

**Марукович Е. И.****Брановицкий А. М.****Дементьев В. А.****Лебединский Ю. А.**

# 40 лет ИТМ НАН Беларуси

Е. И. МАРУКОВИЧ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, В. А. ДЕМЕНТЬЕВ,  
Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.043 + 681.327

## ГИДРОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

*The description of equipment for hydrodynamic experiments and methods of hydro-modeling of foundry processes, allowing to carry out three-dimensional modeling of filling process, is given. This method can be used for identification of numerical models and development of casting technology of the new types of production.*

Совокупность таких факторов, как давление в потоке металла, скорость движения металла, противодавление, возникающее вследствие затрудненного удаления воздуха и газообразных продуктов сгорания смазочного материала, образует гидродинамический режим формирования отливки. В большинстве случаев непонимание природы течения расплава связано с недоработками технологии в плане формирования гидродинамического режима и, как следствие, появлением таких дефектов, как усадочная пористость, рыхлота, грубая поверхность, отклонение от размеров. Компьютерное моделирование может устранить это непонимание только для ламинарных течений. Однако на практике используются большие скорости заполнения, при которых наблюдается турбулентный и дисперсный характер течения расплава. Так, в работе [1] установлено, что поверхность алюминиевого сплава разрывается, когда скорость поверхности превышает 0,5 м/с. Разрыв поверхности означает возможный захват поверхностных оксидов в объем расплава. Для предотвращения турбулентности и дисперсности необходимо поддерживать скорость расплава ниже приемлемого безопасного предела. К сожалению, такой уровень контроля не реализуется в повседневной литейной практике [2].

Большие скорости течения обуславливают изотермичность заполнения, что позволяет ограничиться при математическом моделировании уравнениями Навье–Стокса [3] без уравнения энергии. Однако их прямое решение не представляется возможным в связи с малым пространственно-временным масштабом турбулентного движения [3]. Это в свою очередь обусловило появление ряда других подходов к моделированию течений [4–7], но и они не всегда могут дать достоверные результаты.

Исследование заполнения литейной формы расплавом в натурном эксперименте требует затрат энергии и материалов и достаточно сложно в плане технической реализации. Например, регистрация профиля расплава при помощи высокоскоростной рентгеноскопии [8] обладает такими недостатками, как ограниченность проникновения рентгеновских лучей в металл, высокая стоимость оборудования и обеспечение безопасности персонала. Другой способ – размещение внутри литейной формы электрических контактов [9–11]. При прохождении металла контакты замыкаются, регистрируя расположение расплава. К недостаткам данного метода можно отнести зависимость точности регистрации от числа контактов и влияние электрических контактов на течение расплава. Оба приведенных выше способа не отслеживают формирование воздушных полостей и газовых включений малых размеров. Здесь и возникает целесообразность гидродинамического эксперимента – гидромоделирования. На основе экспериментальных испытаний

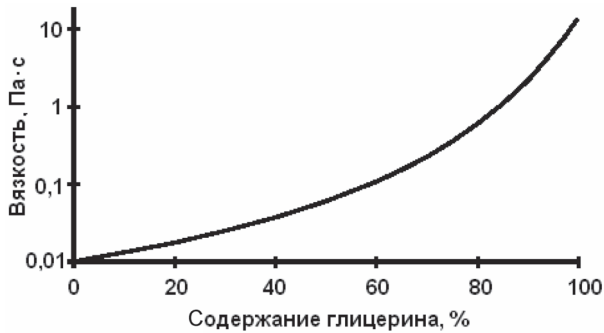


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости водного раствора глицерина от концентрации

модели литейной формы можно оценить гидродинамические свойства создаваемой литейной формы. Суть гидромоделирования заключается в непосредственном наблюдении заполнения прозрачной формы модельной жидкостью при комнатной температуре вместо расплава металла.

