



It is shown that the ready-built mathematical model of molding sand will enable to control its characteristics and to make forecasting of technological parameters for providing of the given characteristics.

А. П. МЕЛЬНИКОВ, Д. М. ГОЛУБ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ»,
В. М. КАРПЕНКО, Е. В. ФИЛИПЕНКО, ГГТУ им. П. О. СУХОГО

УДК 621.74:669.131.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

В современных смесеприготовительных отделениях 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 [1]. 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.

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 свойства проявляются в разной 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 удается найти адекватных определяющих уравнений. В связи с этим 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 [2].

Деформации формовочной смеси под нагрузкой сопровождаются сложными процессами: сжатием твердых частиц, 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 [3].

Определить деформационные свойства такой гетерогенной системы как формовочная смесь при разном напряженном состоянии весьма сложно. При прессовании, например, песчано-глинистой смеси частицы ее 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 занимается реология. Реологическую модель материала можно определить на основании знаний структуры материала, процесса деформирования и обусловленных им изменений физических свойств [4]. 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 [5].

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 показан на рис. 1.

В качестве аналога было рассмотрено устройство для испытания материалов на прочность [6].

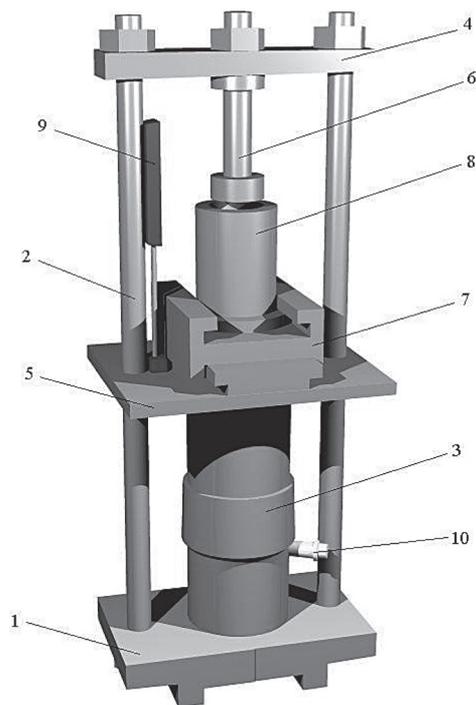


Рис. 1. Общий вид установки для измерения деформируемости смеси под нагрузкой: 1 – основание; 2 – колонна; 3 – привод; 4 – пассивная плита; 5 – активная плита; 6 – прессовая колодка; 7 – подложка; 8 – гильза; 9 – датчик линейного перемещения; 10 – датчик давления

Оно состоит из основания, привода, активной плиты, пассивной плиты, датчика давления, преобразователя сигналов. Для проведения испытания образец устанавливается 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 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 [4], состоящий из основания, привода, активной плиты, прессовых колодки, гильзы, датчика давления и преобразователя сигналов. Недостатком устройства является невозможность определения величины деформации образца в зависимости от прилагаемой нагрузки.

Разработанная установка для измерения деформируемости смеси проводит испытания в условиях, наиболее приближенных к условиям реального нагружения. Результатом испытаний явля-

ется деформационная кривая, отражающая зависимость между напряжением и деформацией образца.

Установка содержит основание, на котором находятся две колонны и 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 закреплен датчик линейного перемещения, соединенный с активной плитой. На приводе закреплен 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. 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

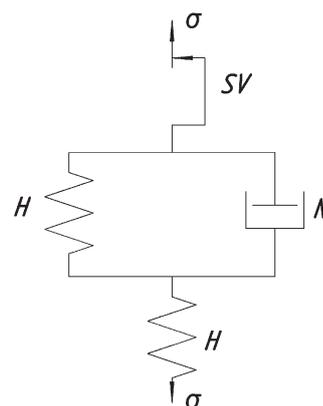


Рис. 2. Реологическая модель формовочной смеси

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 показана на рис. 2.

