

**Э.А. СИМСОН**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Д.Б. ПИВОВАРОВ**, магистр, НТУ «ХПИ»;  
**В.Л. ХАВИН**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**С.А. НАЗАРЕНКО**, канд. техн. наук, с. н. с., НТУ «ХПИ»

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА**

Наведені підходи для розв'язання задачі моделювання фізико-механічних процесів при виготовленні корпусу поглинаючого апарату. Описана математична модель досліджуваного процесу. Наведені розрахункові та експериментальні результати дослідження.

Приведены подходы к численному моделированию физико-механических процессов при изготовлении корпуса поглощающего аппарата. Описана математическая модель исследуемого процесса. Приведены численные и экспериментальные результаты исследования.

In the paper the approaches are presented for task's solution of modeling of physical and mechanical processes at manufacturing of details by casting. The mathematical model of the researching process is described. The numerical and experimental results of research are discussed.

**Введение и постановка задачи.** Стремительное развитие CAD/ CAM/ CAE-систем является общемировой тенденцией промышленных технологий [1,2]. Исследование современных технологических процессов обуславливает необходимость интеграции математических моделей высокого уровня, описывающих взаимосвязанные физико-механические поля [3]. Увеличение производительности компьютеров, повышение эффективности вычислений (за счет сетевых Internet-технологий, многопроцессорности и параллелизации) способствовало интеграции соответствующих вычислительных технологий для так называемой симуляции и инженерного анализа моделирования виртуальных испытаний [4].

Литейное производство является основной базой по подготовке заготовок для многих отраслей машиностроения. Качество производимых отливок напрямую связано с этапом разработки технологического процесса, то есть с выбором оптимальных параметров процесса литья. Очевидно, что неправильно выбранные параметры литья (форма литниковой системы, скорость заливки, температура расплава, тип противопригарного покрытия и тому подобное) могут существенно снизить качество и повысить процент брака. Вместе с этим, в условиях высокой конкуренции и непрерывного повышения цен на энергоресурсы снижение брака даже на несколько процентов дает ощутимый экономический эффект.

Применение методов математического моделирования литейных процессов является одним из наиболее действенных способов увеличения эф-

фективности производства. Изучая полученные расчётным способом распределения температурно-фазовых полей в отливке и форме, количество жидкой фазы, поля скоростей и давлений, места возможного образования усадочных раковин и микропористости, траекторию и места скопления шлаковых частиц можно с минимальным количеством натуральных экспериментов судить о достоинствах и недостатках предлагаемых технологических процессов.

В настоящее время существует несколько подходов к моделированию процесса литья с помощью различных численных методов: метод конечных элементов; метод конечных разностей; метод конечных объёмов (МКО). Как показано в [5,6], МКО является более предпочтительным при решении задач заполнения формы металлом и её последующего остывания, так как он более эффективен в задачах гидродинамики и позволяет учесть взаимодействие различных сред: жидкого и застывшего сплава, воздуха.

Целью данной работы являлся поиск путей снижения основных видов литейного брака с помощью проведения численного моделирования процесса литья на примере детали корпуса поглощающего аппарата ПМКП-110.

**Физическая модель процесса.** Анализ основных типов брака, приведенных в табл. 1, показал, что при заливке детали типа «Корпус поглощающего аппарата» применяемые параметры технологического процесса не являются оптимальными. В частности, это связано с появлением усадочных раковин в тепловых узлах отливки, которое вызвано тем, что при затвердевании отливки появляются изолированные участки жидкого металла, не связанные с питателями или прибылью.

Объём изолированного участка в этом случае остаётся постоянным, а подпитка жидким металлом невозможна. При дальнейшем охлаждении, из-за сжатия стали при затвердевании, в таких участках образуются поры или полости. Устранить данный дефект возможно с помощью, например, усовершенствования литниковой системы [5].

Появляющиеся в отливке шлаковые и газовые раковины связаны с попаданием в литниковую систему соответственно шлаковых и газовых частиц и захватом их потоком расплавленного металла. Данный дефект проистекает из-за неудачной, с точки зрения гидродинамики, геометрии литниковой системы.