При постановке гидродинамического эксперимента одним из основных является вопрос о том, как подобрать параметры модельной жидкости, чтобы получить достоверное описание натурного гидродинамического явления заливки расплавом. В теории подобия [12] различают геометрическое подобие, являющееся подобием границ областей течений, кинематическое подобие, под которым подразумевают подобие полей скорости, и динамическое подобие, являющееся подобием сил. Геометрическое подобие достигается изготовлением точной копии литейной формы. Кинематическое и динамическое подобие достигаются, если параметры модельной жидкости и параметры расплава (скорость впуска, плотность, вязкость) удовлетворяют гидродинамическим критериям. В частности, для движения вязкой несжимаемой жидкости, записываемой системой дифференциальных уравнений Навье–Стокса, такими критериями являются числа Фруда, Рейнольдса, Эйлера и Струхала. Числа Фруда, Рейнольдса, Эйлера характеризуют соответственно отношения сил тяжести, вязкости, давления к силам инерции. Число Струхала характеризует инерционные гидродинамические силы, возникающие при нестационарном движении жидкости. Практическая и физическая невозможность одновременного выполнения всех условий подобия заставляет оценивать «удельный вес» отдельных категорий сил в изучаемом явлении и моделирование производить по преобладающим силам [12]. В конечном счете подобие между моделью и натурой является приближенным, а степень приближения зависит от искусства экспериментатора и подлежит количественной оценке на основе специально выполненных опытов. В частности, для гидромоделирования литья под

давлением таким преобладающим фактором является вязкость, а при непрерывном литье – сила тяжести и используются соответственно критерии подобия Рейнольдса [13] и Фруда [14].

Для гидромоделирования литья под давлением в качестве модельной жидкости целесообразно использовать смесь глицерина и воды [13]. Глицерин обладает высокой вязкостью и в смеси с водой, имеющей низкую вязкость, позволяет получить широкий диапазон вязкостей [15]. Чистый глицерин и дистиллированная вода позволяют получать значение динамической вязкости от 0,01 до 14,1 Па·с при 20 °С (рис. 1).

Наблюдение процесса заполнения при гидромоделировании осложняется разницей рефракций материала формы и модельной жидкости. Для минимизации рефракционных искажений в качестве материала формы используют акрил, прозрачный полимерный композит на основе производных акриловой кислоты с показателем преломления, близким к показателю преломления воды.

Для анализа кинематики заполнения недостаточно одного визуального наблюдения особенно при больших скоростях впуска. Необходимо регистрировать заполнение во времени с возможностью последующего просмотра. Такую техническую возможность предлагает цифровая видеосъемка.

Разработанная установка для гидромоделирования процесса заполнения литейной формы и его регистрации состоит из следующих компонент [7, 13, 16] (рис. 2): системы имитации заполнения формы; ноутбука для управления установкой; модели пресс-формы; видеокамеры; системных компьютерных блоков с установленными платами видеозахвата; системы освещения.

Система имитации заполнения формы представляет собой цилиндр с поршнем, нагнетающим давление для достижения требуемой скорости впуска жидкости, и канал сопряжения со сменной

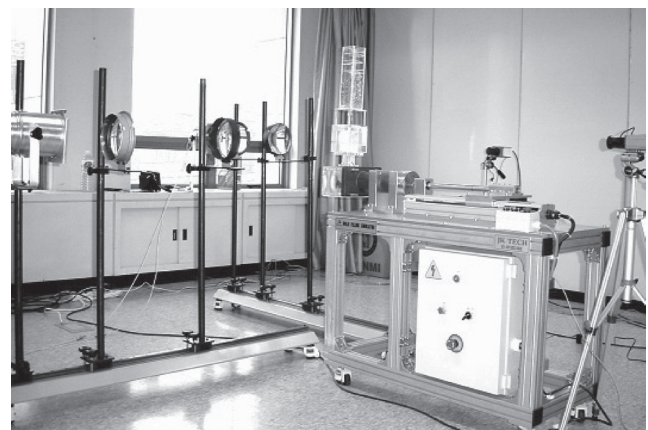


Рис. 2. Установка для гидромоделирования процессов литья под давлением



моделью пресс-формы. Система контролируется с ноутбука через микропроцессорный блок управления. Модели пресс-форм изготавливали из прозрачного акрила.

Для регистрации потока использовали аналоговые цветные CCD-видеокамеры Samsung SCC 131A с возможностью внешней синхронизации от сети переменного тока (line-lock) со скоростью затвора  $1/60 \sim 1/100000$  с и объективами с переменным фокусным расстоянием 5–50 мм. Режим синхронизации line-lock использовали для одновременного захвата изображений с видеокамер. Для одновременного захвата изображений использовали триггерное устройство, сигнал с которого подавали на триггерные входы плат видеозахвата. Размещение видеокамер и освещения осуществляли с помощью перемещаемых штативов таким образом, чтобы получить приемлемые изображения нужных областей в полостях формы, на которых можно различить поток заполнения. Количество камер определяли из оптимальности обзора всех участков полости формы в поле зрения камер. В проведенных экспериментах их количество варьировалось в зависимости от сложности геометрии форм и составляло 2–4.

