

УДК 621.74:669.131.7

В.М. Карпенко, канд.техн.наук, Е.В. Филипенко  
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени  
П.О. Сухого» г.Гомель, Республика Беларусь

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

*Статья посвящена исследованию и моделированию поведения формовочной смеси во время процесса деформации материала. Авторами разработана установка для измерения деформируемости смеси под нагрузкой и описан ее принцип действия. Построена реологическая и математическая модель процесса деформации формовочной смеси в экспериментальной установке. Полученные модели позволяют управлять свойствами формовочной смеси и осуществлять прогнозирование технологических параметров для обеспечения заданных характеристик.*

*Article is devoted research and modeling of behavior of a forming mix during process of deformation of a material. Authors develop installation for measurement of deformability of a mix under loading and its principle of action is described. It is constructed rheological and mathematical model of process of deformation of a forming mix in experimental installation. The received models will allow to operate properties of a forming mix and to carry out forecasting of technological parameters for maintenance of the set characteristics.*

Целью работы является разработка методики и устройства испытания деформационных свойств формовочной смеси под нагрузкой.

Основной причиной неудовлетворительного качества отливок считают нестабильность параметров смесей, применяемых при изготовлении формы. Стабильность состава и свойств смесей зависит от качества исходных материалов, металлоемкости залитых форм, общего количества смеси в системе, параметров и состава отработанной оборотной смеси, технологии ее подготовки и других факторов. При многономенклатурном производстве отливок существенно усложняются требования к регулированию состава и свойств формовочных смесей, выполнить которые в полном объеме без использования специального смесеприготовительного оборудования, средств контроля и управления, в том числе компьютеров и соответствующих программ, навыков работы персонала чрезвычайно трудно [1].

По технологическим регламентам контроля и регулирования качества формовочной смеси, ее свойства измеряют с частотой от каждого цикла смесеприготовления до одного раза в неделю, в зависимости от вида смеси, контролируемого параметра и типа производства, что требует значительных затрат времени и труда. Кроме того, качество смеси определяют в стандартных условиях, что позволяет лишь косвенно судить о поведении формы в реальных условиях, а измерение большого числа контролируемых показателей вызывает трудности при использовании их для моделирования.

Наиболее перспективный метод, позволяющий решить эти проблемы, - определение реологических свойств формовочной смеси, что подтверждается широким применением реологических методов в теории и практике смежных наук и технологий, например теории грунтов, технологии бетонов, композиционных материалов. В литейном производстве такие методы только начинают развиваться [2]. Однако изучение реологических свойств позволит получить физически обоснованные оценки упругих, вязких и пластических свойств формовочных смесей, математически моделировать их поведение при различных условиях нагружения и деформации с целью оптимизации свойств смесей и режимов технологических процессов.

Формовочная смесь по характеру физических свойств представляет собой сложную дисперсную систему, и обладает сыпучестью, связностью, пластичностью, вязкостью, текучестью, упругостью.

Одной из важных задач, стоящих перед наукой и практикой является оперативное управление структурой дисперсных систем для получения форм заданных свойств. Однако в различных условиях эти их свойства проявляются в различной степени. Поэтому нельзя предложить единую универсальную математическую модель формовочной смеси для всех случаев.

Построение математических моделей формовочной смеси позволит управлять ее свойствами и тем самым осуществлять прогнозирование технологических параметров для обеспечения заданных характеристик. При этом основной проблемой является построение математических моделей деформирования реальных многокомпонентных материалов, к которым можно отнести формовочную смесь. В результате сложных реологических свойств, даже такой идеальной среды, какой является сухой песок, исследователям пока не удастся найти адекватных определяющих уравнений. В этой связи наряду с теоретическими построениями необходимо значительное внимание уделить экспериментальному выявлению дополнительных параметров состояния смеси.

Формовочная смесь представляет собой сложный конгломерат частиц, поверхность которых покрыта тонкими пленками связующих, воды, и пылевидных твердых частиц. Промежутки между отдельными песчинками заполнены воздухом и, частично, водой и связующими. Воздушные поры сообщают смесям способность уплотняться, а наличие пленок воды и связующего на поверхности песчинок – способность к относительному перемещению при сравнительно невысоких потерях давления на преодоление сил трения [3].

