

2. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л : Машиностроение, 1986. – 172 с.

3. Гнесин, Г.Г. Принципы создания магнитно-абразивных материалов / Г.Г. Гне-син, М.Д. Крыский, Л.Н.Тульчинский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – 1980. – С. 17–25.

4. Способ получения магнитно-абразивного порошка : а с. 677813 СССР : МКП В22F9/16 / Н.А. Басуев, А.Б. Кочкарев. № 3541782/22-02 ; заявл. 21.01.1983 ; опубл. 07.02.1985 // Бюл. № 5, 1985. – 4 с.

5. Ферромагнитный абразивный материал и способ получения материала : пат. № 6028 С1, МКИ С22С23/02, 29/14, В24D23/34. В22F9/04 / Ю.Г. Орлов [и др.] ; ГНУ ФТИ НАН Беларуси. – № а20000194 ; заяв. 2000,02,29 ; опубл. 2004.03.30 : Бюл. № 12, 2004. – 4 с.

**Abstract.** A composition and method of manufacturing ferro-abrasive powder based on iron borides for magnetically abrasive machining of parts from aluminum and copper alloys is proposed. It has been established that in terms of the aggregate characteristics, the proposed ferro-abrasive powder is not inferior or superior to the existing ones.

УДК 621.762

**Капцевич В.М.**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор;  
**Кусин Р.А.**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;  
**Корнеева В.К.**<sup>1</sup>, кандидат технических наук;  
**Ильющенко А.Ф.**<sup>2</sup>, доктор технических наук, профессор,  
член-корр. НАН Беларуси;  
**Черняк И.Н.**<sup>2</sup>, **Кусин А.Р.**<sup>2</sup>, **Жегздринь Д.И.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Институт порошковой  
металлургии имени академика О.В. Романа»,  
г. Минск, Республика Беларусь

## **РАСЧЕТ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Приведена методика расчета проницаемости двухслойных порошковых фильтрующих материалов с учетом зоны

*перекрытия. Показано негативное влияние зоны перекрытия и подтверждена возможность компенсации этого влияния за счет уменьшения толщины мелкодисперсного слоя.*

Порошковые фильтрующие материалы (ПФМ), основные эксплуатационные свойства которых обеспечиваются наличием разветвленной взаимосвязанной системой сквозных пор, являются особенностью порошковой металлургии. Несмотря на широкое распространение в технике, которое получили полимерные, бумажные, керамические материалы, ПФМ достойно конкурируют с ними благодаря своему высокому комплексу свойств: они имеют хорошее сочетание пропускной способности и тонкости очистки, прочны, устойчивы к тепловым ударам, поддаются сварке, пайке и механической обработке, способны многократно регенерироваться различными методами; выбором соответствующего материала обеспечиваются необходимые коррозионная стойкость, жаростойкость и теплопроводность, что дает возможность эксплуатировать ПФМ при высоких температурах и в агрессивных средах, в том числе, например, при работе с кислотами, щелочами, агрессивными и раскаленными газами. Можно утверждать, что там, где необходима реализация физико-химических свойств, присущих металлам и сплавам, из которых ПФМ изготовлены, альтернативы последним нет.

Порошковые фильтрующие материалы успешно применяются в агропромышленном комплексе для решения различных задач: в том числе для: аэрации воздушного потока с целью насыщения кислородом воздуха культуральной жидкости при выращивании аэробных микроорганизмов в биореакторах, диспергации потока озоносодержащей воздушной смеси для обеззараживания среды обитания рыб (в том числе и мальков) в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) и равномерного распределения потока пара по объему теплоносителя (воды) для регулирования температуры в рабочих емкостях при тепловой обработке молока, молочных смесей и технологических сред, используемых при переработке молока, очистки воздуха, водяного пара, масла и других целей [1–5]. Очевидно, что разработка ПФМ с повышенными свойствами увеличивает эффективность их применения. В свою очередь прогнозирование свойств ПФМ облегчает процесс разработки новых материалов.

Наиболее распространенными и эффективными способами повышения свойств фильтрующих материалов на основе металлических порошков являются способы, направленные на создание градиентных структур, у которых размеры пор изменяются в направлении фильтрации [6–8]. Характерным представителем таких материалов являются двухслойные материалы, один слой у которых образован мелкодисперсными частицами и обеспечивает необходимую тонкость очистки, второй – крупнодисперсными частицами и обеспечивает достаточную прочность и повышенную проницаемость ПФМ.

