

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л. П. Пилиневич, М. В. Тумилович, Д. Н. Антончик

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, 293-88-83, Tumilovich@bsuir.by*

*На основе анализа литературных данных, теоретического анализа и математического моделирования, а также экспериментальных исследований проведена оптимизация поровой структуры и разработана технология получения пористых порошковых материалов методом вибрационного формования для огнепреградителей. По сравнению с традиционными технологиями получения (прессование в пресс-форме) огнепреградители, полученные методом вибрационного формования с параметрами, при которых достигается максимальная плотность укладки частиц порошка, имеют проницаемость в 1,2 раза выше при сохранении высокой механической прочности.*

Взрыво - и пожаробезопасность многих технологических процессов, датчиков приборов газоанализа, температуры, давления может быть обеспечена с помощью различных типов огнепреградителей. Огнепреградителями называются защитные устройства, которые свободно пропускают поток жидкости или газов через твердую огнегасящую насадку, но задерживают пламя (гасят его). Принцип действия огнепреградителей заключается в разбиении газового потока на большое число маленьких струек, в которых потери тепла превышают тепловыделение в зоне реакции. Наиболее перспективными материалами, применяемыми в качестве огнепреградителей, являются пористые проницаемые материалы (ППМ) из металлических порошков. При конструировании огнепреградителей из металлических порошков учитывают величину их пор, газопроницаемость, механическую прочность, стоимость, а также химический состав материала, который должен быть инертен к газовой смеси. Огнепреградители в первую очередь должны обладать высокой механической прочностью, иметь малые размеры пор и низкое гидравлическое сопротивление.

При создании огнепреградителей на основе ППМ для изделий конкретного назначения с заранее заданным комплексом эксплуатационных характеристик возникают определенные трудности, связанные с определением оптимального порораспределения, а также с ограниченными возможностями традиционных технологий получения ППМ с таким порораспределением.

Поэтому необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по определению оптимальной поровой структуры ППМ и поиск новых технологических приемов и методов, позволяющих создавать оптимальные поровые структуры

ППМ, применяемых в качестве огнепреградителей для приборов и устройств различного назначения при эксплуатации которых необходимо обеспечить взрыво- и пожаробезопасность.

### Теоретический анализ

Теоретические основы процессов гашения пламени в узких каналах разработаны академиком Я.Б. Зельдовичем еще в 1941 году. Дальнейшее развитие эта теория получила в теоретических и экспериментальных работах И.И. Стрижевского, А.И. Розловского, Ю.Х. Шаулова, А.Е. Поттера и других отечественных и зарубежных исследователей.

Для прекращения горения необходимо, чтобы температура в зоне горения не превышала значения температуры нижнего температурного предела, т.к. ниже этой температуры пламенное горение в большинстве случаев становится невозможным, пламя гаснет и процесс горения прекращается.

При горении реализуются три основных механизма теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и тепловое излучение. Теплота, выделяемая в зоне горения в пористом материале, расходуется на теплопроводность, излучение и конвекцию, т.е. для суммарного теплоотвода с единицы поверхности зоны горения  $T_T$  можно записать:

$$\varepsilon T_T = b - \sigma (T_T^4 - T_{II}^4) + \alpha (T_T - T_{II}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты факела пламени;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_T$  и  $T_{II}$  – соответственно, температура горения и пористого материала,  $K$ .

В узких порах пористого материала потери тепла вызывают понижение температуры горения в зоне реакции, уменьшение скорости распространения пламени. При уменьшении диаметра пор увеличивается его поверхность контакта на единицу массы, т.е. возрастают потери тепла в зоне горения. Для характеристики горючей газовой смеси при определенной температуре и давлении введено понятие критический диаметр гашения пламени  $d_{кр}$  [1], который представляет собой минимальный диаметр канала, через который пламя стационарной газовой смеси еще может распространяться неограниченно. Если в огнепреградителе диаметр пор для данной горючей смеси равен  $d_{кр}$ , то в зоне горения устанавливается равенство между тепловыделениями и теплотерями.

