

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЛЩИН СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ГЛУБИННОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ

В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, И. В. Закревский

*Белорусский государственный аграрный технический университет,
Минск, Беларусь*

В последние годы получили развитие новые способы изготовления фильтрующих материалов (ФМ) из порошков, волокон, сеток и их композиций [1], направленные на создание в них градиентной структуры пор, характеризуемой переменной пористостью и размерами пор в объеме материала. Целью создания таких материалов является выполнение ряда требований предъявляемых к ФМ: повышение производительности, задерживающей способности, ресурса работы и улучшение регенерируемости.

Одним из наиболее распространенных ФМ с градиентной структурой пор являются многослойные ФМ, у которых каждый слой выполнен из порошков [2], волокон [1, 3, 4] различного фракционного состава, сеток с различным размером ячеек [5] или их композиций [6].

Многослойные ФМ из порошков и волокон могут работать в режиме глубинного фильтрования [1] и при правильном выборе поровой структуры, т. е. соотношения геометрических параметров ФМ (толщины) и размеров пор, определяемых размерами структурных элементов (порошка или волокна) и пористостью, могут обеспечить требуемую степень очистки, большой ресурс работы и высокую грязеемкость.

В работе [7] нами предложен новый подход организации процесса глубинного фильтрования в многослойных ФМ из волокон, базирующийся на выполнении требования равного осаждения частиц загрязнений в поровых каналах каждого слоя. Для его реализации была разработана математическая модель, основанная на использовании экспериментально установленной

зависимости Ивасаки [8], характеризующей изменение концентрации частиц загрязнений при прохождении фильтруемой среды через ФМ:

$$\frac{dC}{dx} = -\lambda C, \quad (1)$$

где C – объемная концентрация частиц загрязнений; x – координата в направлении движения очищаемой жидкости, м; λ – коэффициент фильтрования, м^{-1} .

Известно, что коэффициент λ , входящий в уравнение (1) для ФМ из волокон, равен [1]

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{\pi d}, \quad (2)$$

где Π – пористость; η_0 – вероятность столкновения частиц загрязнений в поровых каналах с волокнами; α – вероятность осаждения частиц загрязнений на волокнах; d – диаметр волокна, м.

При проведении теоретических расчетов в выражении (2) принимали $\alpha = 1$, полагая, что все частицы, столкнувшиеся с коллектором, задержатся на нем, а при определении значений вероятности столкновения η_0 учитывали роль различных механизмов осаждения частиц загрязнений в поровых каналах (см. таблицу).

$$\eta_0 = \eta_{\text{диф}} + \eta_{\text{пр ст}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{ин}}.$$

Таблица. Механизмы осаждения частиц загрязнений

Механизм	Сущность механизма	Вероятность столкновения η
Прямое столкновение (<i>Interception</i>)	Возникает, когда линии тока, по которым движутся частицы загрязнений, проходят от препятствия на расстоянии, меньшем или равном половине их диаметра	$\eta_{\text{пр. ст}} = \frac{16 \left(\frac{d_3}{d} \right)^{2-\text{Re}}}{(\text{Re}^{1/3} + 1)^3} \quad [9]$ $\text{Re} = \frac{dv_{\text{ф}} \rho_{\text{ж}}}{\mu \Pi}$

Механизм	Сущность механизма	Вероятность столкновения η
Седиментация (<i>Gravity</i>)	Отклонение частиц загрязнений от линии тока под действием силы тяжести	$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})d_3^2 \Pi g}{18\mu v_{\text{ф}}} \quad [10]$
Инерция (<i>Inertia</i>)	Отклонение частиц загрязнений от линии тока под действием сил инерции	$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_{\text{т}} d_3^2 v_{\text{ф}}}{18\mu d \Pi} \quad [11]$
Диффузия (<i>Diffusion</i>)	Отклонение частиц загрязнений от линии тока в результате их столкновения с молекулами жидкости	$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left(\frac{k_6 T \Pi}{\mu d_3 d v_{\text{ф}}} \right)^{2/3} \quad [12]$

Примечание: d_3 – диаметр частиц загрязнений, м; Re – число Рейнольдса; k_6 – постоянная Больцмана, равная $1,3804 \cdot 10^{-23}$, Дж/К; T – абсолютная температура, К; μ – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с; $v_{\text{ф}}$ – скорость фильтрации; м/с; $\rho_{\text{т}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – соответственно плотность частиц загрязнений и очищаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Опишем методику расчета толщин слоев многослойного ФМ (рис. 1), который должен обеспечить равное осаждение частиц загрязнений в каждом его слое.

