

УДК 621.744.47; 621.744.49-52

**П. В. Русаков, О. И. Шинский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **СПОСОБ ВИБРО- ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ**

*Рассмотрен новый способ уплотнения литейной формы с применением трехфазного силового возмущения. Исследован процесс формообразования, протекающий в песчаной смеси при комбинированном воздействии вакуума, вибрации и газовых ударных импульсов. Приведена модель адаптивной системы управления для автоматического непрерывного контроля процесса уплотнения формовочной смеси в литейной форме. Разработанная модель включает подсистему оперативной экспертной оценки и идентификации текущего состояния плотности формовочной смеси.*

**Ключевые слова:** формовка, автоматическое управление, вибрация, вакуум, ударная волна, литейная форма.

*Розглянуто новий спосіб ущільнення ливарної форми при застосуванні трифазних силових навантажень. Досліджено процес формоутворення, що протікає в піщаній суміші при комбінованому впливі вакууму, вібрації та газових ударних імпульсів. Представлено модель адаптивної системи управління для автоматичного безперервного контролю процесу ущільнення формувальної суміші в ливарній формі. Розроблена система включає підсистему оперативної експертної оцінки та ідентифікації поточного стану щільності формувальної суміші.*

**Ключові слова:** формовка, автоматичне керування, вібрація, вакуум, ударна хвиля, ливарна форма.

*There described is the new method of compaction the mold by the action of three-phase forces. Studied processes in the sand mold for the combined effect of vacuum, vibration and gas pulses. It is represented the new model of the adaptive control system for the control of automatic continuity process of compaction in the mold offered. The control system further comprises a subsystem for identifying the current operational state of the density of the sand in the mold.*

**Keywords:** moulding, automatic control, vibration, vacuum, shock wave, casting mold.

**Р**ассматривая процессы формовки, необходимо отметить, что имеются задачи, касающиеся оперативного контроля плотности формовочной среды, решение

которых позволит снять проблему синтеза оптимального управления технологией изготовления литейной формы [1, 2]. Поиск эффективных способов контроля и разработка экспертных систем оценки процесса формообразования и плотности формовочной смеси (ПФС) проводятся во многих компаниях, производящих литейное оборудование [3, 4]. Однако предлагаемые ими технические решения зачастую тяжело адаптировать к существующим технологическим схемам литейного производства.

### *Постановка задачи*

Оперативный контроль параметров компактирования литейной формы необходим для принятия оптимальных решений по управлению процессом формовки. По текущим показателям, например пористости смеси, можно делать выводы о степени завершенности процессов формовки и судить о состоянии литейной формы, ее газопроницаемости и напряженно-деформированном состоянии.

С другой стороны, машины и аппаратные комплексы, обеспечивающие быстрое компактирование и наиболее интенсивный динамический прирост плотности формовочной смеси в литейной форме, все больше основываются на использовании комбинированных силовых воздействий, благодаря чему при формовке достигаются высокие показатели плотности песчаной смеси.

Задачи настоящей работы заключались в разработке эффективного, адаптируемого к существующим литейным технологиям, способа уплотнения формовочной смеси вокруг моделей, имеющих сложную конфигурацию. Для этих целей предполагалось применить трехфазное силовое возмущение литейной формы под действием вакуума, вибрации и газовых ударных импульсов.

Поставленная цель предусматривала также создание модели адаптивной системы управления с подсистемой автоматического непрерывного контроля процесса уплотнения формовочной смеси в литейной форме. Разрабатываемая модель должна обладать возможностями оперативной экспертной оценки и идентификации текущего состояния плотности кварцевого наполнителя в литейной форме.

### *Разработка новых процессов*

При исследовании процессов формообразования необходимо отметить, что в большинство действующих технологий при формовке заложена простая схема уплотнения песка: литейную форму располагают на платформе вибрационного стола. Однако, такое упрощение не обеспечивает высокой эффективности продвижения огнеупорного наполнителя в протяженные каналы и полости разовых моделей. Поэтому на этапе сборки формы полости и каналы сложных моделей (корпус гидрораспределителя и другие) предварительно набивают песком и после указанной операции размещают в опоках.

Сущность новой технологии заключается в комплексном воздействии на формовочную среду по схеме трехфазного силового возмущения литейной формы, то есть в процессе вибрационной формовки циклически изменяют давление газа в литейной форме и при этом чередуют два газовых состояния: газовое разрежение и возбуждение газовых ударных импульсов.

