

В работе исследовано влияние распределения пор по размерам на капиллярные характеристики изделий из материала МР. Получены выражения для капиллярного давления и напора для пористых конструкций из материала МР.

Одним из важных используемых в теплопередающих устройствах двигателей и летательных аппаратах свойств пористых материалов является потенциал капиллярного впитывания, который характеризует процесс взаимодействия жидкости со стенками капилляров.

Максимальное значение капиллярного давления в пористых структурах может быть определено из уравнения Лапласа

$$\Delta p = 4\sigma_{\kappa} \cos \theta / d_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где σ_{κ} - коэффициент поверхностного натяжения, θ - краевой угол смачивания, $d_{\text{эф}}$ - эффективный диаметр пор [1]. В уравнении (1) краевой угол смачивания зависит от состояния поверхности пористой структуры и рода жидкости

Определение эффективного размера $d_{\text{эф}}$ для пористых сред требует специального рассмотрения. Из структурных исследований материала МР получены два характерных размера d_c и $d_{\text{эф}}$, первый из которых не учитывает распределение пор по размерам, а второй - учитывает этот факт.

Влияние распределения пор по размерам на максимальное значение капиллярного напора в пористой структуре рассмотрим на примере пористой среды, состоящей из N пор различного диаметра, гидравлически связанных между собой. Пусть в этой среде вероятность появления размера $d_i = (d_c + \Delta d_i)$ равна $p(d_i)$, где $\Delta d_i = (d_i - d_c)$, при этом $d_i > 0$ (Δd_i - алгебраическая величина). Рассмотрим случай полного заполнения пор жидкостью. Тогда уравнение для максимальной силы капиллярного давления F_k можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^N F_{ki} p(d_i) = \sum_{i=1}^N \pi \sigma_{\kappa} \cos \theta d_i p(d_i), \quad (2)$$

в котором $\sum_{i=1}^N F_{ki} p(d_i) = \Delta p \sum_{i=1}^N \frac{\pi d_i^2}{4} p(d_i)$, а

$$\sum_{i=1}^N \pi d_i \sigma_{\kappa} \cos \theta p(d_i) = \pi \sigma_{\kappa} \cos \theta \sum_{i=1}^N d_i p(d_i).$$

Выполнив необходимые преобразования левой и правой частей уравнения (2), получим

$$\Delta p = 4\sigma_{\kappa} \cos \theta / d_c (1 + K^2), \quad (3)$$

где K - коэффициент вариации.

Сравним полученный результат в виде зависимости (3) с уравнением (1). Откуда видно, что для вычисления максимального капиллярного давления в пористой среде за характерный размер более логично принимать эффективный гидравлический диаметр пор $d_{\text{эф}}$

Используя зависимость (3), можно получить выражение для эффективного гидравлического диаметра пористой структуры с распределением пор по размерам применительно к материалу МР в виде

$$d_{\text{эф}} = d_c (1 + 1/\alpha), \quad (4)$$

где α - параметр функции распределения пор по размерам ($\alpha = d^2 / D$).

Используя выражения (3) и (4) для материала МР получим зависимость для капиллярного давления

$$\Delta p = 4\sigma_{\kappa} \cos \theta / d_c (1 + 1/\alpha) \quad (5)$$

Выражение для капиллярного напора можно получить, используя уравнение равновесия капиллярных (5) и гравитационных сил

$$\Delta P_{\text{гг}} = \rho H_{\kappa}.$$

Выражение для максимального капиллярного напора в образцах из материала МР можно записать в виде зависимости

$$H_{\kappa} = 4\sigma_{\kappa} \cos \theta / \rho d_c (1 + 1/\alpha). \quad (6)$$

Из выражения (4) видно, что характерный размер пористой структуры материала МР определяется двумя параметрами d_c и α , которые являются параметрами закона распределения пор по размерам. Из формулы (4) следует, что при $\alpha \rightarrow \infty$ характерный размер $d_x = d_c$ (случай идеальной пористой среды). При $\alpha \rightarrow 0$, $d_c = \text{const}$, если дисперсия $D \gg d_c$, при этом среднеквадратичное отклонение стремится по абсолютному значению к ве-

личине максимальной поры, $\sigma = (d_{\max} - d_c) \rightarrow d_{\max}$. Используя выражение (4), можно записать, что при $\alpha \rightarrow 0$

$$d_x = \sqrt{d_c^2 + \sigma^2} \rightarrow \sqrt{d_{\max}^2} = d_{\max},$$

где d_{\max} - максимальный размер поры.

Таким образом, в случае пористой среды с крайне неоднородной структурой максимальный капиллярный напор определяется, в основном, величиной максимальной поры. Так как на вид закона распределения пор по размерам не накладывалось никаких ограничений, то полученный результат можно распространить и на закон распределения пор как в материале МР, так и на пористые материалы, распределение пор в которых имеет любой другой закон распределения.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по напору жидкости в тонкостенных конструкциях из материала МР.

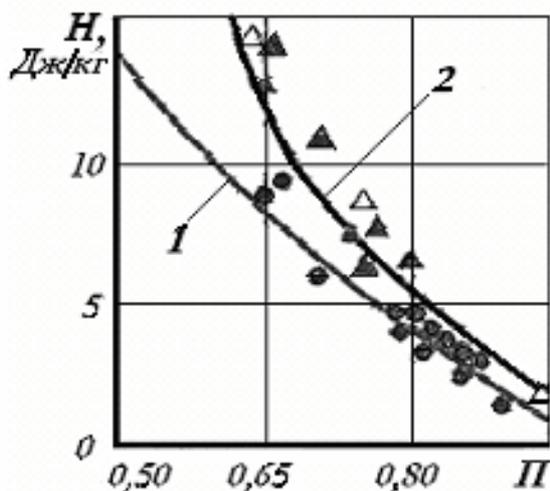


Рис. 1. Зависимость капиллярного напора от пористости для изделий из материала МР: 1 (●) — $d_n = 90$ мкм.; 2 (▲) — $d_n = 50$ мкм.; Δ — изделие из металловолоконистого спеченного материала ($d_g = 40$ мкм; $l_g/d_g = 7$ [5])

Относительная погрешность экспериментального определения капиллярного напора составляла 5...25% в зависимости от его значения. Кривые 1 и 2, построенные с использованием аналитической зависимости (4), в пределах погрешностей эксперимента согласуются с опытными данными.