Для многослойного ФМ решение уравнения Ивасаки (1) имеет вид [7]

$$C_n = C_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i - h_{i-1})\right), \quad (3)$$

где C_n и C_0 – соответственно концентрация частиц загрязнений на выходе и на входе в ФМ; h_{i-1} – толщина $(i-1)$ -го слоя, м; λ_i – коэффициент фильтрования i -го слоя, м⁻¹.

Реализацию нового подхода к организации глубинного фильтрования, обеспечивающего требуемую степень очистки в многослойных ФМ, проиллюстрируем на примере трехслойного ФМ с различными комбинациями слоев из волокон диаметрами 200, 300 и 400 мкм.

Для случая трехслойного ФМ, обеспечивающего равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое (задержка трети частиц

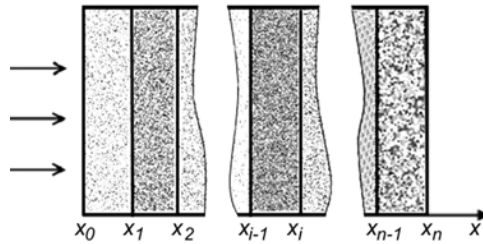


Рис. 1. Схема фильтрации в многослойном ФМ

загрязнений каждым слоем), из решения уравнения Ивасаки (3) толщины слоев ФМ будут равны

$$h_1 = -\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{2C_0 + C_n}{3C_0}; \quad h_2 = -\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{C_0 + 2C_n}{2C_0 + C_n}; \quad (4)$$

$$h_3 = -\frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{3C_n}{C_0 + 2C_n}.$$

Нахождение оптимальной структуры трехслойных ФМ рассмотрим на примере процесса фильтрации моторного масла М-10Г₂ ($\rho_{\text{ж}} = 850,82 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температуре $T = 373 \text{ К}$). Для проведения расчетов были выбраны частицы загрязнений SiO_2 ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$) с размерами $d_3 = 30 \text{ мкм}$, скорость фильтрации выбиралась равной $v_{\text{ф}} = 0,01 \text{ м/с}$. Пористость каждого слоя ФМ равнялась 0,4. Требуемая степень очистки принималась равной 0,95 ($C_n/C_0 = 0,05$).

Для трехслойных ФМ, обеспечивающих тонкость фильтрации $d_3 = 30 \text{ мкм}$ были выбраны следующие комбинации слоев из волокон размерами: 400, 300, 200 мкм; 300, 400, 200 мкм; 300, 200, 300 мкм; 200, 300, 200 мкм; 400, 200, 400 мкм. Результаты расчетов толщин слоев h_i по формуле (4) представлены на рис. 2.

Одновременно с расчетом толщин слоев ФМ, обеспечивающих равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое, устанавливались закономерности изменения относительной концентрации частиц C/C_0 (3) при прохождении через выбранные комбинации слоев многослойных ФМ. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

