МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРИСТЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ

В.В.Евстигнеев, Д.В.Колесников, В.И.Пролубников, Н.П.Тубалов, Н.Ю.Щетинкина

Коэффициент проницаемости является одним из основных структурно-зависимых показателей пористых проницаемых материалов (ППМ), определяющим эффективность и пригодность данного ППМ к заданным условиям эксплуатации, и представляющим зачастую функцию оптимизации как структуры порового пространства материала, так и параметров технологического процесса его получения.

Исходя из сказанного, становится ясной потребность оперативного и с достаточной точностью определения коэффициента проницаемости ППМ как при разработке нового материала, так и при техническом контроле массово выпускаемых изделий. Существующая в настоящее время методика ГОСТ 25283-82 позволяет осуществлять только определение коэффициента проницаемости по воздуху, сужая тем самым сферу рабочих сред, по которым возможно определение указанной характеристики. Недостатком существующей методики является также необходимость приготовления из изделий образца (таблетки), что не позволяет проводить неразрушающий контроль изделий.

На основании изложенных соображений признано целесообразным создание методики определения коэффициента проницаемости по жидкости с возможностью пересчета показателей на ряд жидких сред сходной физико-химической природы.

Экспериментальная установка (рис. 1) включает трубчатый канал, конструктивно представленный трубами 1, 2 и 3, соединяемых фланцами и обеспечивающими ламинарный режим течения рабочей жидкости к образцу и исключающими влияние входных условий на результат измерений. Во фланцевом соединении труб 1 и 2 устанавливается измерительная диафрагма, позволяющая задавать требуемый расход рабочей жидкости через испытуемый образец. Образец (фрагмент материала или изделия) устанавливается в трубчатой испытательной ячейке, размеры и конструкция которых может изменяться, обеспечивая удобство исследования различных изделий.

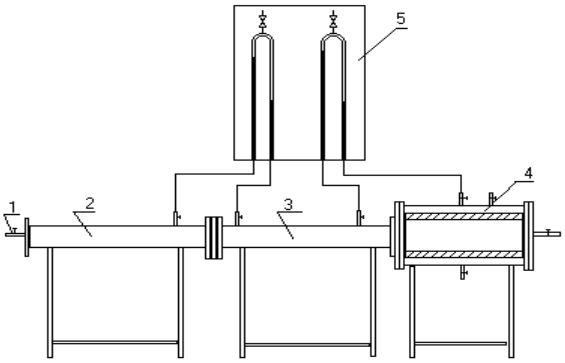

Рис.1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента проницаемости

Ячейка имеет выполненное из прозрачного материала окно, позволяющее визуально контролировать процесс течения рабочей жидкости через испытуемый материал (изделие).

Измеряемыми параметрами служат расход рабочей жидкости через диафрагму (которая предварительно тарируется известными способами), перепад давления на диафрагме и испытуемом образце. Для измерения перепадов давления в установке использованы дифференциальные манометры точностью ± 0,5 мм.в.ст.

Работа установки заключается в заполнении ее рабочей жидкостью и пропускании указанной жидкости в стационарном режиме сквозь поровое пространство испытуемого материала с одновременным замером потерь давления на диафрагме и образце.

Основой методики определения удельного гидравлического сопротивления является известное уравнение Дарси, решенное в отношении коэффициента фильтрации $K_Ф$

$$K_Ф = \frac{Q}{S \cdot I}, \qquad (1)$$

где S – площадь образца, через который осуществляется фильтрация, м^2; I – гидравлический уклон, I = Δh / H; H – толщина стенки образца, м; Q – расход жидкости через образец, м^3/с; Δh – перепад давления на образце, замеряемый как разность уровней пьезоэлементов до и после образца, м.

Величина расхода рабочей жидкости через диафрагму определяется ее расходной характеристикой Q = f(Дh); для каждой из сменных диафрагм расходная характеристика строится заранее. Возможно определение расхода по формуле:

$$Q = H \cdot v, \qquad (2)$$

где v – скорость потока, м/с.

При малых расходах ($0{,}1\times10^{-3}$ м^3/с и ниже) расход следует определять объемным методом по известной методике.

