

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА МР

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- G — вес пористого образца;
 P — пористость;
 $\gamma_{ж}$ — удельный вес материала проволоки;
 d — диаметр пористого образца;
 L — длина образца;
 $d_{пр}$ — диаметр проволоки, из которой изготовлен образец;
 ω — удельная поверхность пористого образца;
 ρ — плотность рабочей жидкости;
 $\frac{\Delta P}{L}$ — перепад давления на единице длины пористого материала;
 μ — динамическая вязкость рабочей жидкости;
 U — скорость жидкости в порах;
 V — скорость фильтрации жидкости;
 d_0 — характерный линейный размер;
 Re — число Рейнольдса;
 η — коэффициент сопротивления;
 A — коэффициент пористой среды;
 $F_{ж.с}$ — площадь живого сечения пористого образца;
 l_n — общая длина проволоки;
 γ_0 — удельный вес пористого образца;
 x — смоченный периметр;
 d_c — диаметр спирали;
 δ — толщина очистки;
 α — угол подъема витка невытянутой спирали;
 h — шаг спирали;
 W — внутренняя поверхность пористого образца;
 V — объем пористого образца.

Упругий пористый материал из витой проволоки, условно названный МР (металло-резина), является перспективным, а в ряде случаев и незаменимым при решении некоторых технических задач. Этот материал уже нашел широкое применение при изготовлении демпферов и амортизаторов, возможность его использования в гидросистемах как пористого только изучается. К числу важнейших качеств пористого материала МР можно отнести:

- высокую активную пористость, так как все поры материала являются сообщающимися;
- возможность получать материал практически с любой пористостью;
- высокое значение удельной поверхности;
- хорошую стабильность свойств по объему материала;
- высокие упругие свойства;
- простую технологию получения.

Отличительной особенностью материала МР как пористого металла является возможность точного определения значения активной пористости и удельной поверхности порового пространства.

Все это позволяет использовать материал МР в качестве регулируемых жиклеров, фильтров для очистки жидких, газообразных, криогенных, высокотемпературных и агрессивных продуктов, катализаторов, демпферов в гидросистемах для гашения пульсаций и отстройки от резонансных режимов и т. д.

Изготовление пористого материала МР

Материал МР представляет собой однородную пористую массу, полученную холодным прессованием определенным способом уложенной, растянутой и дозированной по весу спирали [1]. Исходным материалом для изготовления деталей из МР является тонкая металлическая проволока различных марок. Диаметр используемой проволоки зависит от требований, предъявляемых к пористому материалу. Изготавливают детали из проволоки диаметром от 0,03 мм до 0,3 мм.

Для производства деталей из материала МР используется спираль, полученная прокаткой проволоки между диском и роликом или намоткой на нить, которая впоследствии удаляется (выжигается или растворяется).

Спираль, полученная прокаткой между диском и роликом, растягивается так, чтобы ее шаг был равен диаметру спирали. Этим достигается наилучшее сцепление между отдельными проволочками и высокая стабильность свойств по объему в спрессованном образце. Из растянутой спирали делают заготовку для прессования, вес которой

$$G = (1 - \Pi) \gamma_m \frac{\pi d^2}{4} L. \quad (1)$$

Контроль за прессованием осуществляется по величине хода пуансона в матрицу.

При таком способе получения пористого материала используется высокопроизводительное оборудование для навивки спирали, образцы изготавливаются с наперед заданной пористостью, и при этом с большой точностью достигается равномерное распределение проволоки по всему объему пористого материала.

Недостатками этого способа получения пористого материала являются:

- наличие трудоемкой операции «вытяжка спирали»;
- сложность навивки спирали из мягкой проволоки;
- невозможность получения спирали малых диаметров (менее 0,4 мм).

При другом способе получения пористого материала спираль навивают на нить с заранее выбранным шагом. Далее из спирали с нитью делается заготовка для прессования. После этого нить удаляется (удаление нити до получения заготовки приведет к спутыванию спиралей). Дальнейшие операции по получению материала МР идут аналогично описанным выше.