Алгоритм процесса формообразования трехфазным силовым воздействием состоит в следующем: в течение вибрации литейной формы в три стадии в каждом цикле периодически проводят изменение ее газового состояния. Сначала на первой стадии повторяющихся периодов изменяют газовое давление так, что в форме образуется газовое разрежение  $P_1^i$ , затем на последующих вторых стадиях путем подключения контрольного ресивера с объемом  $v_{кр}$  и внутренним давлением газа  $P_a^i$  в форме устанавливают равновесное с ресивером газовое давление  $P_2^i$ .

После указанных операций на всех третьих стадиях в литейной форме устанавливают атмосферное давление, при этом в каждом цикле измеряют и регистрируют текущее давление газовой среды, образующейся в форме и ресивере. Далее по

зарегистрированным значениям газового давления вычисляют текущие значения суммарного объема пустот  $v_1^i$  в литейной форме, по которым анализируют эффективность уплотнения формовочной смеси и определяют время завершения процесса формования.

Для расчета и экспертной оценки текущего значения суммарного объема пустот в  $v_1^i$  литейной форме автоматически проводится вычисление по формуле

$$v_1^i = v_{кр} \frac{P_a^i - P_2^i}{P_2^i - P_1^i} - v_{ст},$$

где  $v_{ст}$  – внутренний проходной объем соединительного трубопровода между литейной формой и УДС. Момент завершения процесса формования фиксируется путем сравнения значения объема пустот в форме  $v_1^i$ , рассчитанного по текущему циклу со значением объема пустот  $v_1^{i-1}$ , которое было ранее рассчитано в предыдущем цикле.

Важной особенностью указанного процесса формования трехфазным силовым воздействием является также управление моментами начала и конца наложения вибрации на литейную форму, которые устанавливаются при создании в литейной форме газового разрежения в интервале 40-10 кПа.

На рис. 1 приведена структурная схема устройства для формовки насыпных ли-

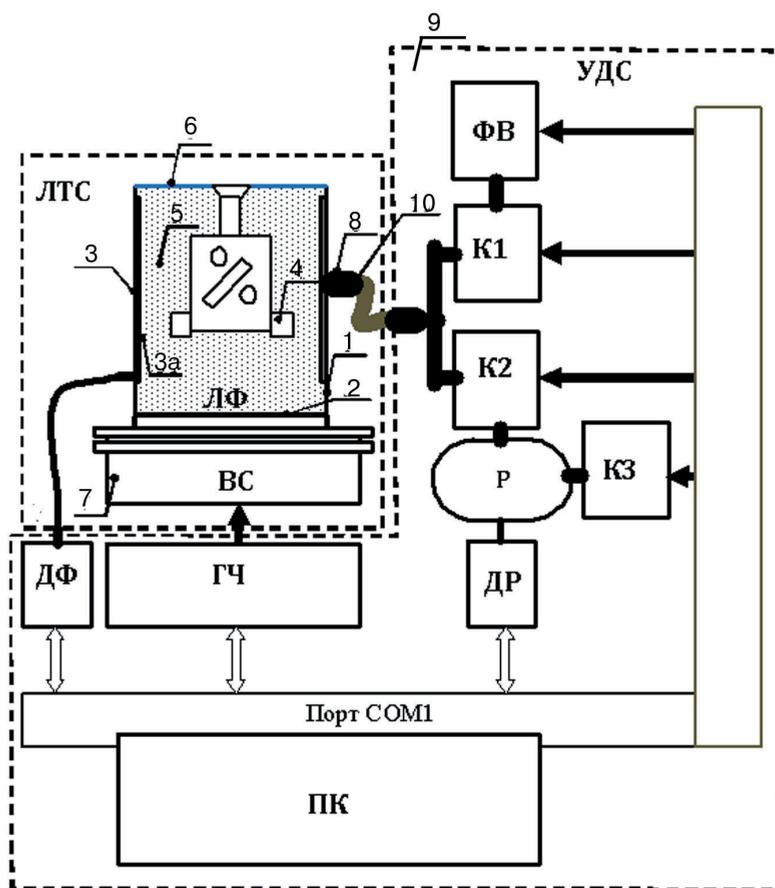


Рис. 1. Структурная схема устройства для формовки насыпных литейных форм трехфазным силовым воздействием

тейных форм трехфазным силовым воздействием, а на рис. 2 показана циклограмма, раскрывающая данное техническое решение и принцип идентификации параметров уплотнения формовочной среды.