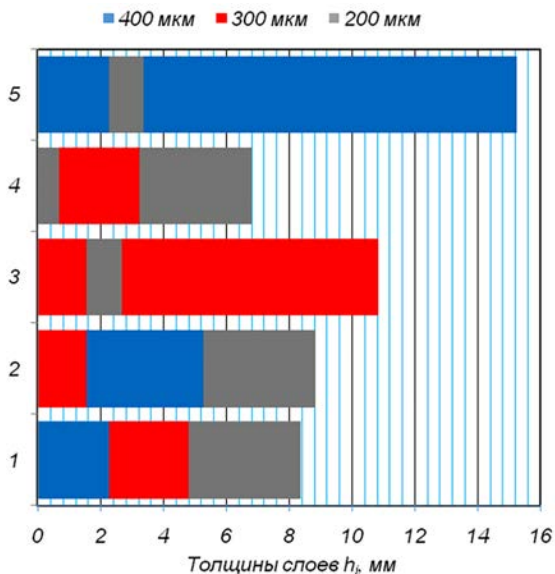


Рис. 2. Толщины слоев h_i трехслойных ФМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

Анализ полученных результатов (рис. 2, 3) показывает, что выбор комбинаций слоев из волокон различного диаметра позволяет определить их толщины, обеспечивающие равное осаждение частиц загрязнений в каждом слое, при этом общая толщина трехслойных ФМ различна.

Важной характеристикой ФМ является его производительность Q , которая может быть определена из закона Дарси [13] и зависит от коэффициента проницаемости $k_{\text{эф}}$, динамической вязкости фильтруемой среды μ , толщины h и площади S ФМ:

$$Q = \frac{k_{\text{эф}} \Delta P}{\mu h} S t, \quad (5)$$

где ΔP – перепад давления на ФМ, Па; t – время процесса фильтрации, с.

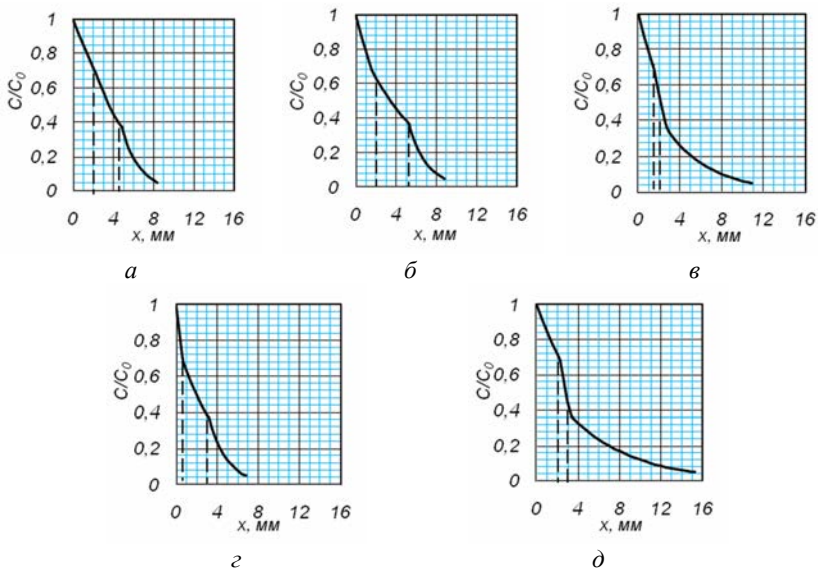


Рис. 3. Изменения относительной концентрации частиц загрязнений C/C_0 трехслойных ФМ с размерами волокон: *a* – 400, 300, 200 мкм; *б* – 300, 400, 200 мкм; *в* – 300, 200, 300 мкм; *г* – 200, 300, 200 мкм; *д* – 400, 200, 400 мкм

Определили коэффициенты проницаемости $k_{эф}$ выше рассматриваемых трехслойных ФМ с различными комбинациями слоев при тонкости фильтрования d_3 , равной 30 мкм. Для этого использовали выражение [1]

$$k_{эф} = \sum_{i=1}^3 h_i / \sum_{i=1}^3 \frac{h_i}{k_i}, \quad (6)$$

где h_i – толщина i -го слоя, м; k_i – коэффициент проницаемости i -го слоя, m^2 .

Значения коэффициентов k_i принимали равными ранее экспериментально определенным значениям для однослойных ФМ (31,2, 42,6 и 49,3 m^2), изготовленных соответственно из волокон диаметрами 200, 300 и 400 мкм [14].

Результаты расчетов коэффициентов проницаемости $k_{эф}$ трехслойных ФМ представлены на рис. 4.