Преимущества такого способа получения пористого материала в том, что спираль может быть изготовлена из мягкой проволоки, образцы можно получить из спирали диаметром менее 0,4 мм.

К недостаткам этого способа получения пористого материала можно отнести: малую производительность станков для навивки спирали, сравнительно низкую точность определения веса проволоки при взвешивании спирали с нитью, сложность контроля за удалением нити.

Несмотря на перечисленные недостатки, второй способ получения пористого материала может найти широкое применение при изготовлении фильтров тонкой очистки.

Сравнивая описанные выше способы получения пористого металла МР с получением пористых металлов из порошков (металло-керамики), хотелось бы отметить отсутствие операции спекания. Это позволяет получать пористые материалы из металлов и сплавов, плохо поддающихся спеканию (например, из титановых сплавов). К тому же полученный таким способом материал является пока единственным упругим пористым металлом.

Анализ структуры пористого материала МР. Критерий качества структуры

Важнейшее требование, предъявляемое к пористым материалам, — стабильность размеров пор и равномерность распределения их по объему материала.

Будем считать, что из двух образцов пористого материала более качественным будет тот, у которого осредненные гидравлические свойства любого наперед выбранного достаточно малого объема ближе к осредненным гидравлическим свойствам всего образца, т. е. разброс пор по размерам в таком образце меньше, и поры более равномерно распределены по объему.

Были проведены исследования для выявления факторов, влияющих на качество структуры пористого материала МР. Исследования проводились по фотографиям, полученным при рентгеноскопии и микроскопии образцов.

Выяснилось, что неоднородность структуры материала МР бывает двух видов.

Неоднородность первого рода — макронеоднородность (рис. 1, *a*). Она является следствием нарушения технологии получения материала МР. Такая неоднородность поддается устранению.

Неоднородность второго рода — микронеоднородность (рис. 1, *б*). Эта неоднородность предполагается самой структурой

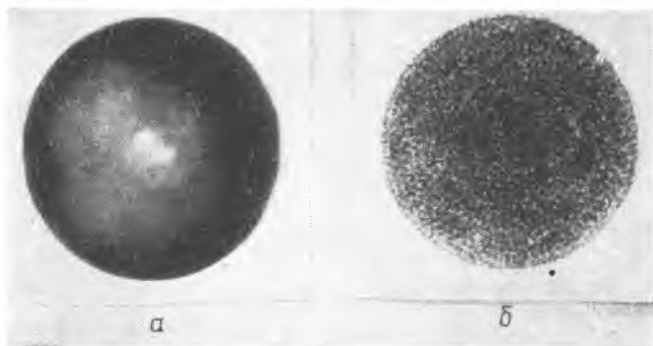


Рис. 1. Рентгеновский снимок пористой среды материала МР:

- a* — неоднородность первого рода;
- б* — неоднородность второго рода

пористого материала (невозможно получить равные по величине поры). Исследования показали, что неоднородность второго рода зависит от пористости образца, диаметра проволоки и спирали.

Качество структуры материала МР тем выше, чем меньше пористость материала, а образцов с одинаковой пористостью — чем больше поверхность проволоки в единице объема. При этом качество пористого материала тем выше, чем больше спираль укладывается в единице объема. Используя эти предпосылки и считая, что диаметр спирали при растягивании уменьшается пропорционально увеличению шага, а качество пористого материала изменяется пропорционально изменению пористости, получим абсолютный критерий качества

$$K = \frac{4(1-P)\cos\alpha}{\pi^2 P d_n^3 C}, \quad (2)$$

где

$$C = C_0 - \frac{C_0 - 1}{\pi C_0 - 1} \left(\frac{h}{d_n} - 1 \right), \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{d_c}{d_n}.$$

Пользоваться таким критерием неудобно, так как с изменением пористости от 1 до 0 его величина изменяется от 0 до ∞ . Относительный критерий свободен от этих недостатков.