Процесс формовки начинают с предварительной сборки литейных форм в герметичных опоках-контейнерах 1. Конструкция опок-контейнеров включает жесткое дно 2 и расположенный на внутренних боковых поверхностях стенок 3 газодинамический коллектор 3а, который содержит множество рассредоточенных по поверхности отверстий – вент (условно не показаны). Указанные особенности газодинамического коллектора позволяют ему выполнять две функции. Прежде всего, на первых стадиях всех циклов формовки он обеспечивает рассредоточенный отсос газов из опоки. Функционально на второй и третьей стадиях в каждом периоде газодинамический коллектор обеспечивает обработку формовочной смеси охлажденным сжатым воздухом, который предварительно накапливают в контрольном ресивере (Р).

После монтажа блока моделей 4 проводят засыпку опоки дисперсной формовочной смесью 5. На завершающей стадии сборки литейной формы опоку сверху накрывают герметичной пленкой 6 и устанавливают на вибрационный стол 7. Параметры стола 7 позволяют возбуждать в литейной форме гармоничную вертикальную вибрацию в технологическом диапазоне частот 5-100 Гц и обеспечивать вертикальные ускорения в пределах  $0,50 < g < 0,95$  ( $g$  – ускорение свободного падения). На завершающей стадии сборки коллектор 3а присоединяют через штуцер 8 к управляющей диагностической системе 9 (УДС) с помощью соединительного трубопровода 10.

В состав УДС входят генератор частоты, газодинамический блок для создания газового разрежения и газовых ударных импульсов, а также автоматизированная система для адаптивного управления процессом формообразования. Диагностика и сбор информации системой о текущем состоянии процесса формообразования осуществляется посредством исполнительных модулей и измерительных датчиков, которые входят в состав УДС и подключены к персональному компьютеру (ПК) через соответствующие порты.

Структурно-газодинамический модуль включает также пневматические исполнительные устройства, объединенные с помощью соединительных трубопроводов: формователь вакуума ФВ; электропневматические клапаны К1, К2, К3; ресивер Р; датчик газового давления в форме ДФ; датчик газового давления в ресивере ДР. Наличие указанных элементов в конструкции газодинамического модуля позволяет задавать и поддерживать сменный режим газового давления в поровом пространстве формовочной смеси, а также отдельно формировать в каждом цикле в три стадии внутренний газовый режим литейной формы с заданными параметрами давления газов.

Для стартовой адаптации системы после сборки литейной формы в ПК вводят исходные данные [5-8]. Первичные константы, которые передаются в базу данных, включают параметры опоки-контейнера, параметры разовой модели, реологические характеристики формовочной смеси, значение внутреннего объема соединительного трубопровода 10.

Процесс начинается с открытия клапана К1 (клапаны К2, К3 остаются в закрытом состоянии), рис. 2. В ПК по каналам обратной связи поступает текущая информация о первой стадии первого цикла процесса формообразования; поддерживается режим создания во внутреннем технологическом пространстве формы газового разрежения. В процессе откачки газов в литейной форме одновременно создаются условия для протекания процесса обжигания формовочной смеси. Благодаря жесткой конструкции опоки-контейнера силы обжигания действуют в вертикальном направлении и сдавливают формовочную смесь через пленку на поверхности формы. За счет снижения газового давления внутри формы растут силы сцепления между частицами формовочной смеси, а также между частицами смеси и моделью, в результате чего