Литье детали ПМКП-110.00.00.002 «Корпус» производится по технологии гравитационного литья в песчано-глинистые разовые формы. Материал отливки - Сталь 30 ГСЛ-Б ГОСТ 22253-76. Форма изготовлена по технологии холоднотвердеющей смеси на основе фуранового затвердителя. Для изготовления стержней использована технология cold-box-amin. Схема литья приведена на рис 1. Угол наклона струи материала  $Q$  составляет  $15^\circ$ .

Основные типы брака при отливке ПМКП-110 «Корпус».

Тип брака	Процент брака	Характеристики
Усадочные раковины	15%	15x10x5 мм
Шлаковые раковины	10%	$SiO_2, Fe_2O_3$ размер 0,2-1мм
Газовые раковины	30%	
Горячие трещины	5%	
Прочее	40%	Не связано с технологией

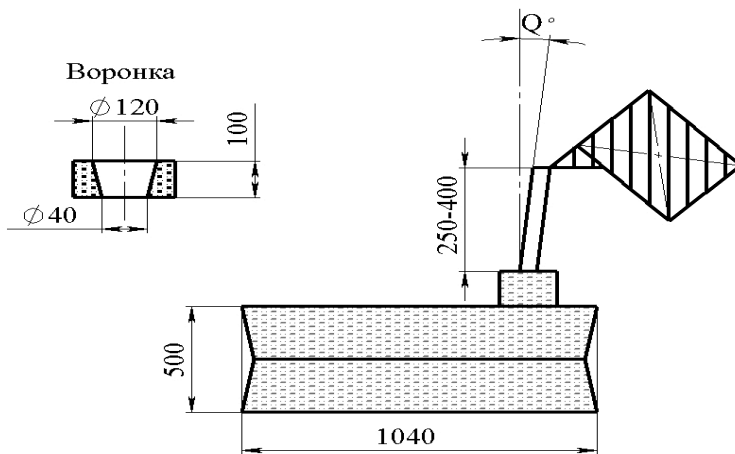


Рисунок 1 – Схема заливки.

Весь процесс моделирования литья можно условно разделить на 3 этапа:

1. Разработка математической модели, выбор основных варьируемых параметров, влияющих на качество технологического процесса.
2. Проведение компьютерной симуляции и верификация результатов.
3. Анализ чувствительности математической модели к выбранным параметрам технологического процесса.

При построении математической модели процесса литья расплавленного металла в форму процесс представляется как нестационарная задача течения вязкой неоднородной жидкости с учетом конвективного теплообмена, фазовых переходов, взаимодействия различных сред (сплава и вытесняемого из формы газа), изменения геометрии канала в ходе его заполнения. Подробное рассмотрение особенностей постановок задачи, вычислительных аспектов данной задачи и методов моделирования литейных процессов приведены в [6].

**Уравнения математической модели.** Метод конечных объёмов использует уравнения в интегральной форме. В таком виде уравнения движения (*уравнения Навье-Стокса*) можно интерпретировать как закон сохранения импульса (1) – изменение импульса внутри объёма равно импульсу ( $\rho U$ ), вносимому в объём вместе с потоком через поверхность ( $Un$ ), и мощности внешних сил ( $A$ ). Внешней силой может быть давление на поверхность, вызывающее движение в материале.

*Уравнение неразрывности* (2) принимает вид уравнения сохранения массы – изменение массы в некоем объёме ( $\rho dV$ ) равно потоку массы ( $\rho U$ ) через поверхность этого объёма. *Уравнения энергии* (3) описывает сохранение полной внутренней энергии вещества, то есть суммы тепловой энергии (записанной через энтальпию  $h$ ) и кинетической энергии ( $0,5U^2 \rho dV$ ). Изменение полной внутренней энергии некоего объёма равно энергии, вносимой потоком вещества ( $\bar{U}\bar{n}$ ) сквозь поверхность, а также мощности внутренних источников ( $N$ ).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot \bar{U} dV = - \int_S \rho \cdot \bar{U} \cdot \bar{U} \cdot \bar{n} dS - A, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \int_S \rho \bar{U} \cdot \bar{n} dS, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho (h + \bar{U} \cdot \bar{U} / 2) dV = - \int_S \rho (h + \bar{U} \cdot \bar{U} / 2) \bar{U} \cdot \bar{n} dS - N, \quad (3)$$

где  $h$  – энтальпия;  $U$  – вектор скоростей;  $n$  – нормаль к поверхности ячейки;  $\rho$  – плотность жидкости;  $A$  – работа внешних сил, совершаемая за единицу времени  $dt$ ;  $N$  – мощность внутренних источников тепла и кинетической энергии;  $V$  – объём ячейки;  $S$  – площадь поверхности конечного объёма  $V$ . Граничные условия третьего рода представляют так называемые уравнения баланса.