Параллельное соединение тел H и N представляет собой тело Фойгта (F). Таким образом, реологическая модель – это 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:

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

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 вязкого элемента получаем

$$\dot{\varepsilon}_N = \sigma_N / \eta, \quad (8)$$

где η – коэффициент вязкости.

У формовочной смеси уплотнение происходит только с возрастанием уплотняющей нагрузки, поэтому в предложенной модели классическое пластическое тело Сен-Венана заменено пластиче-

ским, у которого предел текучести зависит от величины деформации, т. е. от текущей плотности смеси.

Для описания свойств такого пластического тела воспользуемся аналитическим уравнением прессования, предложенным Г. Ф. Баландиным [7]:

$$d\sigma = A_0 d\bar{\varepsilon}, \quad (9)$$

где A_0 – модуль, характеризующий сопротивление смеси сжатию.

После интегрирования преобразованного уравнения (9) получаем

$$\sigma_{SV} = \sigma_0 e^{A_0 \bar{\varepsilon}}. \quad (10)$$

Подставляя (8) и (7) в уравнение (5), согласно (4), после преобразований получаем:

$$\sigma = \dot{\varepsilon}_F \eta + \varepsilon_F E. \quad (11)$$

Это линейное дифференциальное уравнение первого порядка. После его решения находим ε_F :

$$\varepsilon_F = \sigma E / \eta^2. \quad (12)$$

Подставим ε_{SV} , ε_F , ε_{H1} из уравнений (6), (10), (12) в уравнение (2). Кроме того, заменим относительную деформацию на натуральную относительную деформацию $\bar{\varepsilon}$, которая при больших значениях деформации точнее описывает процесс. В итоге получаем дифференциальное уравнение для рассматриваемой реологической модели:

$$\bar{\varepsilon} = \sigma \left(\frac{E^2 + \eta^2}{E\eta^2} \right) + \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right). \quad (13)$$

Допустим, что при приложении нагрузки N образец, имеющий начальную длину l_0 , сожмется и его длина станет равна l . Относительное сжатие любой части образца равно $\frac{dx}{x}$, где dx – абсолютное сжатие части образца длиной x . Тогда натуральная относительная деформация $\bar{\varepsilon}$ есть сумма относительных сжатий отдельных участков:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dx}{x} = -(\ln l - \ln l_0) = -\ln(1 - \varepsilon). \quad (14)$$

Так как l_0 величина постоянная, то

$$d\bar{\varepsilon} = d(-\ln l + \ln l_0) = -\frac{dl}{l}. \quad (15)$$

С другой стороны,

$$l = \frac{M}{F\delta}, \quad (16)$$

где M – масса образца длиной l ; F – площадь поперечного сечения этого образца; δ – плотность образца.

Подставив значения l и dl в уравнение (15), получим

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{d\delta}{\delta}. \quad (17)$$

С учетом уравнений (13) и (17) найдем уравнение уплотнения смеси:

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{A_0}} e^{\sigma \left(\frac{E^2 + \eta^2}{E\eta^2} \right)}. \quad (18)$$

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.

Литература

1. Авдокушин В. П., Сургучев Е. А., Самарай В. П. Прибор для определения реологических свойств формовочных смесей // Литейное производство. 2001. № 4. С. 33–34.
2. Медведев Я. И., Валисовский И. В. Технологические испытания формовочных материалов. М.: Машиностроение, 1973.
3. Дорошенко С. П., Авдокушин В. П., Русин К., Мацашек И. Формовочные материалы и смеси. Киев: Выща шк., 1990.
4. Микучиньски Т., Новак Д., Новицки Ю. Реологические свойства формовочной смеси // Литейщик России. 2005. № 3. С. 14–16.
5. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978.
6. Устройство для испытания материалов на прочность: Пат. 2112230 РФ, МПК G 01 N 3/28 / А. А. Волкомич, А. М. Ферберов.
7. Матвеев И. В., Исагулов А. З., Дайкер А. А. Динамические процессы и машины для уплотнения литейных форм. Алматы: Гылым (Наука), 1998.