Для захвата и записи изображений с видеокамер использовали персональные компьютеры Pentium 4 2,6 GHz с объемом оперативной памяти 1 GB и платы видеозахвата Data Translation 3120. Компьютеры управлялись по локальной сети средствами удаленного рабочего стола (технология Remote Desktop). Программа, разработанная с использованием SDK Data Translation для плат видеозахвата, запускалась в режиме ожидания на каждом компьютере с платой видеозахвата. По сигналу с триггерного устройства программа записывает на жесткий диск компьютера последовательно изображения в виде несжатых файлов формата BMP со скоростью 30 кадров/с. Полученные последовательности изображений можно использовать не только для визуального просмотра, но и для компьютерной обработки.

По полученным изображениям можно рассчитать трехмерную картину заполнения формы, для чего необходима пространственная калибровка видеосистемы [17]. Параметры камер, полученные после данной процедуры, позволяют пересчитать пиксельные координаты изображений, получаемых с камер, в трехмерные координаты сцены с модельной формой. Калибровку камеры необходимо выполнять каждый раз после изменения ее положения, иначе трехмерная картина заполнения может восстановиться с искажениями либо не восстановиться вообще.

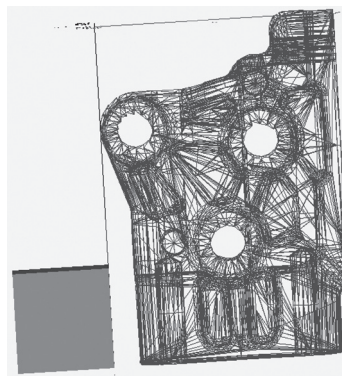


Рис. 3. Каркасная модель пресс-формы и тест-объект

Калибровка камеры – известная фотограмметрическая задача, имеющая много вариантов решения [18–20]. Здесь использовали собственный разработанный метод калибровки по тест-объекту (рис. 3).

Для описания трехмерной картины заполнения использовали воксельное представление [17], при этом с каждым временным моментом связывался массив вокселей, фактически трехмерный массив чисел без индексных данных. Данный массив рассчитывали по разработанному алгоритму с учетом изображений, полученных с камер, и воксельного представления пресс-формы, которое предварительно рассчитывали по каркасной модели пресс-формы (рис. 3) в STL-формате. Многие инженерные САПР имеют возможность экспорта спроектированных деталей в таком формате.

Алгоритмы расчетов и визуализации картины заполнения реализованы в виде сценариев в IDL. Отдельные задачи визуализации реализованы *m*-файлами в Matlab. Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать сечения и поверхности заполняющей жидкости в каждый момент времени (рис. 4–6, в).

С использованием разработанной установки гидромоделирования и программ восстановления картины заполнения проводили исследования процесса заполнения для разных пресс-форм, в частности, здесь приведены исследования для двух пресс-форм отливок (рис. 7, 8). В качестве модельной жидкости использовали окрашенную воду.

На рис. 4–6, а, б приведены кадры съемки процесса заполнения в двух ракурсах в некоторые моменты времени и им соответствующие трехмерные картины заполнения (см. рис. 4–6, в). Для данной конструкции пресс-формы системы характерно образование каверн и вихрей-водоворотов, удерживающих воздушные полости в областях 1, 2, 3 (см. рис. 6, а). Это обусловлено отрывом струи на резких углах.

Использование прозрачной воды не позволило восстановить картину трехмерного заполнения,