Деформации формовочной смеси под нагрузкой сопровождаются сложными процессами: сжатием твердых частиц, сжатием воды, связующего и воздуха, находящихся в порах смеси, разрушением связей между частицами и их взаимным смещением, изменением толщины пленок воды, связующих и пылевидных частиц. Эти процессы приводят к деформациям, которые можно разделить на упругие, исчезающие после снятия нагрузки, и пластические. Пластическая деформация, в свою очередь, может быть обусловлена пластическим изменением структуры смеси (уменьшение объема пор) и разрушением зерен при превышении их предела прочности. При уплотнении форм пластические свойства обеспечивают формуемость, а упругость рассматривается как вредное свойство, приводящее к изменению размеров полости формы после извлечения модели [4].

Определить деформационные свойства такой гетерогенной системы как формовочная смесь при разном напряженном состоянии весьма сложно. При прессовании, например, песчано-глинистой смеси частицы её сближаются настолько, что оболочки воды в точках контакта деформируются, а связанная вода выдавливается и частично переходит в свободное состояние. При дальнейшем повышении давления прессования деформируются уже собственно частицы смеси. После снятия внешней нагрузки частицы вследствие собственной упругости, и прежде всего упругости оболочек воды, взаимно отдаляются. Этот процесс может усилиться за счет частичного восстановления исходной толщины оболочек воды и обратного перехода свободной воды в связанное состояние.

Описанием процесса деформирования реальных материалов и занимается реология. Реологическую модель материала можно определить на основании знаний структуры материала, процесса деформирования и обусловленных им изменений физических свойств [5]. На практике для описания реологических свойств применяются упрощенные модели, представляющие с определенным приближением структуру материала и механизм деформаций.

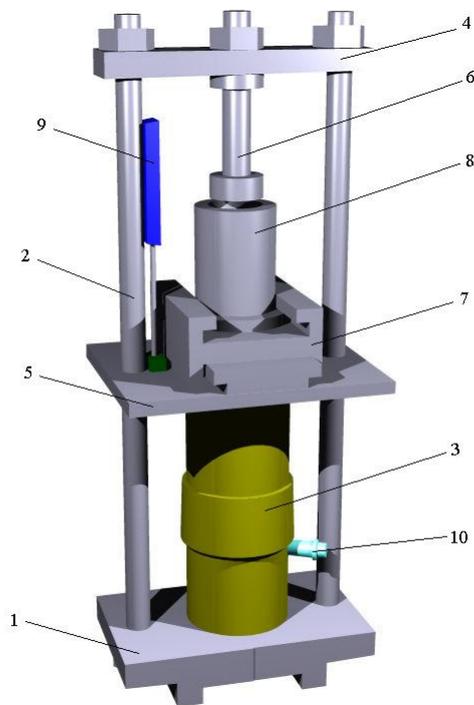
Упругие свойства тел отображают моделью в виде упругого элемента – пружины, подчиняющегося закону Гука и обозначаемого символом  $H$ . Вязкие свойства тел отображают моделью в виде цилиндра, наполненного жидкостью, в которую погружается дырчатый поршень, причем скорость погружения описывается законом Ньютона. Этот элемент обозначают символом  $N$ . Пластические свойства отображаются элементом сухого трения, подчиняющегося закону Сен-Венана. Этот элемент обозначают символом  $SV$ . Последовательное соединение указанных элементов обозначают через тире, а параллельное – вертикальной чертой [6].

Моделирование реологических свойств формовочной смеси на основании моделей простых тел требует знания явлений, происходящих во время процесса деформации смеси. В этом случае реологическую модель можно определить экспериментальным путем. Для проведения

экспериментального исследования разработана установка для измерения деформируемости смеси под нагрузкой. Общий вид установки представлен на рисунке 1.

В качестве аналога было рассмотрено устройство для испытания материалов на прочность [7]. Оно состоит из основания, привода, активной плиты, пассивной плиты, датчика давления, преобразователя сигналов. Для проведения испытания образец устанавливают на пассивную плиту и включают привод. Активная плита перемещается вниз и входит в соприкосновение с образцом. Образец через пассивную плиту передает развиваемое усилие датчику давления. На преобразователь сигналов поступают сигналы по перемещению активной плиты и по измеряемому давлению. Выходные сигналы преобразователя подаются либо на индикаторные устройства, либо на регистраторы. Недостатком данного устройства является низкая надежность результатов, так как деформация образца материала не измеряется, а задается в качестве сигнала управления.

