

Е.В. Филипенко, В.М. Карпенко, В.П. Самарай

УО «Гомельский государственный технический университет имени

П.О. Сухого», Гомель, Беларусь

НТУУ «КПИ», Киев

РАЗРАБОТКА РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ

Оптимизация технологических режимов изготовления литейных форм наиболее эффективно может быть решена на основе моделирования динамики процессов уплотнения формовочной смеси в рабочих полостях модельно-опочной оснастки. Однако большое разнообразие конфигураций отливок, применение формовочных смесей с различными структурно-механическими свойствами и разных методов формообразования значительно усложняют задачу математического описания этих процессов. На практике преимущественно рассматриваются частные случаи, используются эмпирические уравнения, составленные на основе результатов технологических испытаний формовочных смесей по стандартным методикам [1].

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.

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 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 [1].

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 [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 N . 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 [6]. Общий вид установки представлен на рисунке 1.

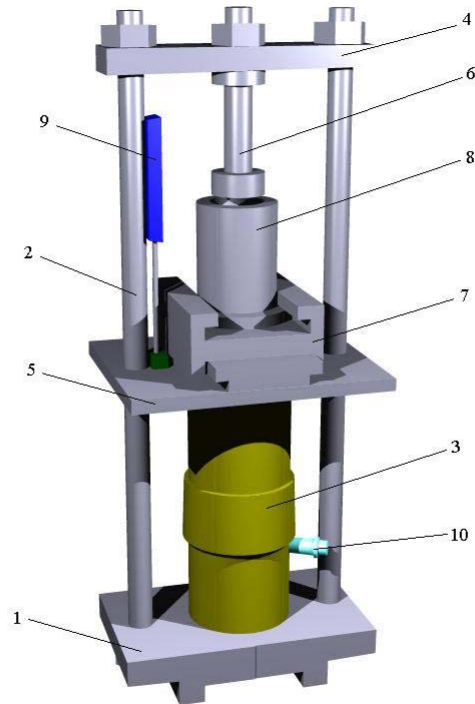


Рисунок 1 - Общий вид установки для измерения деформируемости смеси под нагрузкой: 1 – основание, 2 – колонна, 3 – привод, 4 - пассивная плита, 5 - активная плита, 6 - прессовая колодка, 7 – подложка, 8 – гильза, 9 - датчик линейного перемещения, 10 - датчик давления.

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.

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:

$$\varepsilon = \varepsilon_{SV} + \varepsilon_F + \varepsilon_{H_1} \quad (2)$$

Где ε_{SV} - пластическая деформация элемента SV, ε_F - упруговязкая деформация элемента F, ε_{H_1} - упругая деформация элемента H_1 .

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

$$\sigma = \sigma_{SV} = \sigma_F = \sigma_{H_1} \quad (3)$$

Где σ_{SV} - напряжение элемента SV, σ_F - напряжение элемента F, ε_{H_1} - напряжение элемента H_1 .

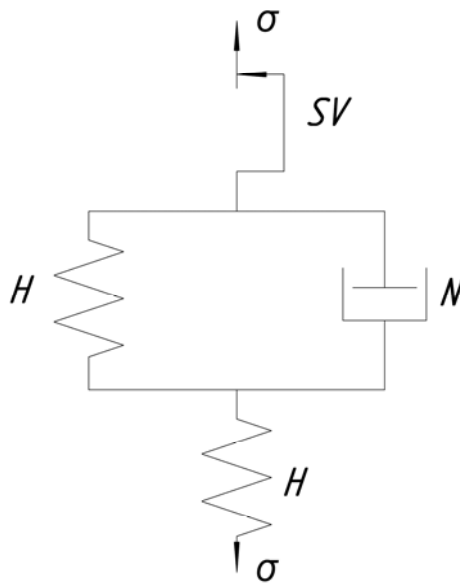


Рисунок 2 - Реологическая модель формовочной смеси

Для тела Фойгта деформация и напряжение соответственно равны:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_N = \varepsilon_{H_2} \quad (4)$$

Где ε_N - вязкая деформация элемента N, ε_{H_2} - упругая деформация элемента H_2 .

$$\sigma_F = \sigma_N + \sigma_{H_2} = \sigma \quad (5)$$

Где σ_N - напряжение элемента N, ε_{H_2} - напряжение элемента H_2 .

Согласно закону Гука можно записать для упругой деформации:

$$\varepsilon_{H_1} = \sigma / E \quad (6)$$

$$\varepsilon_{H_2} = \sigma_{H_2} / E \quad (7)$$

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 пластическим телом, 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:

$$\sigma_{SV} = \sigma_0 e^{A\varepsilon_{SV}} \quad (10)$$

Где σ_0 - напряжение, действовавшее в пластическом теле на предшествующем этапе сжатия.

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

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

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

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

Подставим ε_{SV} , ε_F , ε_{H_1} 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 процессы. В итоге получаем 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:

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

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), получим уравнение уплотнения смеси:

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

Где δ_0 - плотность смеси после действия напряжений σ_0 .

Используя экспериментальные данные, 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.

Таким образом, разработанная реологическая модель, учитывающая особенности деформирования формовочной смеси дает возможность более точно изучить реальные свойства смесей, чтобы приблизить теоретические прогнозы к реальному поведению формовочной смеси.

Список литературы

1. Дорошенко С.П., Авдокушин В.П., Русин К., Мацашек И. Формовочные материалы и смеси. – Киев: Выща школа, 1990. – 415 с.
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. 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.: Высшая школа, 1978.- 448 с.

6. Установка для измерения деформируемости смеси под нагрузкой: заявка № и 20100317 РБ, МПК G01N3/28 / В.М. Карпенко, Е.В. Филипенко; заявитель УО «ГГТУ им.П.О.Сухого»; заявл. 26.03.2010.

7 Матвеевко И.В., Исагулов А.З., Дайкер А.А. Динамические процессы и машины для уплотнения литейных форм. – Алматы: Гылым (Наука), 1998. – 345 с.