Для решения задачи гидродинамики в первую очередь необходимо определить, является ли течение расплава ламинарным или турбулентным. Известно соотношение для определения *числа Рейнольдса*:

$$Re = v_0 l_0 / \nu, \quad (4)$$

где  $v_0$  – характерная скорость жидкости в канале;  $l_0$  – характерный размер канала;  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Расчёты показали, что число Рейнольдса в литниковой системе составляет  $Re = 11 \cdot 10^3 - 2,9 \cdot 10^5$ , что значительно превышает критическое значение  $Re_{кр} = 2300$ , следовательно, поток является турбулентным. Так как турбулентное течение наблюдается лишь в узком и относительно коротком прямом канале литниковой системы, при моделировании заливки всей формы может

быть использована модель ламинарного течения.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы параметры процесса, приведенные в табл. 2. Геометрическая модель детали и исходная форма литниковой системы приведены на рис 2.

Таблица 2

Основные параметры заливки.

Параметр	Обозначение	Исходное значение
Толщина стенки формы, мм	$H$	150
Напор, мм	$h$	300
Коэффициент теплоотдачи на границе расплав-форма, Вт/м <sup>2</sup> /К	$\lambda$	350-750
Время заполнения, с	$t$	40
Диаметр струи, входящей в литниковую систему, мм	$d$	18
Температура расплава, °С	$T$	1580

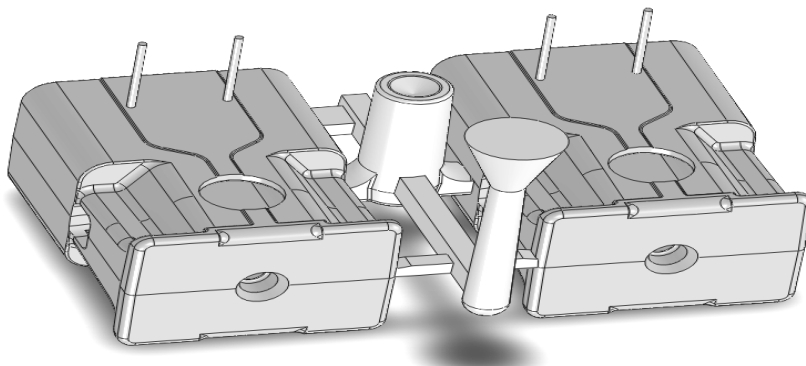


Рисунок 2 – Геометрия детали и литниковой системы.

Одним из основных параметров, влияющих на процесс заполнения и остывания формы, является коэффициент теплоотдачи на границе расплав-форма, который во многом определяется функцией, типом и толщиной противопригарного покрытия. Теоретические соотношения, приведенные в работе [7], позволяют вычислить его для случая идеального теплового контакта сплава и формы. Приняв указанное выше допущение был определен коэффициент теплоотдачи  $\lambda_1 = 2500-10000$  Вт/м<sup>2</sup>/К. С учётом противопригарного покрытия толщиной  $\delta = 0.4$  мм и теплопроводностью  $\alpha = 0.4$  Вт/м/К получаем согласно [7] результирующий коэффициент

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{\alpha}} = 700-900 \text{ Вт/м}^2/\text{К}. \quad (5)$$

Как показано в [8] рекомендуется принимать коэффициент теплоотдачи

для песчаных форм в пределах  $\lambda_1 = 500-1000$  Вт/м<sup>2</sup>/К, так как тепловой контакт является неидеальным из-за наличия пор и воздушных прослоек на поверхности песчано-глинистой формы. Тогда, с учётом покрытия, получаем  $\lambda_2 = 330-500$  Вт/м<sup>2</sup>/К. Следует отметить, что при моделировании заливки со значением  $\lambda_2 > 500$  наблюдалось преждевременное застывание сплава в канале и, следовательно, недолив.