В качестве прототипа установки был взят стенд для определения реологических характеристик формовочных смесей [5], состоящий из основания, привода, активной плиты, прессовой колодки, гильзы, датчика давления и преобразователя сигналов. Недостатком устройства является невозможность определения величины деформации образца в зависимости от прилагаемой нагрузки.



**Рис. 1. Общий вид установки для измерения деформируемости смеси под нагрузкой: 1 – основание, 2 – колонна, 3 – привод, 4 – пассивная плита, 5 – активная плита, 6 – прессовая колодка, 7 – подложка, 8 – гильза, 9 – датчик линейного перемещения, 10 – датчик давления**

Разработанная установка для измерения деформируемости смеси проводит испытания в условиях, наиболее приближенным к условиям реального нагружения. Результатом испытаний является деформационная кривая, отражающая зависимость между напряжением и деформацией образца.

Установка содержит основание, на котором установлены две колонны, привод. На колоннах закреплена пассивная плита и установлена активная плита с возможностью перемещения вдоль колонн. На пассивной плите закреплена прессовая колодка. Подложка, выполненная в виде шибера, установлена на активной плите. Гильза содержит расширение у основания для установки в салазки подложки. На колонне закреплён датчик линейного перемещения, соединённый с активной плитой. На приводе закреплён датчик давления. Выходы датчика перемещения и датчика давления соединены со входами преобразователя сигналов. Проведение испытания осуществляется следующим образом. Гильза задвигается по направляющим салазкам в подложку. Смесь засыпается в гильзу. Далее гильза продвигается вдоль подложки под прессовую колодку.

Затем включается привод и начинается подъем вдоль колонн активной плиты вместе с установленными на ней подложкой и гильзой. Первоначально происходит подъем до момента касания прессовой колодки образца смеси в гильзе. При дальнейшем поднятии начинается уплотнение смеси. Линейное перемещение гильзы, при этом, фиксируются с помощью датчика линейного перемещения, значения прилагаемой нагрузки снимаются датчиком давления. Все данные поступают в виде аналогового сигнала на вход преобразователя сигналов, который позволяет преобразовать сигнал в

цифровую форму и передать его на ПК. Полученные данные обрабатываются с помощью программного обеспечения, результат обработки может быть представлен в графическом виде в форме графика зависимости давления от перемещения. После уплотнения смеси, активная плита возвращается в первоначальное положение. Гильза извлекается и из нее удаляется ком смеси.

Рассмотрим поведение формовочной смеси в гильзе, при нагружении ее вертикальной сжимающей нагрузкой.

В первый период сжатия, когда песчинки сближаются, вытесняется внутрипоровый воздух и ликвидируются поры, смесь ведет себя как пластическое тело. Структура смеси становится все более плотной и однородной. Затем, по мере повышения ее плотности, происходит деформация связующих оболочек, и смесь ведет себя как вязкоупругое тело. При дальнейшем нагружении частицы песка приходят в соприкосновение друг с другом, наступает их упругая деформация, а в некоторых случаях и разрушение отдельных зерен. В этот период проявляются упругие свойства смеси. Таким образом, смесь ведет себя как упруговязкопластическое тело. Поэтому реологическую модель смеси при сжатии можно представить в виде следующей комбинации упрощенных моделей:

$$\Phi C = SV - (H / N) - H \quad (1)$$

где  $SV$  – пластический элемент Сен-Венана,  $H$  – упругий элемент Гука,  $N$  – вязкий элемент Ньютона.

Реологическая модель формовочной смеси представлена на рисунке 2.