Возьмем за эталонный такой образец из материала МР, абсолютный критерий качества которого так велик, что практически не может быть достигнут. Пусть пористый материал будет получен из проволоки диаметром 0,01 мм, $C = C_0 = 1$ (фактически пористый материал получен из навитых в спираль проволочек), проволоки уложены вплотную друг к другу по всей длине, и их поверхность не деформирована. Значение пористости для такой среды $P_{эт} = 0,093$, а критерий качества $K_{эт} = 1,2 \cdot 10^6$.

Тогда относительный критерий качества структуры порового пространства выразится следующим образом:

$$\bar{K} = \frac{K}{K_{эт}} = \frac{3,4 \cdot 10^{-7} (1-P)\cos\alpha}{P d_n^3 C}. \quad (4)$$

Исходя из того, что для реальных образцов $\cos \alpha \cong 1$ и $\frac{h}{d_{\Pi}} = 10$, выражение (4) можно упростить:

$$\bar{K} = \frac{3,4 \cdot 10^{-7} (1 - \Pi)}{d_{\Pi}^3 C_0 \Pi}, \quad (5)$$

где d_{Π} дано в миллиметрах.

Величина относительного критерия качества практически всегда будет меньше 1. При исследовании гидродинамических и фильтровальных характеристик материала МР использовались образцы, значение \bar{K} для которых изменялось в пределах от 10^{-5} до $2,7 \cdot 10^{-4}$.

Качественная оценка структуры порового пространства нужна при гидродинамическом расчете систем, включающих в себя материал МР, так как при этом используются осредненные параметры пористой среды (пористость, гидравлический диаметр). Чем выше качество структуры материала, тем меньше разброс значений этих параметров в пористом материале, а значит, расчет будет выполнен с большей точностью.

Гидродинамические характеристики материала МР

При исследовании гидродинамических характеристик материала МР использовались методы подобия и размерностей, которые позволяли установить вид функциональной зависимости между основными факторами, определяющими движение жидкости в пористой среде. При стационарном течении такими факторами являются $\frac{\Delta p}{L}$; ρ ; μ ; d_3 ; U [2]. В общем виде эта зависимость запишется так:

$$\frac{\Delta p}{L} = f(U; \rho; d_3; \mu). \quad (6)$$

Используя известную в теории размерностей π -теорему, получим

$$Re = \rho \frac{U d_3}{\mu}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\Delta p d_3}{L \rho U^2}.$$

Характерный линейный размер определяется соотношением

$$d_3 = \frac{4F_{ж.с}}{\kappa}. \quad (8)$$

Для любого сечения пористого материала справедливы равенства

$$\begin{aligned} F_{ж.с.} &= \Pi F, \\ \kappa &= \omega F. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, характерный линейный размер потока жидкости может быть выражен через параметры пористой среды:

$$d_э = \frac{4\Pi}{\omega}. \quad (10)$$

Подсчитаем значение удельной поверхности:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\pi d_n l_n}{G \tau_0} = \frac{4(1-\Pi)}{d_n}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), получим

$$d_э = \frac{\Pi d_n}{(1-\Pi)}. \quad (12)$$

Характерная скорость в пористом материале

$$U = \frac{V}{\Pi}. \quad (13)$$

Подставив выражения (12) и (13) в уравнения (7), получим

$$\begin{aligned} Re &= \rho \frac{V d_n}{(1-\Pi) \mu}, \\ \tau_1 &= \frac{\Delta p \cdot \Pi^3 d_n}{L \rho V^2 (1-\Pi)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, выведены два безразмерных параметра, которые могут полностью характеризовать стационарное течение жидкости в пористом материале.

Результаты экспериментов

Гидродинамические характеристики пористого материала МР исследовались на образцах, изготовленных из проволоки ЭИ-708 диаметром 0,05; 0,09; 0,12 и 0,15 мм, значение пористости испытуемых образцов изменялось в пределах от 0,4 до 0,8.