**Анализ результатов и чувствительность к параметрам процесса литья.** В ходе численного моделирования с помощью МКО были выявлены области отливки, которые при данных технологических условиях становятся изолированными при застывании, и в которых высока вероятность появления усадочных дефектов рис 3. Данные результаты совпали с наблюдаемым на предприятии браком. При моделировании отслеживалось движение вброшенных в поток металла шлаковых и газовых частиц, выявлялись места их скопления (рис 4). Данные результаты также подверглись верификации и показали качественное совпадение.

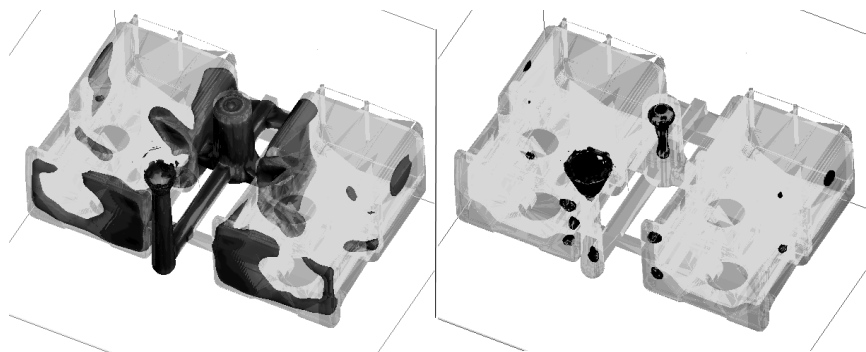


Рисунок 3 – Изолированные зоны жидкого металла и расположение усадочных раковин.

На основании результатов, полученных при варьировании технологическими условиями литья, были получены следующие выводы, которые могут быть использованы в производстве. Скорость течения (время заполнения) оказывает существенное влияние на расположение газовых и шлаковых включений. Медленное равномерное течение способствует всплытию всех частиц в области прибыли. Увеличение толщины и коэффициента теплоотдачи на границе расплав-форма уменьшает области, в которых высока вероятность появления усадочных дефектов. Колебание температуры расплава в пределах  $\pm 60^\circ\text{C}$  не оказывает влияние на затвердевание. Большие колебания технологически невозможны.

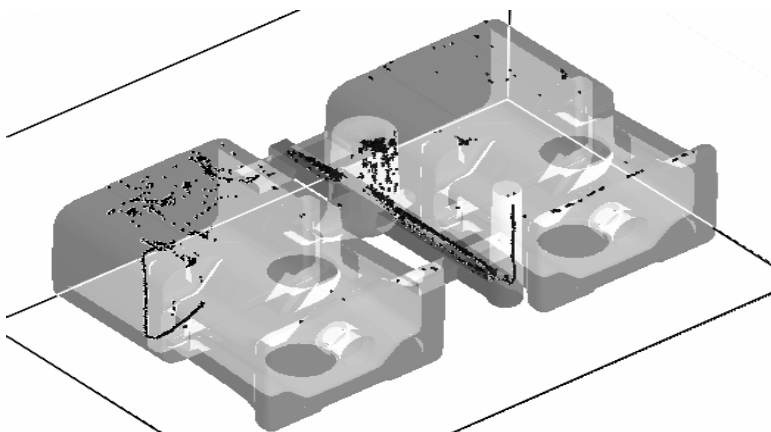


Рисунок 4 – Места скопления частиц газа и шлака.

Используемая на данный момент форма стояка способствует появлению интенсивных завихрений в литниковой системе. Это нежелательно как с точки зрения захвата сплавом воздушных частиц, так и из-за вероятности размыва стенок песчаной формы потоком расплава. На рис. 5 представлена модель с незначительно отличающейся геометрией литниковой системы. На рис. 6 приведено поле усадочных дефектов для этой модели. Уменьшилось количество и размер усадочных раковин в теле отливки, основной объём усадочных раковин сместился в литниковую систему.

