

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

Жижкин А.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Огромный опыт исследований разных пористых материалов позволил выделить основные параметры пористой структуры, определяющие, в основном, процессы, происходящие в ней. Процессы массообмена в пористом теле определяются в значительной мере размерами пор и их распределением по размерам, которое дает полное представление о числе пор каждого размера и диапазоне их изменения в материале.

В качестве объекта исследования, использованы тонкостенные конструкции из материала МР. Пористость P образцов составила 55...88%.

Для исследования распределения пор по размерам в настоящей работе был использован экспериментальный метод. Это связано со сложностью строения поровой структуры материала МР и отсутствием аналитических моделей его структуры, которые бы позволяли удовлетворительно согласовать опытные и расчетные данные. В работе был использован метод исследования микрофотографии (статистический), который позволяет получить распределение пор по размерам непосредственно в изучаемом сечении пористого образца. Это метод непосредственного наблюдения, который позволяет получить данные о размере и количестве пор для статистической обработки результатов исследования пористых сред с изотропной и анизотропной структурами.

За диаметр поры, как в работе [1], было принято расстояние между контурами элементов твердого скелета порового пространства. Расстояние между частицами контура скелета рассматривалось как случайная величина, равная длине отрезка прямой d между двумя точками, расположенными на поверхности твердой фазы. Отрезок может иметь с твердой фазой только две общие точки.

Функция плотности распределения $f(d)$ позволяет установить связь между возможными значениями d и соответствующими им вероятностями. Определение функции $f(d)$ может быть выполнено с большой степенью точности при увеличении общего числа измерений. Для практических целей достаточно ограничиться таким числом измерений, которое бы обеспечивало воспроизводимость кривой $f(d)$. При этом необходимо чтобы измерения носили случайный характер, а возможность повторных замеров была исключена. Количество таких измерений по данным работы [1] должно быть не менее 400.

Для изотропной структуры результаты определения размера пор d в плоскости шлифа вышеизложенным методом позволяет обобщить на весь объем пористого образца. В случае определения расстояния d в анизотропных структурах необходимо определить направление изменения структурных характеристик. Плоскость среза расположить перпендикулярно направлению изменения структурных параметров. Измерение расстояний d в нескольких параллельных плоскостях позволяет получить данные об изменении распределения пор по размерам в зависимости от изменения геометрических параметров, например, длины образца.

Изучение распределения пор по размерам статистическим методом включает в себя следующие операции: выбор плоскости среза; подготовка шлифа для микроанализа; определение исходных статистических данных объекта и расчет определяемых параметров; оценка достоверности результата.

Для того чтобы полученные данные о структуре образца отражали свойства всей конструкции, необходимо при выборе плоскости среза учитывать особенности изготовления и работы, внутреннего и наружного строения пористого изделия, соотношения его геометрических размеров. Поэтому были выбраны сечения пористых образцов, проходящие через их продольную осевую линию (отражают возможную неоднородность в осевом и радиальном направлениях) и перпендикулярно осевой линии и направлению фильтрации (отражают особенности структуры в окружном и радиальном направлениях).

Подготовка шлифа для проведения исследований производилась в соответствии с основными требованиями, предъявляемыми при проведении металлографического анализа [1]. Кроме этого, в виду частичной связанности, структура материала МР должна быть закреплена. Для фиксации структуры материала МР, была использована эпоксидная смола с отвердителем. После отверждения связующего была произведена резка образцов по выбранным плоскостям, после чего производилась шлифовка полировка поверхностей.

Измерения расстояний d и обработка результатов измерений проводились по методике, изложенной в работе [1].

Весь диапазон расстояний d , выраженный в целых делениях окулярной шкалы, был разбит на k интервалов $\Delta d_1 = d_1 - d_0$, $\Delta d_2 = d_2 - d_1, \dots, \Delta d_i = d_i - d_{i-1}, \dots, \Delta d_k = d_k - d_{k-1}$. Наблюдаемые расстояния d группировали по интервалам. Значения d_i , равные границе интервала были разделены по количеству на две равные части, одна из которых была отнесена к i -му интервалу, другая - к $(i+1)$ -му. Граничные значения первого интервала ($d=0$) исключались из рассмотрения, как принадлежащие к твердой фазе, и учитывались только расстояния $d > 0$. Таким образом,

в i -ый интервал попали все значения d , удовлетворяющие условию $0,5d_{i-1} < d < 0,5d_i$.

