

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ТОНКОСТЕННЫХ ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

© 2011 А. М. Жижкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье изложены результаты исследования особенности гидродинамики течения для тонкостенных изделий из материала МР цилиндрической и плоской формы.

Гидравлические потери в тонкостенных изделиях из материала МР.

Большой опыт исследований разных пористых материалов позволил выделить параметры пористой структуры, определяющие процессы, происходящие в ней.

На процессы массообмена в пористом изделии оказывают влияние в значительной мере размеры пор, их распределение по размерам, которое дает полное представление о числе пор каждого размера и диапазоне их изменения в материале [1].

В качестве объекта исследования использованы цилиндрические и пластинчатые конструкции из материала МР. Пористость П образцов составила 55...85%.

Гидравлические потери в пористых конструкциях определяются физическими свойствами рабочего тела, кинематическими характеристиками потока и особенностями внутреннего строения пористой структуры. В общем случае зависимость между этими факторами может быть записана в виде

$$\Delta p/L = f(V_x, D_x, \rho, \mu), \quad (1)$$

где $\Delta p/L$ – потери давления, отнесенные к единице длины пористого образца;

V_x – характерная скорость течения;

D_x – характерный (определяющий) размер образца [2,3].

Исследованию влияния различных параметров на $\Delta p/L$ посвящены многочисленные работы. В работе, например, [3] с помощью методов теории подобия и размерностей получено два безразмерных комплекса, которые определяют течение жидкости в пористой среде. По аналогии с трубной гидравликой эти комплексы называют коэффициентом сопротивления трения ξ и числом Рейнольдса Re :

$$\xi = \frac{2\Delta p D_x}{L V_x^2 \rho}; \quad Re = \frac{V_x D_x \rho}{\mu}. \quad (2)$$

За характерную линейную скорость V_x принимают среднюю скорость потока в порах, которая выражается через среднюю скорость V и среднеобъемную пористость Π :

$$V_x = V / \Pi.$$

При описании гидродинамических характеристик пористой среды чаще всего используется в качестве характерного (определяющего) размера средний диаметр пор d_c . В пористых структурах форма каналов, как правило, отличается от цилиндрической. Поэтому, как и в трубной гидравлике, в качестве определяющего размера используют также гидравлический диаметр пористой среды в виде выражения

$$d_c = \frac{4F}{\kappa}, \quad (3)$$

где F – площадь проходного сечения в пористой среде; κ – смоченный периметр [3].

В реальных пористых средах размер каналов, как правило, изменяется по объему и может характеризоваться законом распределения пор по размерам.

Ряд авторов отмечают, что гидравлические потери в пористых материалах обусловлены, в основном, наличием средних и крупных пор [1, 2]. Этот фактор не учитывают модели пористых сред, в которых используется средний размер пористой среды.

Для оценки влияния изменения пор по размерам в объеме пористого изделия на гидродинамические свойства пористой структуры была использована геометрическая модель, которая представляет собой набор капилляров разного диаметра. Размер капилляров в направлении, перпендикуляр-

ном течению рабочей среды, изменяется по произвольному закону (течение одномерное). В направлении течения рабочей среды размер пор не меняется. Все поры гидравлически связаны между собой.

Выделим объем пористой среды, состоящий из N пор различного диаметра. Пусть в этом объеме пористой среды 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).

Площадь проходного сечения всех пор выделенного объема пористой среды можно определить зависимостью

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} p(d_i).$$

Смоченный периметр проходного сечения всех пор выделенного объема пористой среды равен

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

Используя выражение (3) и зависимости для F и κ , получим выражение для эффективного гидравлического диаметра пористой среды с произвольным законом распределения пор по размерам в виде

$$d_{э} = d_c (1 + K^2), \quad (4)$$

где d_c – средний диаметр пор;
 K – коэффициент вариации,
 $K = (D/d_c^2)^{1/2}$; а D – дисперсия.