Однако при формовании двухслойных материалов имеет место возникновение на границе слоев промежуточного слоя, так называемой «зоны перекрытия», в котором более мелкие частицы заполняют поровое пространство, образованное крупнодисперсными частицами [9, 10]. Одним из эффективных путей повышения свойств двухслойных ПФМ является уменьшение толщины мелкодисперсного слоя [11]. В этом плане представляют интерес методика и результаты расчетов влияния зоны перекрытия на свойства двухслойных ПФМ.

При получении двухслойных материалов путем совместного формования порошков разных фракций в области границы слоев более мелкие частицы порошка частично заполняют поровое пространство, образованное более крупными частицами, создавая, таким образом, промежуточный слой (зону перекрытия). На рисунках 1 и 2 проиллюстрированы примеры образования таких структур при получении двухслойных материалов на основе порошков титана и меди. Определим влияние зоны перекрытия на проницаемость двухслойных ПФМ.



Рисунок 1 – Структура двухслойного ПФМ, изготовленного из порошков титана с размером частиц  $(-1000+400)$  и  $(-100+40)$  мкм

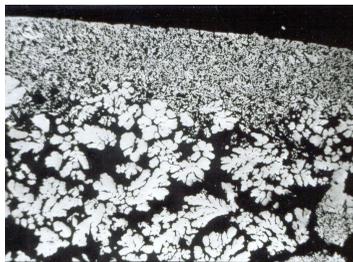


Рисунок 2 – Структура двухслойного ПФМ, изготовленного из порошков меди с размерами частиц  $(-315+200)$  и  $(-80+40)$  мкм

Для расчета проницаемости с учетом зоны перекрытия рассмотрим случай, когда пористый материал состоит из двух слоев и зоны перекрытия. Первый и второй слои образованы соответственно из частиц порошка с размерами  $D_1$  и  $D_2$ , причем  $D_1 > D_2$ . Зона перекрытия (условно ее можно считать третьим слоем), расположенная между первым и вторым слоями, состоит из частиц этих двух размеров, причем мелкие частицы с размерами  $D_2$  расположены в промежутках между крупными частицами с размером  $D_1$ . Обозначим через  $h_1$ ,  $h_{12}$  и  $h_2$  толщины первого слоя (подложки), переходного слоя (зоны перекрытия) и второго слоя (из мелкодисперсного порошка), а через  $Q$  – расход фильтруемой среды через ПФМ в единицу времени.

Рассматривая течение жидкости или газа через весь материал, на основании закона Дарси [12] можно записать:

$$Q = \frac{k \Delta p}{\mu h} S, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости;

$\Delta p$  – перепад давления на ПФМ;

$S$  – площадь фильтрации;

$\mu$  – вязкость фильтруемой среды;

$h$  – толщина ПФМ.

Для каждого слоя в отдельности выражение (1) можно записать следующим образом:

$$Q_1 = \frac{k_1 \Delta p_1}{\mu h_1} S; \quad Q_{12} = \frac{k_{12} \Delta p_{12}}{\mu h_{12}} S; \quad Q_2 = \frac{k_2 \Delta p_2}{\mu h_2} S \quad (2)$$

где  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_{12}$ ,  $\Delta p_2$ , – соответственно перепады давления на каждом из слоев с толщинами  $h_1$ ,  $h_{12}$ ,  $h_2$ ;  $S$  – площадь фильтрации всех слоев

(первого слоя – подложки; промежуточного слоя – зоны перекрытия и второго слоя – из мелкодисперсного порошка).

Очевидно, потоки фильтруемой среды, проходящие через весь материал  $Q$  и через каждый слой в отдельности  $Q_1$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_2$ , равны между собой:

$$Q = Q_1 = Q_{12} = Q_2, \quad (3)$$

а перепад давления на ПФМ и его толщина составляют:

$$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_{12} = \Delta p_2, \quad (4)$$

$$h = h_1 = h_{12} = h_2. \quad (5)$$

На основании (1, 2) с учетом (3–5) можно получить следующие уравнения:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{kh_1}{k_1h}; \quad \frac{\Delta p_{12}}{\Delta p} = \frac{kh_{12}}{k_{12}h}; \quad \frac{\Delta p_2}{\Delta p} = \frac{kh_2}{k_2h}. \quad (6)$$

Суммируя, левые и правые части уравнений (6), получаем выражение для расчета  $k$ :

$$1 = \frac{kh_1}{k_1h} + \frac{kh_{12}}{k_{12}h} + \frac{kh_2}{k_2h}, \quad (7)$$

откуда:

$$k = \frac{h}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_{12}}{k_{12}} + \frac{h_2}{k_2}} \quad (8)$$

Для определения коэффициента проницаемости в зоне перекрытия воспользуемся следующими соображениями. Из процесса фильтрации этого слоя исключены участки поверхности, заблокированные крупными частицами с размерами  $D_1$ , в связи с чем его пропускная способность определяется областями порового пространства подложки, заполненного мелкодисперсным порошком, с площадью  $S_{12} < S$ . Соответственно, коэффициент проницаемости этих областей можно принять равным  $k_2$ .