Приведенные выше рассуждения касались коэффициента фильтрации как целевой определяемой величины. Однако при рассмотрении характеристик ППМ принято пользоваться другим показателем – коэффициентом проницаемости, отличающимся от коэффициента фильтрации физическим смыслом и размерностью. Целесообразно поэтому найти соотношение между указанными параметрами, ранее не обнаруженное нами в доступных литературных источниках.

Запишем уравнение Дарси в виде:

$$\text{grad p} = \frac{\mu}{K_n} \times v, \qquad (3)$$

где grad p = Др/ Н, Др – перепад давления на образце, Па; м – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости, Па·с; $К_п$ – коэффициент проницаемости образца; v – скорость диспергации рабочей жидкости, равная

$$W = Q/S. \qquad (4)$$

Приравняв указанные выражения, решенные относительно Q, получим:

$$K_\Phi \cdot S \cdot I = K_П \frac{\Delta p}{H} \times \frac{S}{\mu} \qquad (5)$$

и, выразив Др через Дh, получим выражение для коэффициента проницаемости:

$$K_П = \frac{K_\phi \cdot \mu}{\rho_ж \cdot \mu} = \frac{K_\phi \cdot \nu}{g}, \qquad (6)$$

где – ν кинематический коэффициент вязкости.

Уравнение (6) выражает связь между коэффициентом фильтрации и коэффициентом проницаемости материала.

Эксплуатация пористых проницаемых материалов нередко осуществляется в целях фильтрации высокоагрессивных и токсичных жидкостей, что затрудняет, а порой делает невозможным гидравлические испытания модельных образцов ППМ рабочими жидкостями. Однако именно в этих условиях важна точная оптимизация свойств материала, что исключит возможность неэффективной работы ППМ. В контексте сказанного представляет интерес возможность пересчета коэффициента проницаемости, определенного на инертной жидкости (преимущественно воде) в коэффициент проницаемости другой жидкости с заданными физическими константами. Методически важно также расширить методику пересчета для некапельных жидкостей (газов).

Изучение параметров течения сред через пористые материалы привело авторов работы [1] к результату, согласно которому коэффициент проницаемости постоянен для данной пористой среды, независимо от рода фильтруемой жидкости. Поэтому его употребление особенно удобно при изучении, например, фильтрации нефти, газа, когда в одной среде наблюдается движение различных жидкостей. Таким образом, коэффициент проницаемости является константой данного материала.

Вышесказанное, однако, справедливо только для ламинарных течений жидкости в пористой среде, т.е. при выполнении известного условия

$$\text{Re} = \frac{v_{пор} \times d_{пор}}{\nu} \langle R_{кр} = 2300 \qquad (7)$$

где $v_{пор}$ – средняя скорость движения жидкости в открытых порах, м/с; $d_{пор}$ – средний размер пор ППМ, м;

$$v_{пор} = v/П; \qquad (8)$$

П – открытая пористость материала, %.

Зная вязкость рабочей жидкости и средний размер пор материала, можно определить как предельно допустимую скорость движения жидкости в порах $v_{пор.\ доп}$, так и максимальный расход жидкости с соответствующей ему потерей давления $Др_{max}$:

$$v_{пор..доп.} = \frac{\text{Re}\,кр \times \mu}{d_{пор}} = \frac{2300 \times \mu}{d_{пор}}, \qquad (9)$$

$$v_{доп.} = \frac{v_{пор..доп.}}{П}, \qquad (10)$$

$$Q_{доп} = b_{доп} \times S, \qquad (11)$$

$$\Delta p_{max} \frac{Q_{доп} \times H \times \mu}{S \times K_{П}} = \frac{v_{пор.доп} \times П \times H \times \mu}{K_{П}} \quad (12)$$

С целью определения границы применимости формулы Дарси для описания течения жидкости в пористой среде рационально воспользоваться безразмерным выражением соответствующих зависимостей, в этом случае в окончательном выражении отсутствуют в явном виде физические характеристики рабочей жидкости.