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

$$d_{э} = d_c (1 + 1/\alpha), \quad (5)$$

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

Из выражения (4) видно, что характерный размер пористой структуры материала МР определяется двумя параметрами: d_c и α .

Если в пористой среде размер пор не меняется, то $D \rightarrow 0$, при этом $\alpha \rightarrow \infty$, характерный размер $d_x = d_c$ (случай идеальной пористой среды).

При $\alpha \rightarrow 0$ дисперсия $D \gg d_c^2$, при этом

среднеквадратичное отклонение стремится по абсолютному значению к величине 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 характерный размер ее при массопереносе 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.

Средний диаметр 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 определен выражением, полученным в работе [5], в виде:

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

где d_z – гидравлический диаметр пористой среды, который равен среднему диаметру пор d_c ; d_n – диаметр проволоки, из которой изготавливается пористое изделие.

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:

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

Коэффициент сопротивления $\xi_{dэ}$ и число Рейнольдса $Re_{dэ}$, с учетом зависимостей (1), (5), могут быть определены формулами:

$$\xi_{dэ} = \frac{2\Delta p \Pi^2 d_c (1 + 1/\alpha)}{LV^2 \rho}, \quad Re_{dэ} = \frac{V \rho d_c (1 + 1/\alpha)}{\Pi \mu}. \quad (6)$$

Зависимость между $\xi_{dэ}$ и $Re_{dэ}$ определяется выражением вида

$$\xi_{dx} = A / \text{Re}_{dx} \quad (7)$$

при ламинарном и

$$\xi_{dx} = A_1 / \text{Re}_{dx} + B \quad (8)$$

при переходном режиме течения.

Для численного определения постоянных A , A_1 и B в уравнениях (7) и (8) необходимо проводить большой объем экспериментальных исследований. Из экспериментальных исследований гидравлических потерь в материале МР получены значения постоянных A , A_1 и B . С учетом этих значений и выражений (6) зависимости (7) и (8) можно представить в виде уравнений:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{240}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} \mu V \quad (9)$$

при ламинарном и

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{220 \mu V}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} + \frac{2\rho V^2}{2\Pi^2 d_c (1+1/\alpha)} \quad (10)$$

при переходных режимах течения жидкости в материале МР.

Критическое значение числа Рейнольдса $\text{Re}_{dx} = 10$.

Графическая интерпретация уравнений (9) и (10) приведена на рис. 1. Экспериментальные данные в пределах погрешностей (15...20%) совпадают с результатами расчета по аналитическим зависимостям (9) и (10), в которых за характерную линейную скорость V_x принята средняя скорость потока в порах. Она выражена через среднеобъемные скорость V и пористость Π , а за характерный (определяющий) размер пористой структуры принят эффективный гидравлический диаметр, который учитывает как среднее значение пор d_c , так и степень относительного варьирования их размеров $1/\alpha$. Параметр α в материале МР может иметь значения от 0,9 до 2,4 и значительно влиять на гидравлические потери в пористых изделиях.

Однако для тонкостенных пористых конструкций из материала МР автором было установлено, что для образцов толщиной $\delta_o = \delta_\phi / D_c < 1$ наблюдалось значительное отклонение параметров от закономерностей, описываемых уравнениями (9) и (10). Данные этих исследований представлены на рис. 2.