Относительная частота f^* появления размера d в интервале $[d_{i-1}; d_i]$ вычислялась по формуле, приведенной в работе [1]

$$f^* = \frac{m_i}{N(d_i - d_{i-1})} = \frac{\Delta F_i^*}{\Delta d_i}, \quad (1)$$

где m_i - количество значений размера из i -го интервала; $d_i; d_{i-1}$ - границы i -го интервала; $N = \sum_{i=1}^k m_i$ - общее число наблюдений; ΔF^* - частота появления d в интервале $[d_i - d_{i-1}]$.

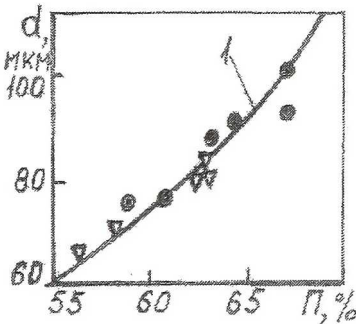


Рис. 1. Среднее расстояние между частицами скелета Φ -образных фитилей:

∇ - радиальное,
 \bullet - осевое сечения;

1 - расчетная зависимость (5)

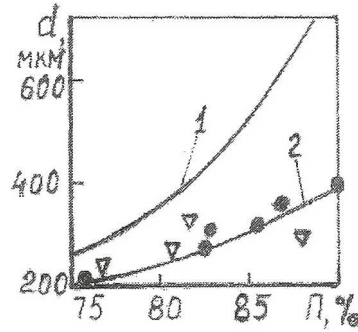


Рис. 2. Среднее расстояние между частицами скелета цилиндрических фитилей:

∇ - радиальное и \bullet - осевое сечения;
 1 - зависимость (5),
 2 - зависимость (4)

Полученные результаты вносились в таблицу статистических рядов $f^*(d)$, строили гистограммы и выбирали функцию распределения пор по размерам в качестве модельной. По полученным данным вычисляли статистическое среднее расстояние d_c и статистическую дисперсию D_c по зависимостям

$$d_c = \sum_{i=1}^k d_i^c f_i^* \Delta d_i \quad (2)$$

$$D_c = \sum_{i=1}^k (d_i^c)^2 f_i^* \Delta d_i - d_c^2 = \sigma_c^2, \quad (3)$$

где d_i^c - среднее значение расстояния в i -ом интервале; σ_c - среднее квадратичное отклонение величины d [1].

Величина среднего значения расстояния в каждом интервале определена как $d_c = d_{i-1} + \Delta d_i / 2$.

По зависимостям (2) и (3) подсчитаны средний размер пор d_c и дисперсия D_c . Среднее расстояние d_c в конструкциях с относительной толщине $\delta_\phi / D_c > 1$ (D_c - диаметр спирали) по данным структурных исследований, графическая интерпретация результата которых приведена на рис. 1, может быть определено выражением, полученным в работах [2,3]

$$d_c = d_r = \Pi d_n / (1 - \Pi), \quad (4)$$

где d_r - гидравлический диаметр пористой среды; d_n - диаметр проволоки.

Для тонкостенных изделий из материала МР при относительной толщине стенки $\delta_\phi / D_c < 1$ (см. рис. 2) среднее расстояние d_c хорошо согласуется со значениями гидравлического диаметра, полученного с учетом площади поверхности конструкции

$$d_c = d_r = \Pi d_n / (1 + d_n / 2\delta_\phi) - \Pi. \quad (5)$$

Зависимость (5) обобщает и случай $\delta_\phi / D_c > 1$, так как при этом условии расхождения между значениями, полученными по выражениям (4) и (5), не превышает 5%.

Из формулы (5) следует, что на размер пор тонкостенных конструкций из материала МР при условии $\delta_\phi / D_c < 1$ существенное влияние оказывают их геометрические размеры.

Для разного типа исследованных образцов были построены гистограммы в координатах $f-d$, по виду которых можно сделать вывод о том, что закон распределения пор по размерам имеет несимметричный характер изменения. Параметры d_c и D_c не дают исчерпывающего представления о распределении размера пор d .

Функция распределения пор по размерам дает полное представление об этом.

Необходимо установить вид функции распределения пор по размерам. Опытные данные могут быть смоделированы гамма-распределением. Аналитическая функция плотности распределения пор по размерам имеет вид

$$f(d) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} d^{\alpha-1} e^{-\alpha\beta}, \quad (6)$$

где $\Gamma(\alpha)$ -неполная гамма-функция, а α и β -параметры распределения, определяемые соотношениями

$$\alpha = \beta d_c = d_c^2 / D_c = (1 / K_B^2), \quad (7)$$

$$\beta = d_c / D_c, \quad (8)$$

(K_B -коэффициент вариации).