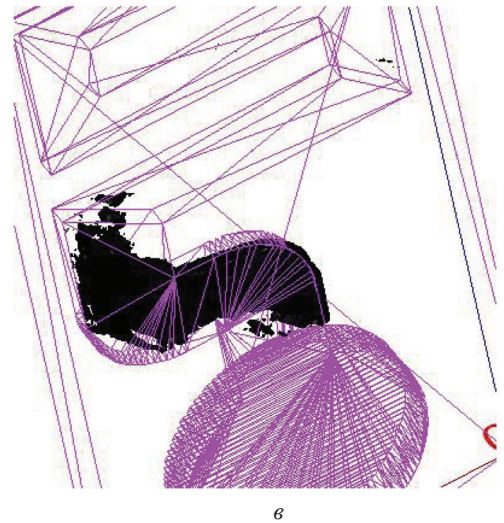
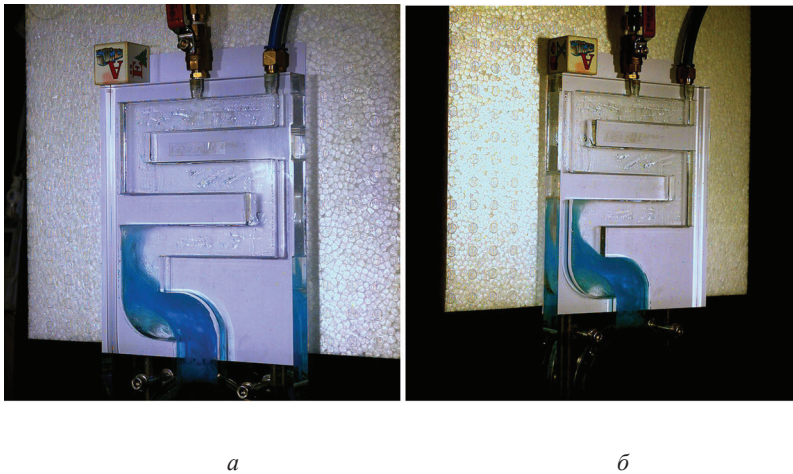


Рис. 4. Состояние процесса заполнения через 32 мс с момента начала впуска: *a, б* – исходные изображения; *в* – результат восстановления

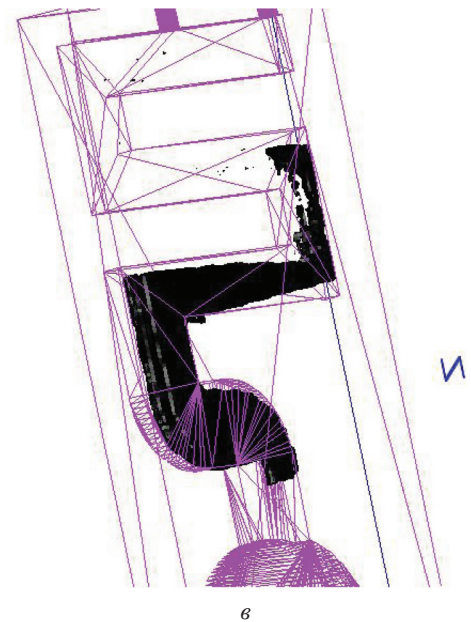
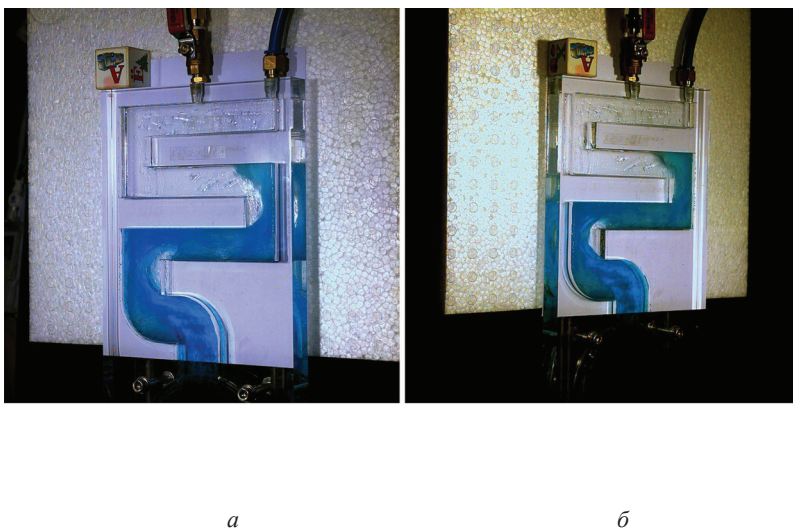


Рис. 5. Состояние процесса заполнения через 72 мс с момента начала впуска: *a, б* – исходные изображения; *в* – результат восстановления