Параллельное соединение тел  $H$  и  $N$  представляет собой тело Фойгта ( $F$ ). Таким образом, реологическая модель представляет собой последовательное соединение тел  $SV$ ,  $F$  и  $H$ . Полная деформация тела равна сумме деформаций составляющих его тел:

$$\varepsilon = \varepsilon_{SV} + \varepsilon_F + \varepsilon_{H1} \quad (2)$$

Так как при последовательном соединении элементов усилие, приложенное к системе в целом равно усилиям в каждом элементе, можно записать:

$$\sigma = \sigma_{SV} = \sigma_F = \sigma_{H1} \quad (3)$$

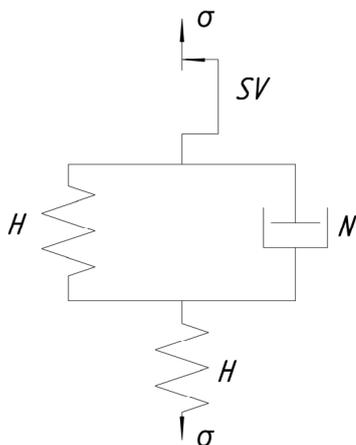


Рис. 2 - Реологическая модель формовочной смеси

Для тела Фойгта деформация и напряжение соответственно равны:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_N = \varepsilon_{H2} \quad (4)$$

$$\sigma_F = \sigma_N + \sigma_{H2} = \sigma \quad (5)$$

Согласно закону Гука можно записать для упругой деформации:

$$\varepsilon_{H1} = \sigma / E \quad (6)$$

$$\varepsilon_{H2} = \sigma_{H2} / E \quad (7)$$

где  $E$  – модуль упругости материала.

Для пластического и вязкого элемента соответственно получаем:

$$\dot{\varepsilon}_{SV} = \sigma / \lambda \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_N = \sigma_N / \eta \quad (9)$$

где  $\lambda$  - коэффициент пропорциональности при пластической деформации,  $\eta$  - коэффициент вязкости.

Подставляя (9) и (7) в уравнение (5), согласно (4) после преобразований получаем следующее уравнение:

$$\sigma = \dot{\varepsilon}_F \cdot \eta + \varepsilon_F \cdot E \quad (10)$$

Это линейное дифференциальное уравнение первого порядка. После его решения находим  $\varepsilon_F$  :

$$\varepsilon_F = \sigma \cdot E / \eta^2 \quad (11)$$

Дифференцируя (2) по времени и учитывая (6), (8) и (11), получаем дифференциальное уравнение для рассматриваемой реологической модели:

$$\dot{\varepsilon} = \sigma / \lambda + \dot{\sigma} \cdot (E^2 + \eta^2) / E \cdot \eta^2 \quad (12)$$

Используя экспериментальные кривые  $\varepsilon(t)$ ,  $\sigma(t)$  и  $\dot{\sigma}(\varepsilon)$ , полученные с помощью установки для измерения деформируемости смеси под нагрузкой можно определить неизвестные реологические характеристики смеси. Полученные реологические характеристики в последующем возможно использовать для создания АСУ ТП смесеприготовления и формообразования.

В результате проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана экспериментальная установка для измерения деформируемости смеси под нагрузкой.
2. Применение специальных устройств, обеспечивающих заданный закон нагружения, в совокупности с измерительными приборами позволит рассчитать реологические параметры формовочной смеси.
3. Построена реологическая и математическая модель формовочной смеси, позволяющая прогнозировать поведение смеси при различных условиях нагружения и деформирования.
4. Построенная математическая модель формовочной смеси позволит управлять ее свойствами и осуществлять прогнозирование технологических параметров для обеспечения заданных характеристик.

### Список литературы

- 1 Кваша Ф.С., Туманова Л.П., Скарюкин Д.В. Возможности стабилизации качества единой формовочной смеси в литейных цехах. Часть I // Литейное производство. – 2004. - №4. – с. 16-19.
- 2 Авдокушин В.П., Сургучев Е.А., Самарай В.П. Прибор для определения реологических свойств формовочных смесей // Литейное производство. – 2001. - №4. – с. 33-34.
- 3 Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 308 с.
- 4 Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К., Мапашек И. Формовочные материалы и смеси. – Киев: Выща школа, 1990. – 415 с.
- 5 Микульчински Т., Новак Д., Новицки Ю. Реологические свойства формовочной смеси // Литейщик России. – 2005. - №3. – С.14-16.
- 6 Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов.- М.: Высшая школа, 1978.-448 с.
- 7 Устройство для испытания материалов на прочность: пат. 2112230 РФ, МПК G 01 N 3/28 / А. А. Волкомич, А. М. Ферберов; заявитель ЗАО «Литаформ»; заявл. 30.09.1996; опубл. 27.05.1998.