Когда потери тепла в зоне горения достигают некоторой критической величины температуры горения и скорости распространения пламени в пористом материале, процесс горения становится невозможным. Для того, чтобы огнепреградитель обеспечивал надежную локализацию пламени, диаметр его каналов необходимо принимать равным  $0,5d_{кр}$ . Критический диаметр определяется расчетом или опытным путем.

Согласно руководству по расчету основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов [1], критический диаметр канала огнепреграждающего элемента определяется выражением:

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \lambda}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}, \quad (2)$$

где  $Pe$  – число Пекле;  $R$  – универсальная газовая постоянная Дж/кмоль·К;  $T$  – начальная температура газовой горючей смеси, К;  $\lambda$  – теплопроводность горючей смеси, Вт/(м·К);  $S_u$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;  $C_p$  – теплоемкость газовой горючей смеси при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $P$  – давление горючей смеси, Па;  $M$  – молярная масса, кг/кмоль.

Таким образом, используя выражение (2) мы можем определить диаметр пор пористого порошкового материала, используемого в качестве огнепреградителя для заданной газовой горючей смеси, который обеспечит локализацию пламени горючей смеси.

Необходимо отметить, что механизм распространения пламени в ППМ сложно объяснить с позиций классической тепловой теории и математически точно описать, т.к. ППМ имеют сложную поровую структуру и невозможно объяснить все происходящие в поровых каналах тепловые явления, поэтому для создания огнепреградителей на основе ППМ путь экспериментальных исследований является основным для создания материала, обладающего комплексом необходимых характеристик.

### **Разработка математической модели процесса получения огнепреградителей**

Основным методом, который позволяет определить влияние различных технологических факторов (размер частиц, их форма и упаковка) на основные свойства разрабатываемых материалов является моделирование. ППМ можно представить с помо-

щью математических моделей, которые позволяют теоретически описывать его основные характеристики и происходящие в нем процессы.

Рассмотрим модель ППМ [2], который состоит из сферических частиц различного диаметра и характеризуется функцией распределения частиц в трехмерном пространстве  $f(D, x, y, z)$ , где  $D$  – диаметр частиц;  $x, y, z$  – пространственные координаты. Эта функция при заданных значениях  $D, x, y, z$  показывает, какую часть элементарного объема  $\delta V$  с координатами центра  $x, y, z$  составляет объем  $dV_D$ , занимаемый частицами с данным диаметром в интервале  $D, D + dD$ , и определяется из соотношения:

$$dV_D(x, y, z) \delta V(x, y, z) = f(D, x, y, z) dD \quad (3)$$

Как уже указывалось ранее, одной из важнейших характеристик ППМ, применяемых в качестве огнепреградителей, является размер пор. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует теория для расчета размеров пор пористых тел, состоящих из частиц различного размера, случайно распределенных в его объеме. Однако для практики особый интерес представляют пористые тела, которые можно представить в виде совокупности частиц одного размера.

При определении размеров пор таких совокупностей в рамках глобулярной модели воспользуемся тем, что для правильной упаковки сферических частиц одного размера известно отношение диаметра поры в наиболее узком ее сечении  $d_{\text{п}}$  к диаметру частиц исходного порошка  $D$  как функции пористости.

Зависимость  $d_{\text{п}}/D$  от пористости иллюстрируют следующие данные, представленные в таблице 1 [2]:

Таблица 1

Зависимость  $d_{\text{п}}/D$  от пористости

Пористость, %	81,5	66	47,6	32	26
$d_{\text{п}}/D$	1,90	0,915	0,414	0,225	0,155

Представляя отношение  $d_{\text{п}}/D$  в зависимости от пористости  $\Pi$  в виде экспоненциальной и показательной зависимостей и определяя их коэффициенты методом наименьших квадратов, получим:

$$d_{\text{п}}/D = 2,43\Pi^{2,11} \quad (4)$$

и

$$d_{\text{п}} / D = 0,052 \exp(4,402\Pi). \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют определить размеры частиц исходных порошков для получения пористых проницаемых материалов с требуемым размером пор.