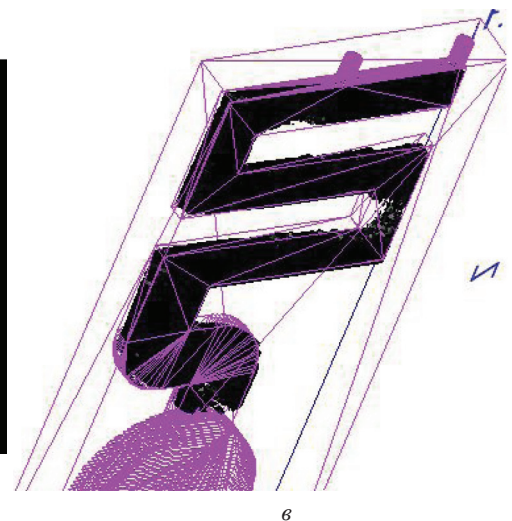
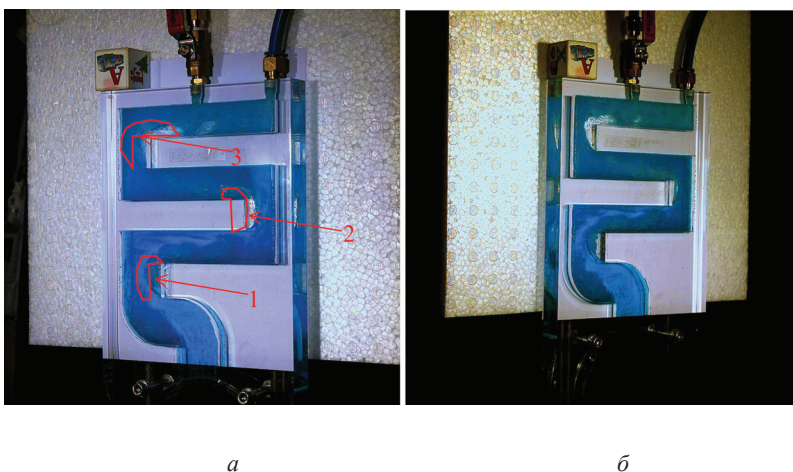


Рис. 6. Состояние процесса заполнения через 150 мс с момента начала впуска: *1, 2, 3* – области возможного формирования раковин и газовой пористости; *a, б* – исходные изображения; *в* – результат восстановления