Практически полезной является расходная характеристика конкретного материала (изделия) в виде зависимости Q =f(Др). Построение характеристики осуществляется экспериментально путем задания ряда расходов через образец материала (изделия), не превышающих по величине предельно допустимое, и определяют соответствующие им перепады давления. По результатам эксперимента строят график, представляющий расходную характеристику. В случае работы с несколькими жидкостями или жидкость с изменяющимися характеристиками (например, зависящими от температуры), характеристику ППМ удобно представить в безразмерном виде $E_u = f(R_e)$,

$$E_u = \frac{\Delta p}{\rho \times v_{пор}^{2}}. \quad (13)$$

Для построения такой характеристики задаются рядом значений $R_{e\,1}$, $R_{e\,2}$.... $R_{e\,n}$, не превышающим $R_{e\,кр}$, определяют соответствующие им скорости движения жидкости $v_{пор\,1}$, $v_{пор\,n}$, и на основе зависимости:

$$V_{пор} = \frac{Re \times \mu}{d_{пор}}, \quad (14)$$

находят перепады давления, с учетом которых вычисляют значения параметра Эйлера.

Определение коэффициента проницаемости производилось по формуле:

$$K_{П} = \frac{H \times \mu \times Q}{S \times \Delta h \times \rho_{ж} \times g}. \quad (15)$$

Литература

1. Башта Г.И. Машиностроительная гидравлика: Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 696 с.

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПРИРОДЫ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СВС- МАТЕРИАЛОВ

П.Ю.Гуляев, В.В.Евстигнеев, Д.В.Колесников, В.И.Пролубников, Н.П.Тубалов, С.В.Кожурин

Тепловые напряжения, возникающие в приграничных зонах соприкасающихся фаз за счет различий в их тепловых расширениях, которые носят локальный характер, распределены стохастически, и их величина может регулироваться рецептурно-технологическими факторами [1].

Микроскопический характер с областью существования, то есть соизмеримой с объемом натурных изделий, носят механические напряжения, вызванные различием температур по объему изделия и отличием в тепловых расширениях синтезируемого материала и технологической оболочки.

Рассмотрим сначала температурные напряжения в изделиях типа (рис. 1) при симметричном относительно оси распределении температур. Физически это означает случай охлаждения синтезированного продукта от адиабатической температуры до температуры эксплуатации.

Из решения задачи теплопередачи [2, 3] температура по своду рассчитывается по уравнению:

$$T_r = \frac{\Delta T}{\lg \mu} \cdot \lg K \,, \qquad (1)$$

где ДТ – разница в температурах внутренней и внешней поверхностях полого цилиндра; К – отношение внешнего радиуса b к радиусу r, μ – вязкость жидкости.

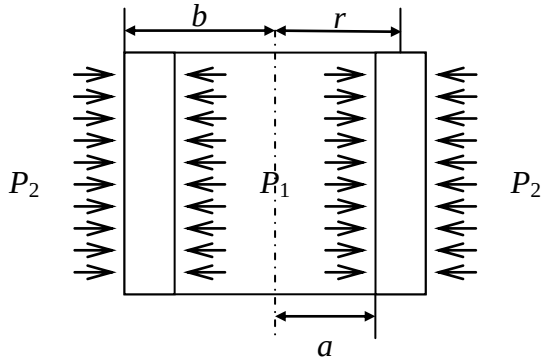

Рис. 1. Расчетная схема нагруженного внутренним и внешним давлением цилиндрического элемента

Согласно [2] после некоторых преобразований компоненты напряженного состояния могут быть рассчитаны по формулам:

$$\sigma_r(r) = \frac{E\alpha_н \Delta T(r)}{2(1-\mu)} \cdot \left(\frac{K^2-1}{\mu^2-1} - \frac{\ln K}{\ln \mu} \right), \qquad (2)$$

$$\sigma_t(r) = \frac{E\alpha_н \Delta T(r)}{2(1-\mu)} \cdot \left(\frac{K^2+1}{\mu^2-1} - \frac{\ln K}{\ln \mu} + \frac{1}{\ln \mu} \right) (3)$$

$$\sigma_z(r) = \frac{E\alpha_н \Delta T(r)}{2(1-\mu)} \cdot \left(\frac{2}{\mu^2-1} - r \cdot \frac{\ln K}{\ln \mu} + \frac{1}{\ln \mu} \right) (4)$$

где σ_r, σ_t и σ_z – радиальное, тангенциальное и осевое напряжения, соответственно, $E_п$–нормальная составляющая модуля упругости, $\alpha_н$ – коэффициент теплового линейного расширения СВС-материала.