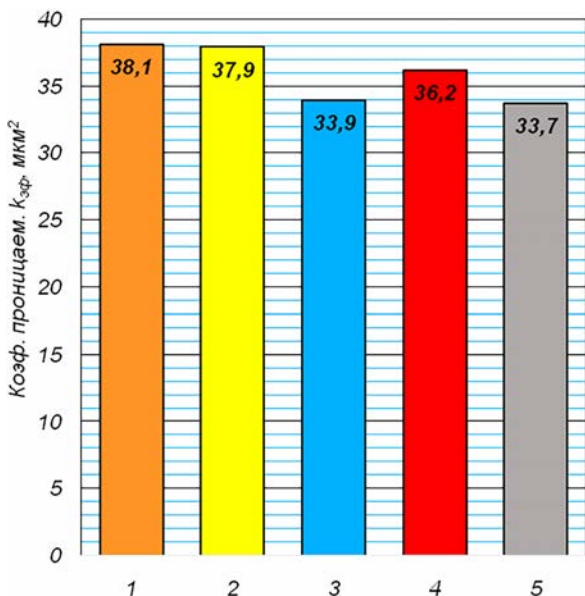


Рис. 4. Значения коэффициентов проницаемости $k_{зф}$ трехслойных ФМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

Анализ диаграмм (рис. 2, 4) показывает, что для всех рассматриваемых комбинаций слоев трехслойных ФМ однозначная корреляция значений их коэффициентов проницаемости и соответствующих толщин отсутствует: толщина трехслойных ФМ различна (6,8–15,2 мм), в то время как значения коэффициентов проницаемости находятся в узком диапазоне (33,7–38,1 мкм²).

Для оценки выбора оптимальной комбинации слоев ФМ была рассчитана их относительная производительность $Q_{отн}$ [7], равная отношению объема профильтрованной жидкости (производительности Q) к объему ФМ Q_M в целом:

$$Q_{отн} = \frac{Q}{Q_M}.$$

Очевидно, что если площадь ФМ равна S , а его толщина h , то $Q_1 = Sh$. Тогда, воспользовавшись уравнением (5), можно записать, что

$$Q_{\text{отн}} = \frac{k_{\text{эф}} \Delta P}{\mu h^2} t. \quad (7)$$

Определяли значения $Q_{\text{отн}}$ для случая фильтрования моторного масла М-10Г₂ через рассматриваемые трехслойные ФМ при перепаде давления $\Delta P = 0,1$ МПа и времени процесса $t = 1$ с.

Результаты расчетов относительной производительности $Q_{\text{отн}}$ трехслойных ФМ представлены на рис. 5.

Анализируя полученные результаты (рис. 5) можно сделать вывод, что наибольшей относительной производительностью при наименьшей толщине (рис. 2) обладает трехслойный ФМ с размерами волокон 200, 300, 200 мкм.

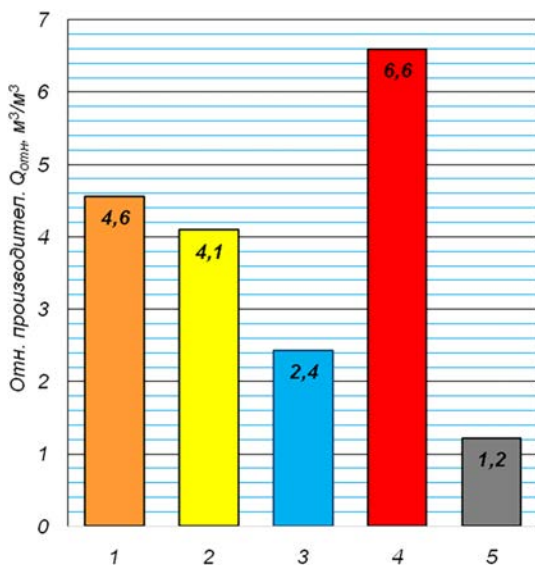


Рис. 5. Значения относительной производительности $Q_{\text{отн}}$ трехслойных ФМ с размерами волокон: 1 – 400, 300, 200 мкм; 2 – 300, 400, 200 мкм; 3 – 300, 200, 300 мкм; 4 – 200, 300, 200 мкм; 5 – 400, 200, 400 мкм

Разработанная методика расчета толщин слоев позволяет прогнозировать геометрические параметры ФМ, обеспечивающих равномерное осаждение частиц загрязнений по толщине, требуемую степень очистки и высокую производительность.