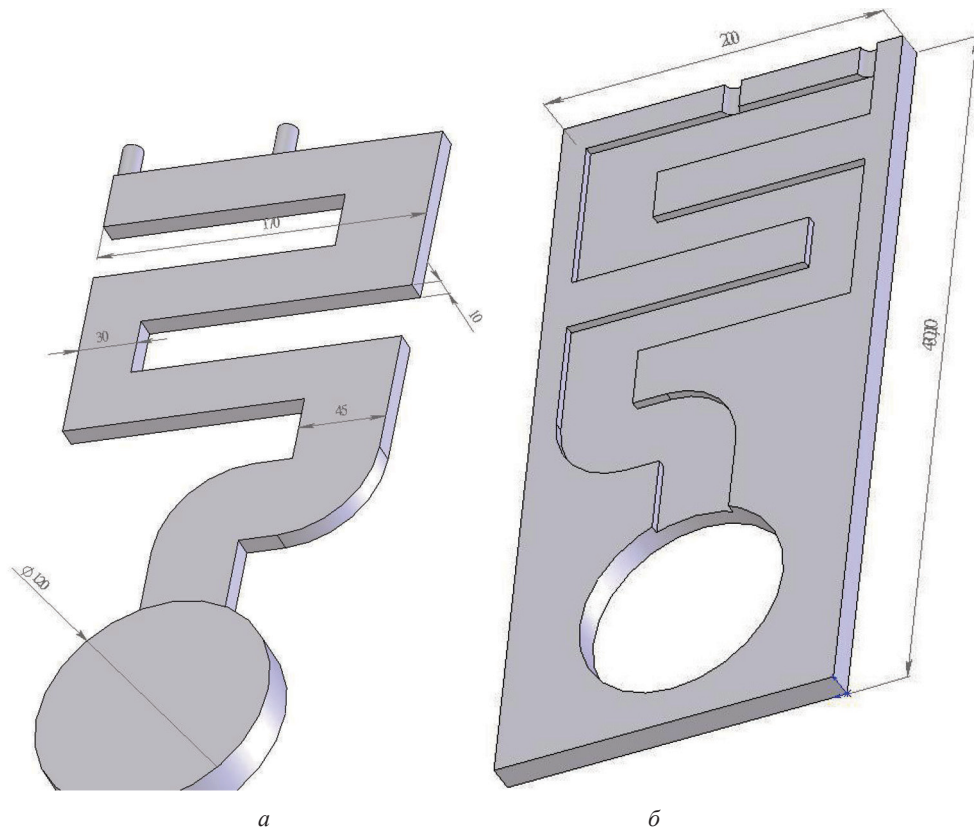


Рис. 7. Модели отливки (а) и пресс-формы (б) – сечение

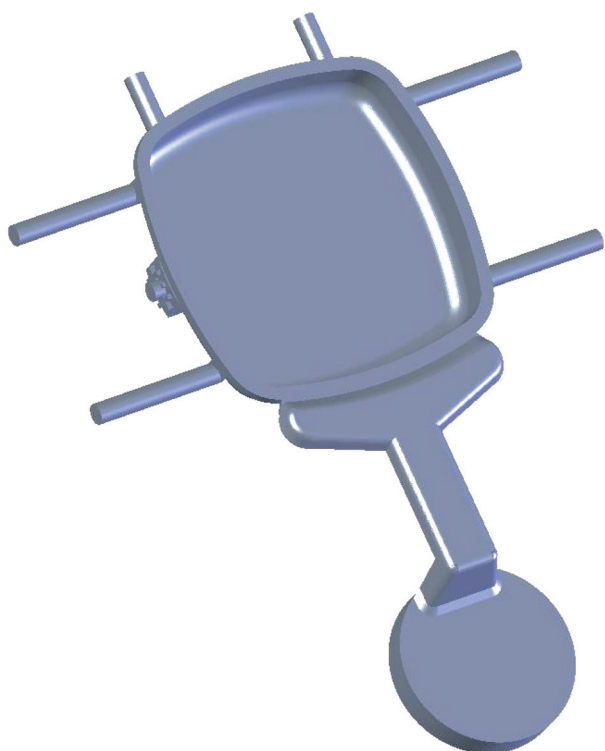


Рис. 8. Модель отливки

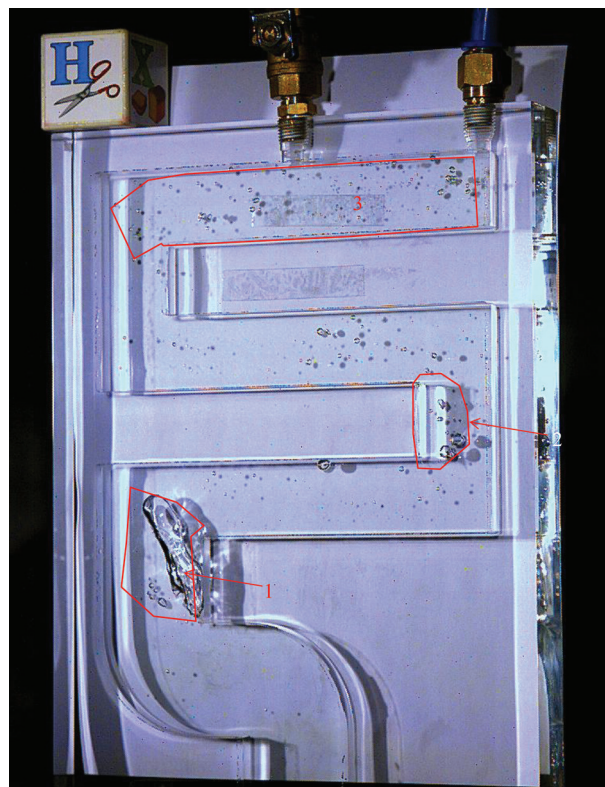


Рис. 9. Завершение процесса заполнения: 1, 2, 3 – области возможного формирования раковин и газовой пористости