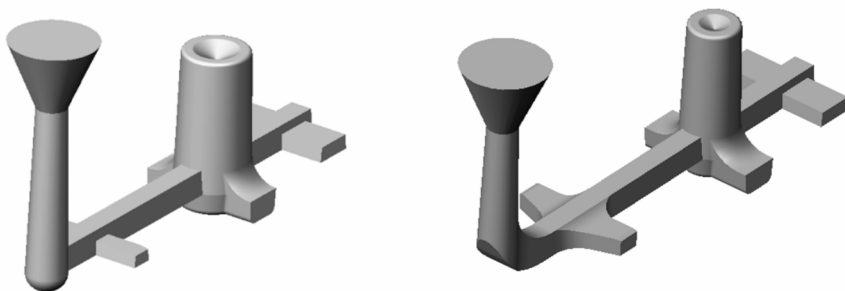


Рисунок 5 – Сравнение изменённой литниковой системы (справа) с исходной.

Диаметр бобышки (прибыли) можно уменьшить с 11,38 до 7,26 кг, что приведет к увеличению степени полезного использования материала. Установка выпоров возле боковых стенок позволяет уменьшить размер усадочных раковин в этой области. Форма передних боковых ответвлений литниковой системы такова, что способствует образованию в этой области усадочных дефектов. Образование изолированных участков хорошо видно на рис. 3. Утолщение этих каналов и увеличение радиусов скругления

позволяет уменьшить размер усадочных раковин и, благодаря устранению завихрений, уменьшить количество проходящих сквозь эти каналы шлаковых частиц.

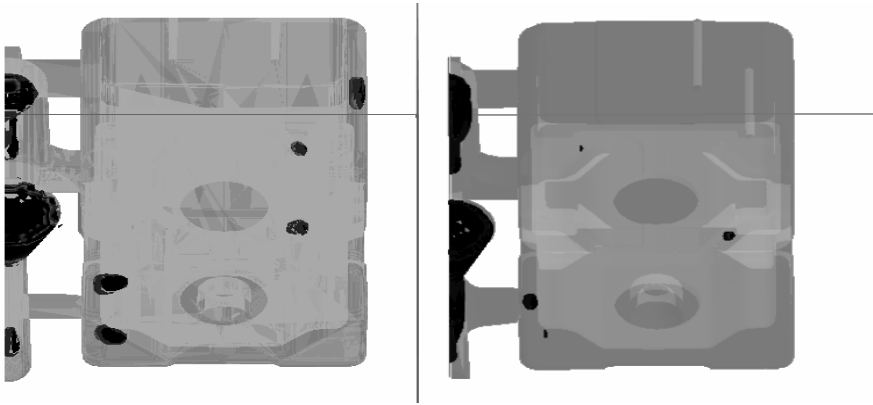


Рисунок 6 – Усадочные дефекты при изменённой форме литников (справа) в сравнении с исходной (слева).

**Выводы и перспективы развития модели.** Получен ряд результатов, которые могут облегчить дальнейшее проведение численных исследований: Оказалось, что толщина формы не оказывает существенного влияния на процесс затвердевания ввиду низкой теплопроводности материала, поэтому при моделировании можно ограничиться минимальной толщиной формы не более 15 мм, что существенно уменьшит количество конечных объемов. С помощью цифрового прототипа корпуса поглощающего аппарата можно уменьшить число опытных образцов, ускорить выпуск конструкций на рынок.

**Список литературы:** 1. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И. Система моделирования рабочих процессов интегрированных технологий. // Сучасні технології у машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 1– Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – С. 236-268. 2. <http://www.cimdata.com/> 3. F Flager, B Welle, P Bansal, G Soremekun Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). – 2009. – Vol. 14. – P. 595-612. 4. Тимофеев Ю.В., Фадеев В.А., Степанов М.С., Назаренко С.А. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут». – Харків, НТУ “ХПІ”, 2009. – Вип. 1. С. 86-95. 5. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: учеб./под редакцией Э.Б. Гофмана – Екатеринбург, 2006 – 454с. 6. Alexandre Reikher, Michael R. Barkhudarov, Casting: an analytical approach. Springer-Verlag London Limited, 2007. – 177с. 7. Цветков Ф.Ф. Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебное пособие для вузов, испр. и доп. М: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с. 8. ProCAST User Manual – version 2010.0/ Pre-Processing/ Thermal.

Поступила в редколлегию 27.01.2011