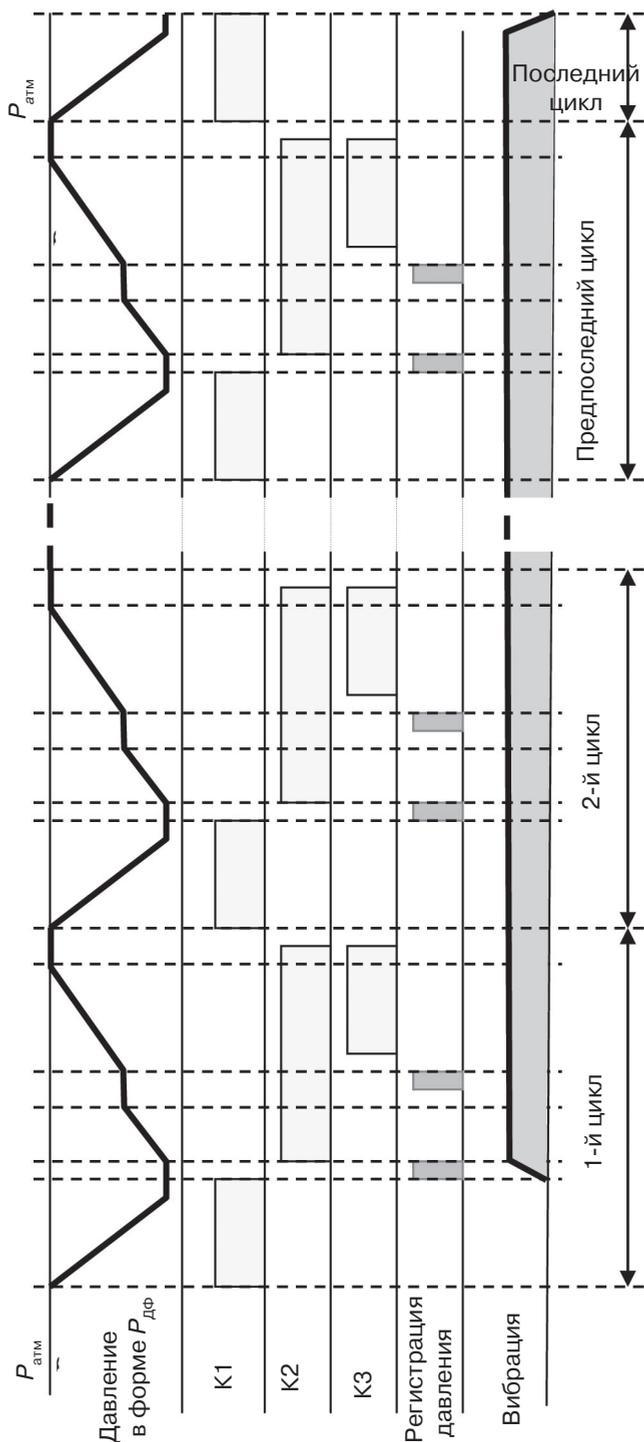


Рис. 2. Циклограмма работы системы формообразования трехфазным силовым воздействием

литейная форма приобретает свойства монолитного жесткого тела. Одновременно с откачкой газа проводят контроль уровня газового разрежения датчиком ДФ и передают данные в ПК. В момент достижения в первом цикле постоянного газового разрежения 40-10 кПа ПК регистрирует достигнутое значение в электронной памяти и выдает команды на закрытие клапана К1 и на пуск генератора частоты, который задает вибрацию литейной формы.

После выхода вибрации на рабочую частоту ПК формирует команду открытия

клапана К2. При открытии К2 контрольный ресивер Р связывается с внутренним пространством опоки. Поскольку к моменту открытия клапана К2 в литейной форме уже было создано газовое разрежение, а в контрольном ресивере на момент его включения было атмосферное давление 100 кПа, то при открытии К2 воздух, накопленный в ресивере Р, выбрасывается распределенным потоком через отверстия-венты в формовочную смесь. Под действием воздушного потока на внутренней боковой поверхности ОК формируется газодинамический фронт, который вначале воздушным импульсом, а затем ниспадающим давлением и силами газовой фильтрации обеспечивает силовое воздействие на формовочную смесь и создает условия перемещения частиц формовочной смеси от боковой поверхности опоки к центру литейной формы. Газодинамические толчки активируют процессы горизонтального смещения частиц формовочной смеси и перемещения их в направлениях к поверхности модели. Процессы воздушного смещения дисперсных частиц смеси происходят в режиме воздействия на литейную форму вибрации, что, в свою очередь, приводит к ослаблению внутреннего трения и механических связей между частицами формовочной смеси. В результате совместных действий воздушных импульсов и вертикальной вибрации формовочная смесь начинает интенсивно перемещаться в горизонтальном направлении и под напором воздушного толчка заполнять пустоты и каналы разовой модели. Указанные процессы протекают до тех пор, пока давление внутри формы не станет равным давлению воздуха в ресивере.