В работе [3] пористая среда моделируется системой сфер заданной пористости. Рассматривается три модели движения жидкости через такую среду: Стокса, Кувабари и Хаппеля [4, 5]. Для всех трех моделей получена зависимость коэффициента проницаемости  $K$  от радиуса сферических частиц  $R_r$  и пористости  $\Pi$ , которая описывается следующим выражением:

$$K = \left( \frac{2R_r^2}{9\beta} \right) f(\beta), \quad (6)$$

где  $\beta = (1 - \Pi)$ .

Величина предела прочности при поперечном изгибе по трехточечной схеме определяется из следующего выражения [6]

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3P_{\text{max}} l}{2h^2 b} \quad (7)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальное усилие в момент разрушения;  $l$  – расстояние между опорами;  $h$  и  $b$  – соответственно толщина и ширина пластины, используемой при испытаниях.

### **Оптимизация характеристик огнепреградителей на основе ППМ**

Наиболее перспективным способом получения ППМ с заданным порораспределением является способ вибрационного формования [2]. Получить заданное порораспределение данным способом можно путем правильного выбора размеров частиц их формы и параметров вибрации, которая позволяет обеспечить заданную тип укладки частиц, от которого зависит плотность их укладки. Кроме того, плотность укладки частиц зависит: от степени заполнения мелкими частицами пустот между крупными, образования и разрушения мостиков или арок при засыпке порошка форму, от гранулометрического состава порошка др.. Максимальная плотность укладки достигается при определенном гранулометрическом составе порошков (соотношении размеров и количества мелких и крупных частиц) и координационного числа укладки  $N_c$ . Для координационных чисел от 4 до 12 упорядочной укладки сферических частиц одного размера относительная плотность их упаковки определяется на основе расчетов элементарной

стереометрии, например максимальная плотность (0,7405) достигается при координационного числа укладки  $N_c=12$ .

Применение вибрации при формовании заготовок позволяет получить различный тип укладки частиц, а следовательно и разную плотность ППМ. В ГНУ «Институт порошковой металлургии» разработан технологический процесс получения огнепреградителей на основе металлических порошков методом вибрационного формования, который включает следующие основные операции:

- подготовку исходных металлических порошков (выбор требуемого гранулометрического состава порошка и контроль их технологических свойств);

- дозировку металлического порошка в форму, например, 20 % металлического порошка с размерами частиц 63–100 мкм, 20 % металлического порошка с размерами частиц 160–200 мкм и 60 % металлического порошка с размерами частиц 250–315 мкм по объему всей формы;

- формование заготовки пористого проницаемого материала путем наложения на форму с порошком вибрационных колебаний;

- спекание сформованных заготовок в защитной атмосфере.

- контроль геометрических размеров и эксплуатационных характеристик готовых изделий.

Для построения математической модели процесса получения огнепреградителей данным методом и установления зависимости между режимами процесса его получения и эксплуатационными характеристиками с целью определения оптимальных параметров технологического процесса их изготовления нами проведено математическое планирование эксперимента.

В качестве факторов оптимизации выбраны: размер частиц порошка; толщина слоя порошка заданного размера (процентное содержание порошка в объеме формы); количество слоев. Меняя вышеуказанные факторы можно получить практически любое заданное порораспределение по толщине пористого материала.

Пористость и размер пор каждого слоя можно регулировать, изменяя вид укладки частиц путем изменения параметров вибрации. На основании предварительных экспериментальных исследований определены параметры вибраций: частота вибрации 450–500 Гц, ускорение 19–21 м/с<sup>2</sup>, время осаждения 10–15 с.