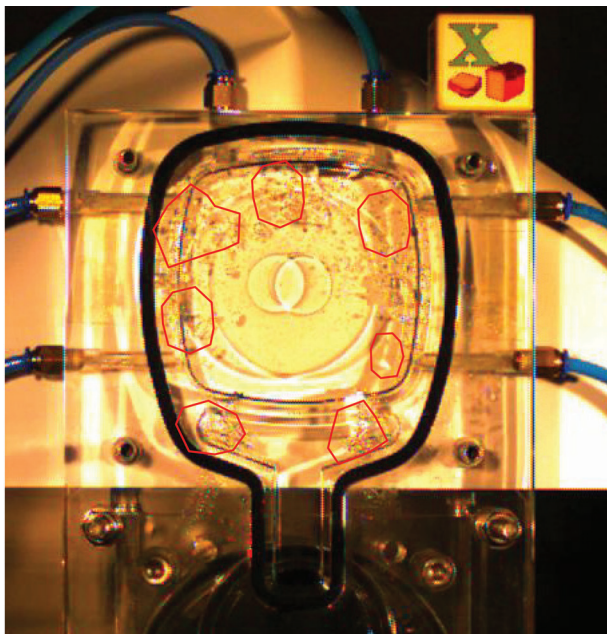


Рис. 10. Завершение процесса заполнения на скорости 50 см/с

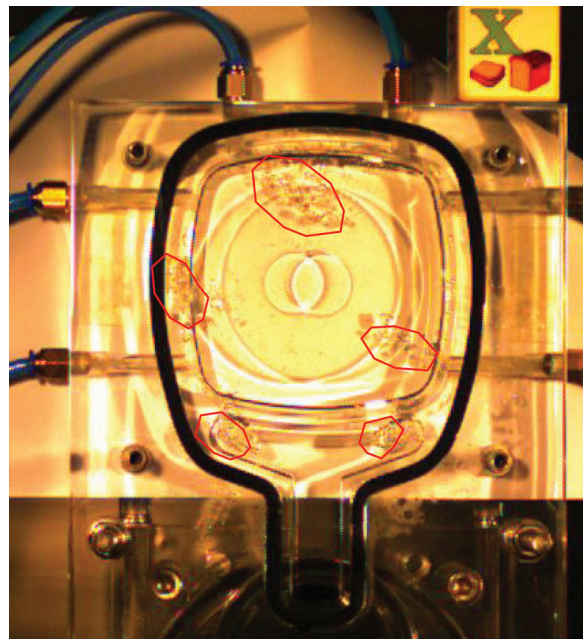


Рис. 11. Завершение процесса заполнения на скорости 80 см/с

поскольку алгоритм обработки предполагает, что жидкость по цвету отличается от фона. Однако для визуальной качественной оценки достаточно и этого. Как показал эксперимент, вихревые образования в потоке не исчезают на последней стадии заполнения (рис. 9) и служат причиной удержания воздушных полостей. Аналогичная ситуация наблюдается для отливки другой формы (см. рис. 8). На последней стадии заполнения сохраняются вихревые течения вблизи каналов вентиляции. Их не удалось устранить изменением скорости впуска, они лишь изменили свою форму и размер. На видеозаписи это выглядит еще более убедительно, чем на отдельных кадрах на рис. 10–12, где данные области помечены красными контурами. Очевидно, данная конструкция пресс-формы не годится для быстрых скоростей заполнения и подлежит пересмотру.

Преимуществами использования гидромоделирования при проектировании оснастки для литья под давлением является существенная экономия временных и материальных затрат. Гидромоделирование заполнения литейной формы расплавом является достаточно точным при перепадах температуры расплава в литниковой системе, обеспечивающих незначительное изменение его вязкости в процессе заполнения. Разработка математических моделей и их идентификация при помощи гидромоделирования позволяет существенно экономить средства на проектирование процесса литья под давлением в сравнении с проведением натурных экспериментов.

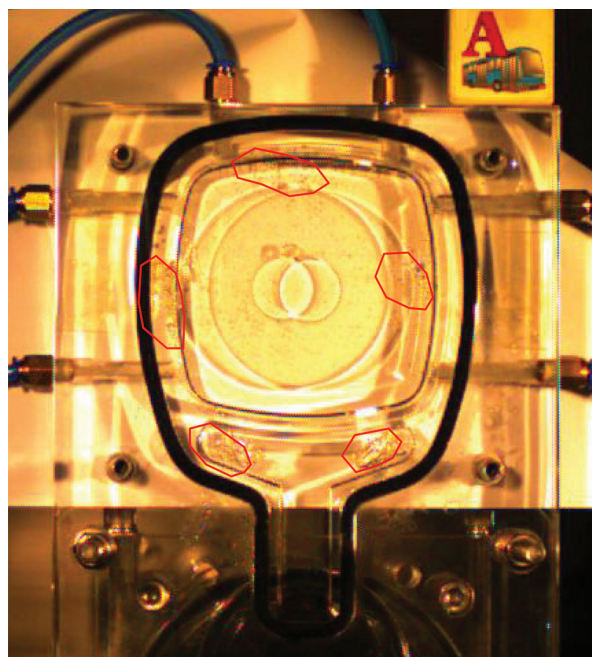


Рис. 12. Завершение процесса заполнения на скорости 300 см/с

Гидромоделирование на разработанной установке позволяет обнаружить возможные дефекты-полости, образующиеся в процессе заполнения формы, и выяснить, можно ли их устранить, изменяя скорость заполнения. Таким образом, гидромоделирование способствует оптимизации конструирования литниковых систем с целью избежания дефектов, вызванных некачественным заполнением литейной формы и оптимизации технологических и конструктивных параметров процесса литья.