С данного момента проводят вторую регистрацию давления и затем рассчитывают текущее значение объема пористого пространства, которое будет соответствовать первому циклу процесса формообразования. После записи  $v_1^i$  следует команда на включение К3 (см. рис. 2). При открытии К3 внутреннее пространство литейной формы через ресивер соединяется с атмосферой и начинается третья стадия первого цикла процесса вибро- газодинамической формовки.

Процесс компактирования формовочной смеси в третьей стадии протекает в условиях постепенного уменьшения сил атмосферного обжатия литейной формы и разблокировки частиц формовочной смеси. При этом в литейную форму через ресивер непрерывно натекает воздух и давление газа в ней приближается к атмосферному. В этот период частицы формовочной смеси находятся под комплексным воздействием сил вибрации и собственной массы. В это время также поддерживается режим затекания формовочной смеси в места, имеющие низкую плотность. В момент достижения в третьей стадии постоянной величины атмосферного давления в форме клапаны К2 и К3 закрываются и через интервал в 1-2 с по команде ПК включается клапан К1, таким образом начинается второй цикл процесса компактирования формовочной смеси.

Процесс формовки во втором и последующих циклах осуществляется по аналогии с первым циклом при непрерывной вибрационной обработке литейной формы. В последующих циклах также как и в первом проводят автоматическое измерение объема пустот, а начиная со второго периода, – автоматическое сравнение значения объема пористого пространства внутри ОК в текущем цикле с измеренным значением объема пористого пространства в предыдущем цикле и таким образом анализируют динамику процесса уплотнения формовочной смеси. Указанные действия продолжают до момента стабилизации значений объемов пористого пространства в двух последующих циклах. При достижении двух равных значений объема пористого пространства ПК по программе выдает команды на выполнение последнего завершающего цикла вибро- газодинамической формовки.

Завершающий цикл формирования является укороченным, он связан только с созданием газового разрежения в литейной форме. В процессе снижения газового давления внутри формы растут силы сцепления между частицами формовочной смеси, в результате чего литейная форма приобретает дополнительную жесткость.

Следовательно, формируются условия мягкой безопасной остановки вибрационного стола и устранения нежелательных резонансных явлений при выводе литейной формы из вибрационного состояния. Вибрация отключается по команде ПК при достижении постоянной величины газового разрежения внутри литейной формы.

Заливка литейной формы расплавом осуществляется после окончания процесса формообразования, непосредственно на вибростоле.

### Заключение

Предложен способ уплотнения литейной формы с применением трехфазного силового возмущения. Исследован процесс формообразования, протекающий в песчаной смеси при комбинированном воздействии вакуума, вибрации и газовых ударных импульсов. Приведена модель адаптивной системы управления для автоматического непрерывного контроля процесса уплотнения формовочной смеси в литейной форме. Разработанная модель включает подсистему оперативной экспертной оценки и идентификации текущего состояния плотности формовочной смеси.

Принцип функционирования системы основан на фиксации изменений газовых давлений в элементах системы и преобразовании их в цифровой код на выходе из датчиков. Дальнейшая обработка этих данных по своей эффективности определяется составом ПК, куда включены различные алгоритмы распознавания двумерных образов. Адаптивность процедуры распознавания определяется уровнем накопления знаний об особенностях флуктуации газовых состояний литейной формы.



### Список литературы

1. Найдек В. Л., Шинский О. И., Русаков П. В. Энергочастотное управление режимами вибрационной формовки // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 69-76.
2. Кукуй Д. М., Ровин С. Л., Сайков М. А. Методы автоматического контроля качества формовочных смесей в литейном производстве // Литье и металлургия. – 2004. – № 4. – С. 76-80.
3. Интернет-ресурсы: Vulcan Engineering Co <http://www.vulcangroup.com/about-vulcan/corporate-profile>
4. Интернет-ресурсы: KURTZ <http://www.kurtz-metals.com>
5. Русаков П. В. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 12-17.
6. Пат 75527 Україна. Спосіб формування насипних ливарних форм / В. Л. Найдек, О. Й. Шинський, П. В. Русаков. – Оpubл. 10.12.2012.
7. Пат. 76256 Україна. Установка для формування ливарних форм / В. Л. Найдек, О. Й. Шинський, П. В. Русаков. – Оpubл. 25.12.2012.
8. Русаков П. В. Литейно-технологические системы с отображением образов энергосилового воздействия // Процессы литья. – 2009. – № 6. – С. 43-49.

Поступила 10.12.2013