Высота слоя задается количеством частиц порошка, укладываемых по высоте каждого слоя.

Задача исследований состоит в определении оптимального количества слоев, размеров частиц порошка данных слоев и толщины каждого слоя. На основании проведенных предварительных исследований определены интервалы варьирования факторов оптимизации, которые приведены в таблице 2

Таблица 2

Факторы оптимизации и пределы их варьирования

Фактор	Min	Max
Размер частиц (мкм)	40	315
Толщина слоя (количество частиц по высоте) (шт.)	3	6
Количество слоев (шт.)	3	6

Для шести факторов нами выбран план эксперимента по оценке регрессионных коэффициентов полинома второго порядка, содержащий до 40 экспериментальных точек план № 104 из [7].

На экспериментальных образцах, полученных в соответствии с планом эксперимента, определены следующие характеристики огнепреградителей:  $K_{\mu}$  – коэффициент проницаемости,  $\sigma_{из}$  – предел прочности при изгибе и  $d_n$  – средний размер пор.

В качестве математической модели процесса получения огнепреградителей на основе пористого материала методом вибрационного формования взято регрессионное уравнение в виде полинома 2-го порядка от факторов  $X_1 - X_6$ . В общем виде выбранная полиномиальная регрессионная модель может быть представлена в виде полинома второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i \bar{x}_i + \sum_{i=1}^6 b_{ij} \bar{x}_i \bar{x}_j, \quad (8)$$

где  $y$  – параметр оптимизации;  $b_0, b_i, b_{ij}$  – коэффициенты в уравнении регрессии.

Коэффициенты уравнения вычисляли по алгоритму шаговой регрессии методом исключения [8]. Статистическая значимость коэффициентов, включаемых в уравнение регрессии, оценивалась по критерию Фишера, критическое значение которого принималось равным 6. На основе полученных регрессионных зависимостей основных параметров, характеризующих эксплуатационные показатели огнепреградителей, решена задача поиска оптимальных значений факторов, управляющих формированием поровой структуры огнепреградителей.

Данная задача решалась в следующей постановке:

$$F_k(n_1, n_2, \dots, n_5, x_6) \rightarrow \max; \quad 0 \leq n_i \leq 6, \quad (9)$$

где  $F_k$  - регрессионные зависимости, описывающие зависимость эксплуатационных параметров от факторов  $n_1, n_2, \dots, n_5, x_6$ ;  $n_1, n_2, \dots, n_6$  - целочисленные значения количества частиц в соответствующем слое.

В математическом смысле задача относится к классу задач нелинейной целочисленной оптимизации, содержащая в каждом слое максимальное количество частиц металлического порошка

Микроструктура ППМ, оптимального по параметру  $K_\mu$ , показана на рисунке 1. На рисунке 2 представлены теоретически рассчитанное по разработанной модели и экспериментально определенное распределение пористости по толщине для 6-ти слойного огнепреградителя для  $\sigma_{изг}=60$  МПа.

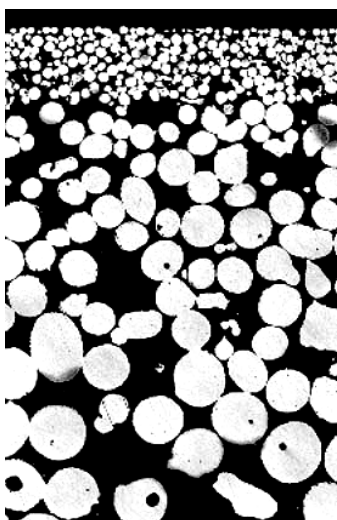


Рис. 1. Микроструктура материала огнепреградителей, оптимального по параметру  $K_\mu$  x 25

