. Метод заключается в представлении сплошного тела совокупностью частиц (материальных точек), взаимодействующих между собой по законам классической механики. Управляющие дифференциальные уравнения преобразуются в уравнения движения для этих частиц. Частицы, как движущиеся точки интерполяции, в которых можно рассматривать физические параметры (температуру, плотность, давление и т.д.). Далее по данным точкам можно восстанавливать соответствующие свойства объема. Силы между частицами вычисляются путем сглаживания информации от соседних частиц таким образом, чтобы результирующее движение частицы не противоречило движению соответствующего реального потока, определяемого уравнениями Навье–Стокса. Важной особенностью данного метода является бессеточность реализации расчетов [1].

Для численного решения дифференциальных уравнений, моделирующих процесс литья под давлением, используются широко известные метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР). Использование второго метода дает выигрыш в более простой программной реализации по сравнению с МКЭ, однако уступает в точности результатов моделирования.

При моделировании процесса литья под низким давлением имеет место неизотермическое заполнение формы. В этом случае металл находится в двух фазах – жидкой и твердой (для неэвтектических сплавов присутствует еще полутвердая фаза). Реологические модели позволяют эффективно описывать неньютоновские жидкости [6].

*Гидро моделирование процесса заполнения формы*

Для физического моделирования потока расплава в процессе литья широко используется гидро моделирование [3, 7]. Водное аналоговое моделирование дает хорошие результаты для случаев изотермического заполнения литейных форм при литье под давлением и непрерывном литье. Решение задачи трехмерного восстановления процесса заполнения литейной формы при моделировании методами гидро моделирования позволяет создать новые методы оптимизации конструктивных и технологических параметров процесса литья под давлением отливок геометрически сложных форм. Гидро моделирование заполнения литейной формы является точным для макроявлений, таких, как поверхностные волны, в случае, когда изменение вязкости в процессе незначительно. Водное моделирование может успешно применяться в следующих случаях:

- для идентификации численного моделирования;
- при конструировании литниковой системы и ее промышленной оптимизации во избежание возникновения зон незаполнения в отливке;
- как часть процесса идентификации результатов различных методов моделирования потока.

Полученные результаты исследований могут быть непосредственно применены для оптимизации литниковой системы и технологических параметров процесса литья под высоким давлением. Применение аналоговых методов моделирования позволяет существенно экономить средства на разработку и оптимизацию процесса для конкретных промышленных задач.

Для проведения аналогового моделирования Институтом технологии металлов НАН Беларуси совместно с Корейским институтом промышленных технологий (KITECH) были разработаны установка и программное обеспечение, позволяющие проводить и обрабатывать получаемые данные при моделировании [7–9]. Гидро моделирование дает возможность обнаружить дефекты (полости), образующиеся в процессе заполнения формы, в случае, когда внутренние детали формы очень мелкие, или расположены так, что в форме могут появиться области с давлением, препятствующим дальнейшему заполнению. При аналоговом моделировании этого можно избежать, регулируя скорость заполнения формы.

#### **Идентификация численных моделей**

Программное обеспечение для численного моделирования литья под давлением должно с высокой точностью выполнять расчеты параметров процесса. Существуют несколько способов, используемых для идентификации численных моделей [3]. Однако способы, связанные с рентгеновским либо электронным контролем процесса заполнения металла, обладают низкой точностью и являются дорогостоящими. Аналоговое водное моделирование используется для идентификации моделей литья алюминиевых сплавов под высоким давлением. Для улучшения возможностей регистрации изображений при моделировании используется окрашенная вода.

Сравнение аналоговых экспериментов с результатами численного моделирования показано на рисунке. Здесь приведены результаты для двух уровней заполнения. При проведении численного моделирования в программу закладывали параметры, соответствующие водной модели. Из рисунка хорошо видно отсутствие брызг в результатах численного моделирования заполнения (а, г) в сравнении с заполнением модельной жидкостью (в, е). Изображения модельной формы, заполняемой водой (б, д), регистрируются одновременно несколькими видекамерами. Трехмерная картина (в, е) восстанавливается при помощи

разработанного программного обеспечения из изображений, получаемых с видеокамер [7, 9].

### Выводы и перспективы

Разработка математических моделей и их идентификация при помощи гидромоделирования позволяет существенно экономить средства на проектирование оснастки для процесса литья под давлением по сравнению с проведением натуральных экспериментов. Кроме того, заполнение в реальном процессе литья очень трудно визуализировать, поскольку известные методы термометрии и рентгенографии обладают множеством недостатков и высокой стоимостью экспериментального оборудования.

Использование гидромоделирования для исследования процессов литья под давлением характеризуется низкой стоимостью оборудования и возможностью применения результатов непосредственно к промышленным процессам. Важным направлением для дальнейшей работы является применение методов обработки изображений для задач автоматического распознавания дефектов, возникающих при заполнении модельной формы.

Актуальными остаются задачи моделирования литья под низким давлением (когда процесс является неизотермическим), поскольку для реализации алгоритмов и их идентификации необходимы существенные экономические затраты.

Работа выполнена на основе исследований, проводимых по заданию 2.03 Государственной программы прикладных исследований «Металлургия» 2005–2009 гг.

### Литература

1. Ha J., Cleary P. W., Alguine V., Nguyen T. Simulation of die filling in gravity die casting using SPH and MAGMASoft // Proc. 2nd Int. Conf. on CFD in Minerals & Process Industries, Melbourne, Australia. 1999. P. 423–428.
2. Li Y.B., Zhou W. Numerical Simulation of Filling Process in Die Casting // Materials Technology. 2003. Vol. 18. N. 1. P. 36–41.
3. Xue X. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in mold filling // PhD thesis, Technical University of Denmark, 1991.
4. Gingold R.A., Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to nonspherical stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1970. Vol. 181. P. 375–387.
5. Hwang H.Y., Choi J.K., Marukovich E.I. et al. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys // 67th International World Foundry Congress WFC, Harrogate, UK. 5–7 July, 2006.
6. Kumar P., Martin C.L., Brown S.B. Flow Behavior of Semi-Solid Materials // Proc. of the 2nd Intl. Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites. TMS. 1992. P. 250–262.
7. Марукович Е.И., Брановицкий А.М., Захаров И.Л., Чой Ки-Йонг. Аналоговое моделирование процессов литья под давлением // Литье и металлургия. 2005. № 2 (34). Ч. 1. С. 45–47.
8. Choi J.K., Choi K.Y., Hwang H.Y. et al. Three-dimensional image reconstruction for water modelling of metal casting processes // In Proc. International Conference On Modelling And Simulation MS'2004, 27–29 April 2004, Minsk, Belarus. P. 216–219.
9. Choi J.K., Hwang H.Y., Choi K.Y. et al. The technique of calibration multi-camera imaging system for fast water flow registration and reconstruction // Proc. of the Eighth International Conference PRIP'2005, Minsk, 18–20 May, 2005. P. 177–180.