Тогда на основании условия неразрывности потока (3) величину  $Q_{12}$  можно представить в виде:

$$Q_{12} = \frac{k_2 \Delta p_{12}}{\mu h_{12}} S_{12}. \quad (9)$$

Приравняв правые части выражения для зоны перекрытия (2) и выражения (9) друг к другу, получим:

$$k_{12} = k_2 \frac{S_{12}}{S}. \quad (10)$$

Для расчета величины  $S/S_{12}$  воспользуемся моделью элементарной ячейки рассмотренной в [12]. Тогда величина  $S_{12}$  в пределах такой ячейки изменяется от минимального значения равного:

$$S_{12\min} = D_1^2 - \frac{\pi}{4} D_1^2, \quad (11)$$

до максимального значения:

$$S_{12\max} = D_1^2. \quad (12)$$

Для расчета  $S_{12}$  возьмем среднее значение этой величины:

$$S_{12\text{cp}} = D_1^2 - \frac{\pi}{8} D_1^2. \quad (13)$$

Если учесть, что:

$$S = D_1^2, \quad (14)$$

то:

$$\frac{S}{S_{12}} = \frac{1}{1 - \frac{\pi}{8}}. \quad (15)$$

Полученные выражения (7), (10) и (11) позволяют рассчитать коэффициент проницаемости двухслойного ПФМ с учетом зоны перекрытия между слоями, зная значения коэффициентов проницаемости подложки и мелкодисперсного слоя.

В таблице приведены результаты расчетов коэффициентов проницаемости ПФМ для двухслойных материалов, структуры которых приведены на рисунках 1 и 2, и их экспериментальные значения. Значения коэффициентов проницаемости подложки, мелкодисперсного слоя и толщина слоя перекрытия определены экспериментально.

Анализ данных, представленных в таблице показывает, во-первых, удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных и, во-вторых, существенное отрицательное влияние зоны перекрытия на проницаемость двухслойных ПФМ: ее наличие снижает проницаемость в 1,46–

1,98 раза при сравнении результатов расчетов и в 1,46–1,64 раза при сравнении результатов расчетов с экспериментальными значениями. Это влияние может быть снижено за счет уменьшения толщины мелкодисперсного слоя.

Таблица – Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов проницаемости двухслойных ПФМ

Исходный материал	Размер частиц порошка, мкм		Толщина, мм			Коэффициент проницаемости, $\text{м}^2, \times 10^{13}$				
	подложки	мелкодисперсного слоя	подложки	зоны перекрытия	мелкодисперсного слоя	Экспериментальные значения			Расчетные значения двухслойного ПФМ	
						подложки	мелкодисперсного слоя	двухслойного ПФМ	с зоной перекрытия	без зоны перекрытия
Порошок титана	-1000+400	-100+40	3	1,0	1,5	180,0	7,0	14,2	11,8	23,3
Порошок меди	-315+200	-80+40	1,7	0,3	1,0	70,0	2,16	4,17	4,19	6,1

На рисунке 3 приведены расчетные зависимости коэффициентов проницаемости двухслойных ПФМ на основе порошков титана и меди от толщины слоя из мелкодисперсного порошка при неизменной общей толщине пористого материала, которые при сравнении с расчетными данными, представленными в таблице, свидетельствуют, что, например, уменьшение толщины мелкодисперсного слоя в три раза приводит к увеличению проницаемости ПФМ на основе титана в 1,4 раза, а на основе меди - в 1,8 раза, причем во втором случае коэффициент проницаемости материала превышает значение коэффициента проницаемости ПФМ с первоначальной толщиной мелкодисперсного слоя, рассчитанного без учета зоны перекрытия.