Анализ результатов исследований позволил сделать вывод о том, что для материала МР максимальный капиллярный напор определяется средними и максимальными порами, а значения эффек-

тивного гидравлического диаметра пор $d_{эф}$, полученного с помощью капиллярных исследований, совпадают с эффективным размером $d_{эф}$, полученным автором по результатам гидродинамических исследований.

Результаты проведенной работы могут быть использованы для разработки методики структурных исследований, для определения параметров структуры не разрушая при этом пористое изделие.

Для успешного применения изделий из материала МР, например, в качестве фитилей тепловых труб необходимо знать прежде всего их транспортные свойства.

Для оценки транспортных свойств фитилей ТТ используются параметр капиллярного насоса K/D_c , представляющий отношение коэффициента проницаемости K в уравнении Дарси к среднему диаметру пор пористой среды, максимального капиллярного напора в образцах из материала МР H_k , комплекс KH_k [2].

Уравнение движения в форме закона Дарси известно из теории фильтрации [3]:

$$V = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (7)$$

где V - скорость фильтрации;

μ - коэффициент вязкости;

$\Delta p/L$ - перепад давления на единицу длины участка фильтрации.

Автором в предыдущей статье было получено уравнение, описывающее ламинарное течение жидкости в пористой конструкции из МР с неоднородной пористой структурой, которое имеет вид

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{240}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} \mu V \quad (8)$$

где Π - средняя пористость изделия из МР.

Используя уравнения (7) и (8), можно получить выражение для проницаемости пористой среды из материала МР в виде

$$K = \frac{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2}{240} \quad (9)$$

Параметр капиллярного насоса для изделий из материала МР, пористая структура которых представляет собой неоднородную по размеру пор среду, может быть представлен в виде отношения $K/d_{эф}$, где $d_{эф}$ - эффективный гидравлический диаметр пористой структуры с распределением пор по размерам и определяется выражением (4). Исполь-

зую выражения (4) и (9), получим зависимость для капиллярного насоса:

$$\frac{K}{d_{23}} = \frac{2\Pi d_c (1+1/\alpha)}{240}. \quad (10)$$

Из выражения (10) можно установить, что с ростом структурного параметра α параметр капиллярного насоса уменьшается за счет роста гидравлических потерь в пористой структуре при прочих равных условиях. Таким образом, более однородные пористые изделия имеют меньшую эффективность в качестве капиллярных насосов по сравнению с неоднородными.

Используя уравнения (6) и (9), получим выражение для комплекса KH_k в изделиях из МР:

$$KH_k = \frac{\sigma_k \Pi d_c (1+1/\alpha)}{30\rho} \cdot \cos \theta \quad (11)$$

Выражение (11) для параметра KH_k получено с учетом изменения пор по размерам. Из выражения (11) можно установить, что с ростом структурного параметра α комплекс KH_k уменьшается за счет роста гидравлических потерь в пористой структуре при прочих равных условиях.

Среднее расстояние d_c в конструкциях из материала МР при относительной толщине $\delta_\phi / D_c > 1$ (D_c - диаметр спирали, δ_ϕ - толщина конструкции) по данным структурных исследований [4], может быть определено выражением, полученным в работе [5]

$$d_c = d_z = \Pi d_n / (1 - \Pi),$$

где d_z - гидравлический диаметр пористой среды, который равен среднему диаметру пор d_c ;

d_n - диаметр проволоки.

Для тонкостенных изделий из материала МР при относительной толщине стенки $\delta_\phi / D_c < 1$ было получено в работе [5] выражение для среднего расстояния d_c , которое хорошо согласуется со значениями гидравлического диаметра, полученными с учетом толщины конструкции

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

Из полученного результата можно сделать вывод о желательности использования неоднородных по размеру пор пористых изделий из материала МР для фитилей тепловых труб с целью получения максимальных значений проницаемости, капиллярного насоса и параметра KH_k при сравнительно простых технологиях их изготовления. При этом следует помнить, что максимальный капиллярный напор в таких образцах из материала МР как следует из формулы (6) будет уменьшаться. Однако влияние увеличения проницаемости больше, чем уменьшения капиллярного напора.

В случае если пористая конструкция должна обеспечить заданный капиллярный напор, то из этого условия обеспечиваются её структурные характеристики. Увеличение проницаемости при этом можно добиваться путем оптимизации самой пористой конструкции.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
2. Исследование характеристик капиллярного впитывания фитилей тепловых труб /М.Г. Семена, А.Г. Косторнов, А.Н. Гершуни и др.- Инженерно-физический журнал, 1974, т.27, № 6, с.1009-1014.
3. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР,- М.: Наука, 1969. - 546 с.
4. Жижкин А.М. Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР //Труды международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Часть 1. Самара. 2003. – С. 185 – 190.
5. 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.

THE CAPILLARY HEAD IN POROUS PRODUCTS FROM MATERIAL MR

© 2006 A.M. Zhizhkin

Samara State Aerospace University

Effect of distribution of pores on sizes on capillary characteristics of products from material MR is researched. Expressions for a capillary pressure and a head for porous designs from material MR are gained.