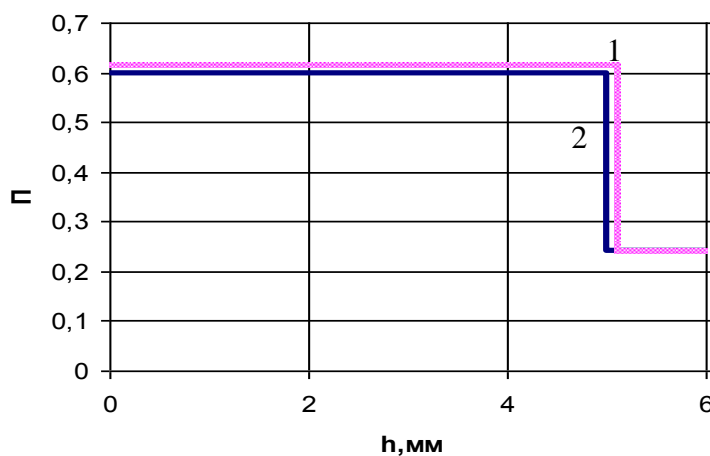


Рис. 2. Оптимальное распределение пористости по толщине огнепреградителя исходя из условия обеспечения максимальной проницаемости: 1 – рассчитанная теоретически; 2 – установленная экспериментально



Графики, показанные на рисунке 2, показывают хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана математическая модель процесса получения огнепреградителей на основе металлического порошка методом вибрационного формования, которая позволяет определить оптимальные режимы процесса получения огнепреградителей с заданными эксплуатационными свойствами.

Описанные выше преимущества огнепреградителей из ППМ с оптимальной поровой структурой по сравнению с другими пористыми материалами, используемыми для изготовления огнепреграждающих элементов (рулоны из гофрированных лент, гранулы и т.п.), позволили их широко использовать в промышленности для смеси «аммиак – кислород – водяной пар». Это связано с тем, что ППМ из металлических порошков с заданным порораспределением могут работать при повышенном давлении. Экспериментальная проверка таких огнепреградителей показала, что они обладают высокой способностью к пламегашению. Кроме того, структура материала дополнительно обеспечивает очистку от механических примесей и выравнивание параметров газового потока, что повышает степень конверсии аммиака и значительно сокращает количество выбросов оксидов азота в атмосферу.

По сравнению с традиционными технологиями получения ППМ (прессование в пресс-форме) огнепреградители из ППМ полученные методом вибрационного формования с параметрами, при которых достигается максимальная плотность укладки частиц порошка, имеют проницаемость в 1,2 раза выше при сохранении высокой механической прочности.

### Литература

1 Шибко, Ю.Н. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов/ Ю.Н.Шибко, В.Ю. Навценя, С.Н. Копылов [и др.]: Руководство. – Москва: ВНИИПО, 2002. – 72 с.

2 . Пилиневич, Л.П. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой для фильтрации жидкостей и газов/ Л.П. Пилиневич, В.В.Мазюк, М.В.Тумилович [и др.]; под ред. П.А. Витязя. – Мн.: Тонпик, 2005. – 252 с.

3 Pish, I. Фильтрация в зернистой пористой среде/ I Pish. – Vodni hosp Jap. – 1980. – N7. – p.30.

4 Kuvabary, H.D. Deep filtration of the suspension/ H.D. Kuvabary. – J.Phys.Soc.Jap. – 1959.- V.14. – p.527.

5 Huppe, F.K. Analysis of the edition of suspension filtration/ F.K.Huppe. – J.Am.Instr.Chem.Eng. – 1959. – V5. – p.174.

6 Каршиев, М. Разработка процесса получения порошковых проницаемых материалов методом многократного осаждения частиц в пористую заготовку: Дисс. ... канд. техн.наук / М. Каршиев. – Минск:БРНПО ПМ, 1991. –215 с.

7 Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: Справ. Изд./В.З. Бродский [и др.]. – Москва: Металлургия, 1982. – 752 с.

8 Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. Кн.1.Пер с англ. – 2-е изд., перераб. и доп./Н Драейпер, Г. Смит. – Москва: Финансы и статистика, 1987. – 321 с.