Литература

1. *Новые* фильтрующие материалы и перспективы их применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2008. – 232 с.
2. *Filter medium*: pat. US4126560.: / J. T. Marcus, H. M. Kennard. – № 4126560; patented Nov. 21, 1978. – United States Patent Office.
3. *Проницаемые* материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2013. – 380 с.
4. *Свойства* двухслойных волоконных фильтроэлементов, полученных методом сухого изостатического прессования из медных отходов / В. М. Капцевич [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials: сб. докл. 8-го Междунар. симп., Минск, 10–12 апр. 2013 г.: в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2013. – Ч. 1. – С. 207–212.
5. *URL*: <http://www.weiku.com/products-image/10255326/multi-layer-filter-discs.html>. – Дата обращения: 15.10.2012.
6. *Богинский, Л. С.* Теория и практика сухого изостатического (радиального) прессования порошковых и волоконных уплотняемых материалов / Л. С. Богинский, Е. Е. Петюшик, О. П. Реут // 50 лет порошковой металлургии Беларуси / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2010. – Гл. 10. – С. 171–217.
7. *Построение* оптимальной структуры многослойных фильтрующих материалов для очистки моторного масла после обкатки двигателя / В. М. Капцевич [и др.] // Агропанорама. – 2018. – № 3 (128). – С. 38–45.
8. *Iwasaki, T.* Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // Jour. AWWA. – 1937. – № 29. – P. 1591–1602.
9. *Huang, Ch.* Mechanism of Particle Impaction and Filtration by the Dry Porous Metal Substrates of an Inertial Impactor / Ch.-Hs. Huang, Ch.-J. Tsai // Aerosol Science and Technology. – 2003. – № 37. – P. 486–493.
10. *Water and Waste Water Filtration: Concepts and Application* / K. Yao [et al.]. // Environmental Science and Technology. – 1971. – Vol. 5. – № 12. – P. 1105–1112.
11. *Bliss, T.* Suspended Solids Washing Overview / T. Bliss, M. Ostoja-Starzewski // IPST Technical Paper Series Number. – 1997. – Vol. 679. – 13 p.
12. *Левич, В. Г.* Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М. : Гос. изд-во физ.-хим. лит-ры, 1959. – 700 с.

13. *Витязь, П. А.* Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин. – Минск : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

14. *Ильющенко, А. Ф.* Проницаемые материалы из медных кабельных отходов. Сообщение 3. Взаимосвязь структурных и гидродинамических свойств проницаемых материалов из медных волоконных отходов, полученных методом сухого изостатического прессования / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2014. – Вып. 37. – С. 121–126.

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОСТОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. О. Каясова, Ю. Ю. Капланский, Е. А. Левашов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия, тел. +7-495-638-45-00, факс. +7-499-236-52-98, e-mail: levashov@shs.misis.ru

Введение. Аддитивные технологии являются локомотивом развития многих отраслей экономики, а промышленное освоение энергосберегающей технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) позволит существенно сократить производственный цикл изготовления сложнопрофильных деталей и узлов из металлопорошковых композиций.

Перспективным материалом для технологии СЛС являются мартенситно-стареющие стали, обладающие высокими показателями прочности (1500–3500 МПа) и твердости (не более $H_B = 321$ мм) при относительно высокой пластичности (15–20 %), коррозионной стойкости и износостойкости. Данные стали относятся к высоколегированному классу и содержат в своем составе Ni, Co, Mo, Ti. За счет термической обработки в результате «мартенситного» старения легирующие элементы образуют плас-