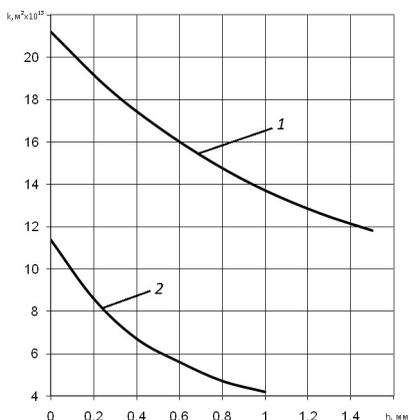


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента проницаемости двухслойного ПФМ от толщины мелкодисперсного слоя: 1 – ПФМ на основе титана; 2 – на основе меди

На основании вышеизложенного можно констатировать, что полученное выражение для расчета коэффициента проницаемости двухслойных ПФМ с учетом зоны перекрытия удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Показано негативное влияние этой зоны на коэффициент проницаемости пористого материала, который вследствие ее наличия снижается более чем в 1,46 раза. Установлено, что это влияние может быть компенсировано уменьшением толщины слоя мелкодисперсного порошка.

#### Список использованных источников

1. Ильющенко, А.Ф. Применение порошковых фильтрующих материалов в процессах культивирования аэробных микроорганизмов при переработке молочной сыворотки и тепловой обработке молочных продуктов в агропромышленном комплексе / А.Ф. Ильющенко [и др.]. // Материалы 6-ого Междунар. симп. (Минск, 19–20 окт. 2017 г.) «Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе» – Porous permeable materials: technologies and products thereof / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]: редкол. А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 437–442.

2. Кусин, Р.А. Применение пористых порошковых материалов в качестве распределителей газовых потоков на предприятиях АПК /

Р.А. Кусин [и др.] // *Материалы Международной научно-практической конференции: Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК, 7–8 июня 2017 г., Минск. – Минск, БГАТУ, 2017. – С. 91–96.*

3. Ильющенко, А.Ф. Применение порошковых диспергаторов для озонирования воды в установках замкнутого водоснабжения / А.Ф. Ильющенко [и др.] // *Материалы 5-ого Междунар. симп. (Минск, 30-31 окт. 2014 г.) «Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе» – Porous permeable materials: technologies and products thereof / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]: редкол. П.А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2014. – С. 236–239.*

4. Капцевич, В.М. Очистка технических масел с помощью порошковых фильтрующих материалов / В.М. Капцевич [и др.] // *Сб. научн. трудов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства. – Горки: БГСХА, 2001. – Ч. 2. – С. 103–108.*

5. Капцевич, В.М. Использование пористого порошкового материала для фильтрации питьевой воды / В.М. Капцевич [и др.] // *Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства, ч. 2.: Материалы международной научно-практической конференции, г. Горки, 12-14 октября 2001 г. – Горки: БСХА, 2001. – С. 26–28.*

6. Витязь, П.А. Пористые порошковые материалы: история создания, современное состояние и перспективные разработки / П.А. Витязь // *50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы: ред. кол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: ГНПО ПМ, 2010. – с. 251–320.*

7. Ильющенко, А.Ф. Современные материалы в сельскохозяйственном машиностроении / А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2009. – 256 с.

8. Капцевич, В.М. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В.М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2007. – 232 с.

9. Сорокина, А.Н. Исследование процесса получения двухслойных пористых порошковых материалов методом прессования / А.Н. Сорокина, И.В. Валькович // *Тез. Межд. симпозиума «Новые мате-*

риалы и технологии порошковой металлургии», Минск, 19–20 марта 1997. Минск: НИИ ПМ с ОП, 1997. – С. 106–107.

10. Валькович, И.В. К вопросу получения двухслойных пористых материалов методом прессования / И.В. Валькович, Р.А. Кусин, А.Н. Сорокина // Порошковая металлургия. – Минск: Кибер, 1995. – Вып. 18. – С. 64–69.

11. Кусин, А.Р. Повышение эффективности двухслойных порошковых проницаемых материалов / А.Р. Кусин, И.Н. Черняк // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы респ. науч.-техн. конф. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», 2005. – С. 100.

12. 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.

**Abstract.** The method for calculating the permeability of two-layer powder filtering materials with the overlap zone is given. The negative influence of the overlap zone is shown and the possibility of compensating for this effect by reducing the thickness of the fine-dispersed layer is confirmed.

УДК 501.22:621.763

**Андрушевич А.А.**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент;  
**Калиниченко В.А.**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
заведующий лабораторией

<sup>1</sup> УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

## **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МАТРИЦЕЙ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

**Аннотация.** В статье приведены сведения о влиянии ряде особенностей получения композиционных материалов с макрогетерогенной структурой. Рассмотрены особенности получения струк-