Исследования проводились на установке, работающей на масле АМГ-10 и состоящей из насосной станции, системы фильтров, блока измерений и экспериментальной камеры. При про-

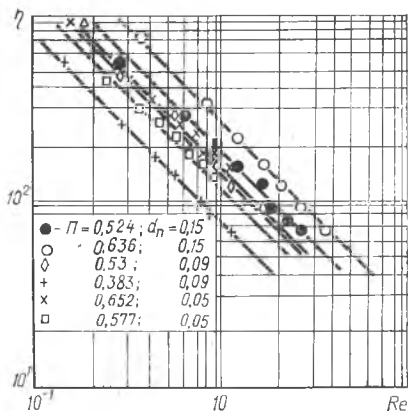


Рис. 2. Зависимость η от Re

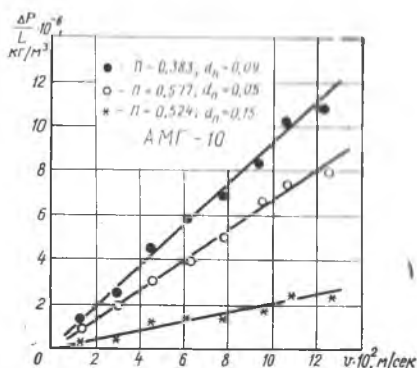


Рис. 3. Фильтрация через материал МР

ведении экспериментов замерялся объемный расход жидкости, ее температура и перепад давления на образце.

Обработка экспериментальных данных сводилась к определению функциональной зависимости коэффициента сопротивления η от числа Рейнольдса Re .

Графически эта зависимость для ламинарного режима показана на рис. 2. Значения η и Re определялись по результатам экспериментов с помощью выражений (14). Аналитически зависимость η от Re принято искать в виде [3]

$$\eta = \frac{A}{Re} \quad (15)$$

Коэффициент A характеризует структуру пористой среды и зависит от пористости и диаметра проволоки. Эта зависимость определена экспериментально:

$$A = 370\Pi + 800d_n - 126, \quad (16)$$

где d_n дано в миллиметрах.

Окончательно выражение для определения перепада давления на единице длины пористого материала примет вид:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A(1-\Pi)^2 \mu V}{d_n^2 \Pi^3} \quad (17)$$

На рис. 3 представлен график зависимости перепада давления, отнесенного к единице длины пористого образца, от

средне-расходной скорости течения жидкости в пористой среде, рассчитанный по осредненному значению коэффициента A . Экспериментальные данные обозначены точками. По графику видно, что экспериментальные точки с точностью до 10% легли на прямые, построенные по равенству (17).

Таким образом, в изученной области режимов течения жидкости в материале МР (при $Re=0,1\div 4,0$) имеет место вязкое безинерционное ламинарное течение жидкости. Получено выражение для определения перепада давления на пористой стенке из материала МР при ламинарном течении.

Фильтровальные характеристики материала МР

Исследование фильтровальных характеристик материала МР было проведено в Киевском институте инженеров гражданской авиации на кафедре «Гидравлика» по методике, приведенной, в частности, в работе [4].

Это методика позволяет обрабатывать результаты экспериментов с высокой точностью и наглядностью. При этом могут быть использованы не только микроскоп, но и снимки, полученные при фотографировании предметного стекла через микроскоп.

Осаждение частиц грязи в пористом материале происходит за счет эффекта касания и ситового эффекта, как частного случая, инерционного столкновения, броуновского движения, гравитационных сил, электрических сил [5]. Для частиц, находящихся в жидкости, текущей с малой скоростью, основным фактором, определяющим их осаждение в поровом пространстве, является ситовый эффект, который определяется величиной поры. Средний размер поры характеризуется гидравлическим диаметром. Следовательно, в первом приближении тонкость очистки (т. е. наименьшая величина частицы, не прошедшей через пору) — функция его гидравлического диаметра:

$$\delta = f(d_3). \quad (18)$$

Согласно результатам экспериментов (рис. 4) тонкость очистки фильтра прямо пропорциональна его гидравлическому диаметру:

$$\delta = bd_3 = \frac{b\Pi d_{\text{н}}}{(1-\Pi)}. \quad (19)$$

Для исследованных фильтров $b=0,65$.