Коэффициенты сопротивления образцов, у которых $\delta_o = \delta_\phi / D_c < 1$, возрастают в 3...8 раз по сравнению с образцами, для ко-

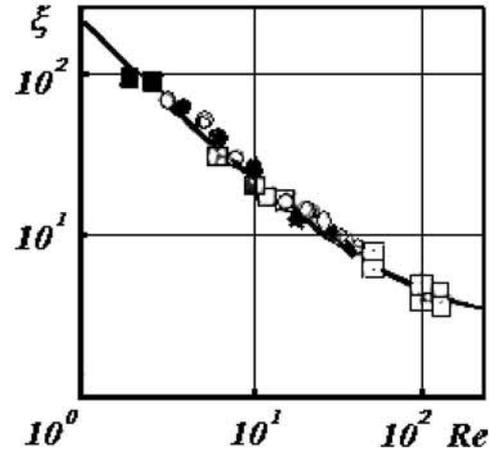


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлических потерь ξ_{dx} от числа Рейнольдса Re_{dx} ($d_n = 0,09$ мм):
 □ - $\Pi = 0,741$, $\alpha = 1,56$; ■ - $\Pi = 0,752$,
 $\alpha = 1,48$; ○ - $\Pi = 0,608$, $\alpha = 1,32$;
 ● - $\Pi = 0,614$, $\alpha = 1,30$

торых $\delta_o = \delta_\phi / D_c \geq 1$, что не может быть объяснено только микронеоднородностью структуры.

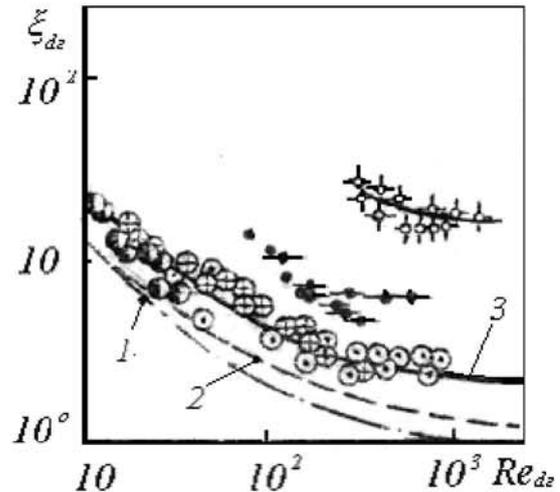


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления ξ_{dx} от числа Рейнольдса Re_{dx} :
 1 - по данным [36]; 2 - по данным [37]; 3 - по зависимости (3.36);

- - $\Pi = 0,26$; $d_n = 0,15$ мм; $\delta_\phi = 1,80$ мм;
- ⊕ - $\Pi = 0,48$; $d_n = 0,15$ мм; $\delta_\phi = 2,60$ мм;
- ⊙ - $\Pi = 0,73$; $d_n = 0,15$ мм; $\delta_\phi = 5,16$ мм;
- - $\Pi = 0,70$; $d_n = 0,09$ мм; $\delta_\phi = 1,50$ мм;
- + - $\Pi = 0,70$; $d_n = 0,15$ мм; $\delta_\phi = 1,50$ мм;
- ⊖ - $\Pi = 0,70$; $d_n = 0,30$ мм; $\delta_\phi = 1,50$ мм

Изучение структуры тонкостенных образцов из МР позволило установить отличия строения макроструктуры, которая заключается в чередовании зон с пористостями зна-

чительно меньше или больше среднеобъемных. Причем зоны с меньшей пористостью в тем большей степени определяют гидравлические потери, чем меньше значение параметра δ_ϕ/d_n .

На рис. 3 приведена графическая интерпретация зависимости коэффициента гидравлических потерь от величины отношения δ_ϕ/d_n

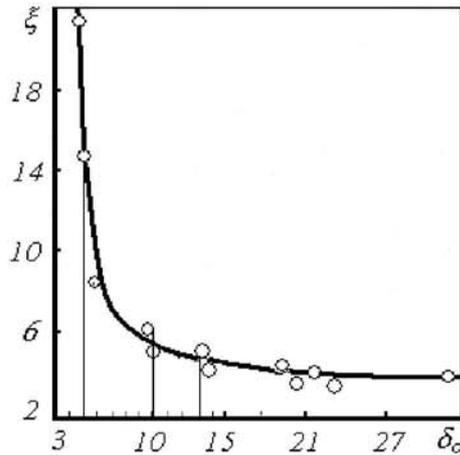


Рис. 3. Зависимость гидравлических потерь от относительной толщины элемента: ($Re = 450$)

(при $Re=450$), из которой видно, что при значениях параметра $\delta_\phi/d_n < 8...10$ значения коэффициента резко возрастают - в 3...8 раз. Такая закономерность наблюдается как при числах Рейнольдса $Re > 450$, так и при значениях $Re < 450$.