По этим формулам оценим напряженное состояние вблизи открытых поверхностей.

У внутренней поверхности (r = a, то есть при К = М, где М – отношение внешнего радиуса b к внешнему a):

$$\sigma_{r\,r=a} = 0 \qquad (5)$$

$$\sigma_{t\,r=a} = (\sigma_z)_{r=a} = \frac{E\alpha_н \Delta T}{2(1-\mu)} \cdot \left(\frac{1}{\ln \mu} - r \cdot \frac{\mu^2}{\mu^2-1} \right) (6)$$

У наружной поверхности (r = b, то есть при К = 1):

$$\sigma_{r\,r=b} = 0 \qquad (7)$$

$$\sigma_{t\,r=b} = (\sigma_z)_{r=b} = \frac{E\alpha_н \Delta T}{2(1-\mu)} \cdot \left(\frac{1}{\ln \mu} - r \cdot \frac{2}{\mu^2-1} \right) (8)$$

Наконец, рассмотрим наиболее общий случай, когда синтез производится с использованием жесткой технологической оболочки. Происхождение действующих напряжений в этой ситуации обязано прежде всего отличию в коэффициентах теплового линейного расширения СВС-материала $\alpha_н$ и технологической оболочке (корпуса) $\alpha_к$ (принятые здесь индексы далее будем рассматривать и на другие характеристика материала и корпуса). Механически это означает, давление Р имеет смысл контактного давления $P_к$, величина которого вычисляется по формуле:

$$P_k = -\frac{(\alpha_н \Delta T_н - \alpha_k \Delta T_k)(\mu^2 - 1)E_н}{1 + (-\mu_н)\mu^2 + (\mu^2 - 1)\frac{E_н}{1+\mu_н}\cdot\frac{1}{D_k}}, \quad (9)$$

где $ДТ_н$ и $ДТ_к$ – перепады температуры по телу материала и корпуса соответственно; $Д_к$- характеристика цилиндрической жесткости корпуса.

Кроме этого наличие теплового расширения материала и корпуса приведет к появлению осевой силы.

С учетом сказанного, радиальные и тангенциальные напряжения можно рассчитать по формулам (2) и (3), которые после простейших преобразований примут вид:

$$\sigma_r(r) = P_k \frac{\mu^2}{\mu^2 - 1}\cdot\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right), \quad (10)$$

$$\sigma_t(r) = -P_k \frac{\mu^2}{\mu^2 - 1}\cdot\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right), \quad (11)$$

и осевое напряжение:

$$\sigma_z(r) = \alpha_н \cdot \Delta T_н \cdot E_н - r\mu_н P_k \frac{\mu^2}{\mu^2 - 1}. \quad (12)$$

Подчеркнем постановочную зависимость формул (10)–(12). Дело в том, что температурные перепады, входящие в расчет $Р_к$, не имеют тривиального толкования. Формально эти перепады определяются как разность между равновесной температурой и температурой эксплуатации элемента (температура, до которой производится охлаждение материала от адиабатической температуры). Равновесную же температуру принято определять как температуру, при которой механические напряжения на границе материал-корпус отсутствуют. Собственно говоря, равновесная температура $Т_р$ является точкой отсчета тепловых напряжений типа (10)–(12), поскольку существование последних в интервале температур от $Т_{ад}$ (адиабатическая) до $Т_р$ (равновестного) маловероятно из-за высокой активности релаксационных явлений.

Литература

1.Разработка новых видов композиционных материалов с заданным комплексом физико-химических свойств./ Отчет АлтПИ, 1990. – 169с.

2.Пономарев С.Д., Бидерман В.А., Лахарев И.К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. – М.: Машгиз, 1958. – 568 с.

3.Итин В.И., Найдбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. – Томск: Изд-во ТГУ, 1989. – 209 с.