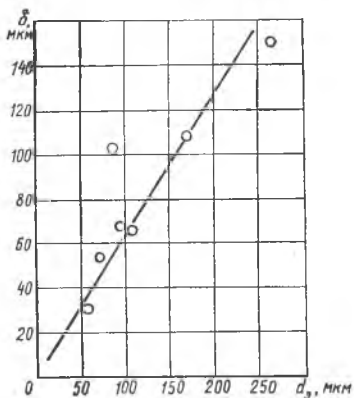


Рис. 4. Зависимость тонкости очистки δ от гидравлического диаметра материала МР

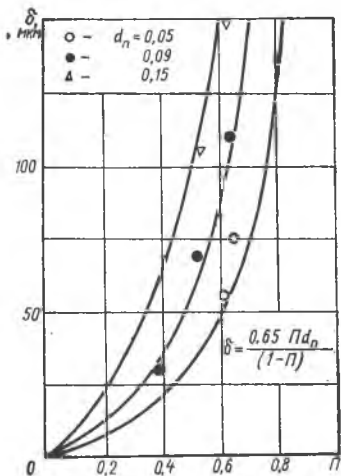


Рис. 5. Зависимость тонкости очистки δ от пористости Π

Зависимость тонкости очистки от пористости для фильтров из различной проволоки, подсчитанная по формуле (19), показана на рис. 5. Экспериментальные данные обозначены точками.

Малый разброс экспериментальных точек позволяет считать выражение (19) пригодным для оценки тонкости очистки фильтров из материала МР.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований получены выражения, позволяющие оценить качество структуры пористого материала МР, подсчитать его гидравлическое сопротивление и тонкость очистки при ламинарном режиме течения несжимаемой жидкости. Проанализированы способы получения упругого пористого металла МР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузицкий В. Н., Сойфер А. М. Цельнометаллические упруго-демпфирующие элементы, их изготовление и применение. Труды КуАИ, 1965, выпуск XIX.

2. Миц Д. М., Шуберт С. А. Гидравлика зернистых материалов. М., изд-во Мин-ва ком. хоз. РСФСР, 1965.

3. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л., Гостехиздат, 1947.

4. Беляшен П. Н., Черненко Ж. С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. «Машиностроение», 1964.

5. Ужов В. Н., Мягков Б. И. Очистка промышленных газов фильтрами. М., «Химия», 1970.

В. И. БЫКОВ

О ВЛИЯНИИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА РЕЖИМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ КОЛЕБАНИЙ РОТОРА С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ ПОДШИПНИКАМИ

Экспериментальные исследования колебаний роторов на гидростатических подшипниках показали, что при заданном перепаде давления на подшипниках (разности давлений подачи и слива) ротор до определенного числа оборотов совершает только вынужденные колебания с оборотной частотой. При увеличении оборотов выше некоторого определенного значения наряду с вынужденными колебаниями возникают колебания ротора с необоротной частотой, которые не связаны с действием на ротор внешних сил [1].

Таким образом, ротор на гидростатических подшипниках является системой, в которой возможно возникновение самовозбуждающихся колебаний. Возникновение самовозбуждающихся колебаний в системе можно рассматривать как потерю устойчивости движения ротора.

При длительной работе ротора с достаточно напряженными деталями, которые к тому же могут быть подвержены коррозии, из-за ползучести и коррозионного износа возможно увеличение дисбаланса ротора по сравнению с первоначальным. Поэтому актуальным становится вопрос о влиянии дисбаланса на режимы возникновения самовозбуждающихся колебаний ротора с гидростатическими подшипниками.

Существующие расчеты самовозбуждающихся колебаний роторов на гидростатических подшипниках [1, 2] основаны на методах теории малых колебаний и приводят к линейному рассмотрению устойчивости ротора с гидростатическими подшипниками. Поэтому они не могут быть использованы для исследования влияния вынужденных колебаний, которые вызываются