**Литература**

1. Campbell J., Castings. Butterworth-Heinemann. 1991.
2. Kubo K., Pehlke R. D. Mathematical modeling of the porosity formation in solidification // Metallurgical Transactions. 1985. 16B. P. 359.
3. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
4. Research on mould filling process of melt in vertical centrifugal casting / Jingjie Guo, Changyun Li, Shiping Wu, Hengzhi Fu // Proc. 67<sup>th</sup> World Foundry Congress 5–7 June, Harrogate, UK. 2006.
5. Comparison of SPH simulations of High Pressure Die Casting with the experiments and VOF simulations of Schmid and Klein / J. Ha, P. W. Cleary // Int. J. Cast Metals Res. 2000. Vol. 12. P. 409–418.
6. Numerical Simulation of Filling Process in Die Casting / Y. B. Li, W. Zhou // Materials Technology. 2003. Vol. 18. N 1. P. 36–41.
7. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys / H.-Y. Hwang, J.-K. Choi, E. I. Marukovich, A. M. Branovitsky, I. L. Zakharov // Proceedings of 67<sup>th</sup> World Foundry Congress 5–7 June 2006, Harrogate International Centre, United Kingdom. – Harrogate, 2006.
8. Schumann R. W. A Real-Time X-Ray Radiography Study of the Fluid Flow of Aluminium in Gravity Die Casting and Validation of Computer Simulations and Water Analogue Modelling. Masters Thesis, The University of Queensland, 2000.
9. Экспериментальная верификация результатов моделирования течения расплавов, полученных с помощью компьютерной системы «Пролит-1» / В. Ф. Соболев, С. Г. Лихозов, Ф. С. Лукашевич, О. И. Чичко // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 5–8.
10. Duff, E. S. Fluid Flow Aspects of Solidification Modelling: Simulation of low pressure die casting: PhD thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering / The University of Queensland. 1999. P. 217.
11. Three dimensional mold filling simulation for casting and its experimental verification / S. H. Jong, W. S. Hwang // AFS Transactions. 1991. Vol. 99. P. 117–124.
12. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., 1987.
13. Аналоговое моделирование процессов литья под давлением / Е. И. Марукович, А. М. Брановицкий, И. Л. Захаров, Ки-Йонг Чой // Литье и металлургия. 2005. Ч. 1. № 2. С. 45–47.
14. Исследование гидродинамики расплава в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Литье и металлургия. 2006. № 4. С. 77–81.
15. Fluid Flow in Die Cavities Experimental and Numerical Simulation / M. Schmid, F. Klein // Transactions, 18th NADCA International Die Casting Congress and Exposition. Indianapolis, 1995. P. 93–99.
16. Three-dimensional image reconstruction for water modelling of metal casting processes / J.-K. Choi, K.-Y. Choi, H.-Y., E. I. Marukovich, A. M. Branovitsky, D. V. Dovnar, I. L. Zakharov // International Conference On Modelling and Simulation MS'2004, 27–29 April 2004, Minsk, Belarus. Minsk, 2004. P. 216–219.
17. The technique of calibration multi camera imaging system for fast water flow registration and reconstruction / J.-K. Choi, H.-Y. Hwang, K.-Y. Choi, I. Zakharov, A. Branovitsky // Proceedings of the Eight International Conference Pattern recognition and information processing, 18–20 May 2005. Minsk, Republic of Belarus. Minsk, 2005. P. 177–180.
18. Могильный С. Г., Беликов И. Л., Ахонина Л. И., Брежнев Д. В., Бордюков М. П. Фотограмметрия. Киев, Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1985.
19. Дубиновский В. Б. Калибровка снимков. М.: Недра, 1982.
20. Бобир Н. Я., Лобанов А. Н., Федорук Г. Д. Фотограмметрия. М.: Недра, 1974.