Проверка гипотезы о принадлежности экспериментального распределения пор по размерам к теоретическому, выраженному формулой (6) было выполнено с помощью критерия согласия Пирсона. Анализ данных позволяет считать выдвинутую гипотезу обоснованной.

Функция плотности распределения пор по размерам (6) несимметричная. Она определяется размером пор d и параметрами α и β . Область определения параметров $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $d > 0$. При $d < 0$ значения функции $f(d) = 0$.

При стремлении $\alpha \rightarrow 0$ функция $f(d) \rightarrow 0$. Для пористой конструкции случай $d \rightarrow \infty$ означает разрыв ее сплошности. При этом вероятность этого события $f(d \rightarrow \infty) = 0$. Принятый закон распределения пор по размерам не противоречит физической сущности пористой структуры материала МР при граничных значениях диаметра пор.

Форма кривой $f(d)$ при этом определяется параметром α , а β носит характер масштабного множителя.

В случае, когда параметр $\alpha \rightarrow \infty$, функция $f(d)$ стремится к логарифмически нормальному распределению. При $\alpha = \infty$ $D = 0$. Эта структура представляет собой идеальную пористую среду, при этом средний диаметр $d_c = d$. Для структуры материала МР конструктивно и технологически невозможно обеспечить такое значение параметра α .

В случае, когда параметр $\alpha \rightarrow 0$, дисперсия $D \gg d_c$. Это означает, что такая структура состоит из большого количества малых пор и малого количества больших пор.

Таким образом, функция плотности распределения пор по размерам (6) описывает геометрические свойства порового пространства пористых сред, у которых неоднородность поровой структуры может изменяться от ее полного отсутствия ($\alpha \rightarrow \infty$) (идеальная пористая среда) до масштаба, соизмеримого с геометрическими размерами элемента ($\alpha \rightarrow 0$).

Безразмерный параметр распределения α , определяющий форму кривой функции (6), по данным экспериментальных исследований поровой структуры тонкостенных конструкций из материала МР может принимать значения от 0,6 до 1,7.

При $\alpha = 0,6\dots 1$ среднеквадратичное отклонение размера пор $\sigma = \sqrt{D} > d_c$ ($K_b = \sigma/d > 1$). Такая структура состоит из большого количества пор малого размера, расположенных «сгустками», между которыми находится малое количество пор большого диаметра.

Пористая структура из МР, для которой $\alpha = 1,5\dots 1,7$ имеет среднеквадратичное отклонение размера пор $\sigma = \sqrt{D_c} = (0,78\dots 0,86)d_c$, ($K_b = 0,78\dots 0,86$). Такая поровая структура отличается от рассмотренной выше взаимным расположением элементов твердой фазы, которые отстоят друг от друга на расстоянии, соизмеримом или равном d_c .

Из проведенного анализа строения структур можно сделать вывод о том, что взаимное расположение элементов твердой фазы однозначно связано с параметром распределения α . Поэтому безразмерный параметр α можно использовать как характеристику степени неоднородности микроструктуры материала МР и других пористых сред, имеющих любой другой закон распределения пор по размерам.

Для сравнения пористых сред и оценки влияния их структур на процессы массопереноса в них необходима масштабная характеристика порового объема. Такой характеристикой для пористых сред может быть их средний диаметр пор d_c .

Пусть для двух пористых сред средние диаметры пор $d_c = d_c$, но $\alpha_1 \neq \alpha_2$. При этом имеем различные по строению структуры, у которых различные параметры α и β ($\alpha_1 \rightarrow \infty$, $\alpha_2 \rightarrow 0$). При этом относительное расположение элементов скелета различно и влияние пористой среды на процесс массопереноса не одинаково.

Следовательно, попытки сравнения пористых сред, обладающих различной структурной неоднородностью по среднему диаметру пор, являются, строго говоря, необоснованными. Только при равенстве параметра распределения α и d_c сравниваемые структуры имеют одинаковое геометрическое строение порового пространства.

Список литературы

1. Богомолова А.Ф., Орлова Н.А. Количественная характеристика структуры порового пространства. ПМТФ, 1961, № 4. – С. 77-81.
2. Белоусов АИ, Изжеуров Е.А., Сетин А.Д. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР: /Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. Куйбышев. 1975. Вып 2. С. 70-80.
3. Изжеуров Е.А. Исследование гидравлических и фильтровальных характеристик упругого пористого материала МР для систем двигателей летательных аппаратов. Автореферат кандидатской диссертации: - Куйбышев, 1975, - 19с.