Таким образом, минимальный геометрический размер для пористых тонкостенных образцов из материала МР, применяемых в качестве элементов гидравлического тракта, следует ограничить соотношением $\delta_\phi/d_c > 1$ для предотвращения резкого повышения в них гидравлических потерь. При этом коэффициент гидравлических потерь таких изделий может быть определен по зависимостям (9) или (10) в зависимости от режима течения.

Важный практический интерес представляет оценка гидравлической эффективности материала МР в сравнении с идеальной пористой средой. При сравнении используем зависимости для определения гидравлических потерь в материале МР (9) и в идеальной пористой среде [2]:

$$\Delta p / L = 64\mu V / 2Pd_u^2.$$

При равных длинах $L_{MP} = L_u$ и среднем

диаметре пор $d_{MP} = d_u$ получим, что

$$\Delta p_{MP} / \Delta p_{II} = 3,6 / (1 + 1/\alpha). \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что относительные гидравлические потери в материале МР зависят от степени неоднородности его структуры.

Если пористая структура состоит из набора цилиндрических пор, функция распределения которых такая, как у материала МР ($\alpha_{MP} = \alpha_u$), то получим, что отношение

$$\Delta p_{MP} / \Delta p_u^{d=var} = 4.$$

Таким образом, гидравлические потери в тонкостенных конструкциях из МР примерно в четыре раза больше, чем в пористой структуре, состоящей из пор, имеющих постоянный размер по длине фильтрации.

Снижение гидравлической эффективности по сравнению с идеальной пористой средой у материала МР связано с изменением размера пор вдоль направления фильтрации и длины фильтрации, что вызывает дополнительные гидравлические потери. В ряде работ [2] вводится коэффициент извилистости $\alpha_{из}$ для учета повышения гидравлических потерь в реальных пористых средах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Левитан, М.М. Эффективность применения пористых материалов для интенсификации теплообмена в каналах [Текст] / М.М. Левитан, О.Г. Расин // Теплообмен в системах с пористыми элементами – Минск, 1981. – С. 91 – 99.
2. Белов, С.В. Пористые металлы в машиностроении [Текст] / С.В. Белов - М.: Машиностроение, 1981. - 247с.
3. Минц, Д.Е. Гидравлика зернистых материалов [Текст] / Д.Е. Минц, С.А. Шуберт - М.: Минкоммунхоз РСФСР, 1955. - 112с.
4. Богомолова, А.Ф. Количественная характеристика структуры порового пространства [Текст] / А.Ф. Богомолова, Н.А. Орлова // ПМТФ, 1961. № 4. – С. 77-81.
5. Белоусов, А.И. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР [Текст] / А.И.

Белоусов, Е.А. Изжеуров, А.Д. Сетин // Вибрационная прочность и надежность двигате-

лей и систем летательных аппаратов - Куйбышев, 1975. Вып 2. - С. 70-80.

SIZE DISTRIBUTION OF HOLES IN ELEMENTS MADE OF MR MATERIAL

© 2011 A. M. Zhizhkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Results of research of size distribution for size of holes in plane and cylindrical elements made of MR material are presented in this article.

Size of holes, size distribution, MR material.

Информация об авторах

Жижкин Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-87. Область научных интересов: виброизоляторы и уплотнения на основе материала МР.

Zhizhkin Aleksandr Michailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate professor of Aircraft Engine Design Department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-87. Area of research: sealing made of MR material.