

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПОРОШКОВЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ:
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ
И ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Минск
БГАТУ
2018

УДК 621.762

Ильющенко, А. Ф. Порошковые фильтрующие материалы: управление структурой и свойствами и применение в сельском хозяйстве / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2018. – 188 с. : ил. – ISBN 978-985-519-953-4.

В монографии рассматриваются вопросы регулирования свойств порошковых фильтрующих материалов (ПФМ) и их внедрения в агропромышленном комплексе республики. Приведены сведения о ПФМ, технологиях их изготовления и свойствах, а также о предъявляемых к ним требованиях и моделировании пористого тела. Описаны технологии, обеспечивающие через управление структурой повышение свойств ПФМ, раскрыты области эффективного применения последних и представлены методы их регенерации.

Для научных и инженерных работников сельскохозяйственных предприятий, связанных с разработкой и практическим внедрением фильтрующих материалов; может быть полезна учащимся высших учебных заведений.

Табл. 24. Ил. 99. Библиогр. : 164 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 22 января 2018 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Технология металлов» БГАТУ *В. М. Капцевич*;
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Техническая эксплуатация автомобилей» БНТУ *В. С. Ивашко*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОРОШКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ (ПФМ).....	6
1.1. Основные характеристики ПФМ.....	7
1.2. Исходное сырье, технология изготовления и свойства ПФМ.....	21
Литература к главе 1.....	43
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ ПФМ	
2.1. Моделирование ПФМ.....	46
2.2. Перспективные способы повышения свойств ПФМ.....	74
2.2.1. Повышение равномерности порораспределения ПФМ гранулированием металлических порошков порообразователем.....	77
2.2.2. Повышение равномерности порораспределения ПФМ при заданном размере пор созданием двухслойных пористых структур.....	88
Литература к главе 2.....	121
3. ПРИМЕНЕНИЕ ПФМ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ	
3.1. Распределение газовых потоков.....	131
3.2. Очистка технических масел.....	138
3.3. Очистка воздуха, воды и водяного пара.....	149
3.4. Глушение шума.....	158
3.5. Огнепреграждение.....	160
3.6. Отделение дрожжевых клеток в процессе непрерывного сбраживания.....	162
Литература к главе 3.....	171
4. РЕГЕНЕРАЦИЯ ПФМ	
4.1. Классификация методов.....	174
4.2. Механическая регенерация.....	176
4.3. Химическая регенерация.....	184
4.4. Термическая регенерация.....	184
Литература к главе 4.....	185

ПРЕДИСЛОВИЕ

Порошковые фильтрующие материалы (ПФМ), основные эксплуатационные свойства которых обеспечиваются наличием разветвленной взаимосвязанной системы сквозных пор, являются особенностью порошковой металлургии. Несмотря на широкое распространение в технике полимерных, бумажных, керамических материалов, 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, 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.

Достижения, полученные в результате разработки новых ПФМ и их внедрения в народном хозяйстве, неразрывно связаны с именами Р. А. Андриевского, Г. И. Аксенова, В. Н. Анциферова, М. Ю. Бальшина, С. В. Белова, М. Н. Верещагина, П. А. Витязя, Я. Е. Гегузина, Г. М. Ждановича, Л. А. Исаевича, Ю. Г. Дорофеева, В. М. Капцевича, С. С. Клименкова, А. Г. Косторнова, О. В. Романа, В. В. Скорохода, С. М. Солонина, А. В. Степаненко, И. М. Федорченко, В. К. Шелега, Б. Ф. Шибряева и других ученых.

Порошковые фильтрующие материалы успешно применяются в агропромышленном комплексе для решения различных задач. В монографии приведены возможные области эффективного применения ПФМ. Наряду с этим в монографии приведены общие сведения, дающие представление об исходных материалах, технологиях изготовления и свойствах ПФМ, предъявляемых к ним основным требованиям и моделировании структуры пористого тела. Описаны технологии, разработанные при непосредственном

участии авторов, обеспечивающие через управление структурой повышение свойств ПФМ, и приведены методы их регенерации.

При написании монографии были использованы материалы диссертационных работ Д. И. Жегздриня, И. В. Закревского, А. Р. Кусина.

Авторы выражают признательность Министерству сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь за оказанную финансовую поддержку при издании монографии.

Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой «Технология металлов» БГАТУ В. М. Капцевичу, доценту кафедры «Моделирование и проектирование» БГАТУ М. М. Дечко и заведующему отделом вычислительной математики ГНУ «Институт математики НАН Беларуси» Г. Ф. Громыко за многолетнюю совместную работу и помощь при написании данной монографии.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОРОШКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ (ПФМ)

Порошковые фильтрующие материалы (ПФМ) являются одной из групп порошковых проницаемых материалов (ППМ), которые состоят из твердых частиц, находящихся во взаимном контакте и образующих систему непрерывных каналов между частицами. Эти каналы-поры обеспечивают такие свойства ПППМ, как проницаемость для газов или жидкостей, способность к капиллярному транспорту жидкостей под действием капиллярных сил и фильтрующую способность.

ППМ на металлической основе обладают рядом достоинств по сравнению с бумажными, стеклянными, керамическими, тканевыми и другими проницаемыми материалами. Они более прочны и устойчивы против коррозии, могут работать в широком диапазоне температур, подвергаются механической обработке и сварке, обладают высокой тепло- и электропроводностью, допускают многократную регенерацию.

Все ПППМ по характеру применения можно разделить на три группы: фильтрующие, капиллярно-пористые и материалы со специальными свойствами.

Процесс эксплуатации фильтрующих ПППМ характеризуется наличием избыточного давления, прикладываемого к газу или жидкости, в результате чего последние проходят по поровым каналам, очищаются, гомогенизируются, разделяются, смешиваются, распределяются (фильтры, смесители, глушители шума, аэраторы, огнепреградители и т. д.). Процесс эксплуатации капиллярно-пористых ПППМ характеризуется наличием капиллярного давления, возникающего на границе сред жидкость–газ–твердое тело, в результате чего жидкость перемещается по поровым каналам или удерживается в них (испарители, конденсаторы, капиллярные структуры тепловых труб, капиллярные насосы и т. д.).

К ПППМ со специальными свойствами отнесены материалы, процесс эксплуатации которых связан с взаимодействием поверхности пор с фазой, заранее введенной или пропускаемой по поровым каналам, что интенсифицирует физические, химические процессы взаимодействия этих фаз (пористые аноды, пластины аккумуляторных батарей, заменители костной ткани и т. д.).

Предметом рассмотрения данной работы является первая группа – ПФМ, которые условно можно разделить на фильтры и распределители газовых или жидкостных потоков.

1.1. Основные характеристики ПФМ

Основным назначением фильтров является очистка жидкостей или газов от посторонних примесей: жидкостей – от твердых частиц, газовых пузырьков и включений другой нерастворимой жидкости; газов – от твердых или жидких частиц. Отличительной их особенностью является осуществление фазоразделения в результате процесса фильтрования. Применение таких ПФМ позволяет повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность пневмо- и гидросистем различного назначения, обеспечить защиту окружающей среды и т. д. Фильтры используются для очистки воды, щелочных, кислотных и солевых растворов, горючесмазочных материалов, молока, смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров, фильтрации сжиженных и сжатых газов при их производстве и практическом применении, отходящих газов в технологических циклах химического, металлургического, цементного и других производств. В ряде случаев ПФМ позволяют улавливать дорогостоящие пылевидные катализаторы, используемые в технологических процессах химического и нефтехимического производства, что позволяет значительно удешевлять процесс.

Распределители потоков, представляющие вторую группу ПФМ, используются при пневмотранспорте сыпучих сред, аэрации жидкостей для их перемешивания или насыщения газами, в качестве элементов пористого охлаждения или нагрева, газораспределительных решеток для создания кипящего или псевдооживленного слоя, аэростатических или гидростатических подшипников, в которых отсутствует соприкосновение трущихся поверхностей, огнепреградителей для локализации распространения пламени, активных глушителей шума, катализаторов и т. д. Как правило, в процессе эксплуатации таких ПФМ не ставится задача разделения фаз.

Выбор химического состава ПФМ, как для фильтров, так и для распределителей потоков, определяется требуемой коррозионной

стойкостью. Наиболее часто на практике для изготовления ПФМ используются порошки оловянно-фосфористой бронзы марки БРОФ 10-1, титана, железа, коррозионно-стойкой стали, никеля.

Создание и разработка ПФМ невозможны без изучения их свойств и выявления взаимосвязи последних. Такую взаимосвязь свойств призвана установить их классификация, приведенная на рис. 1.1 [1].

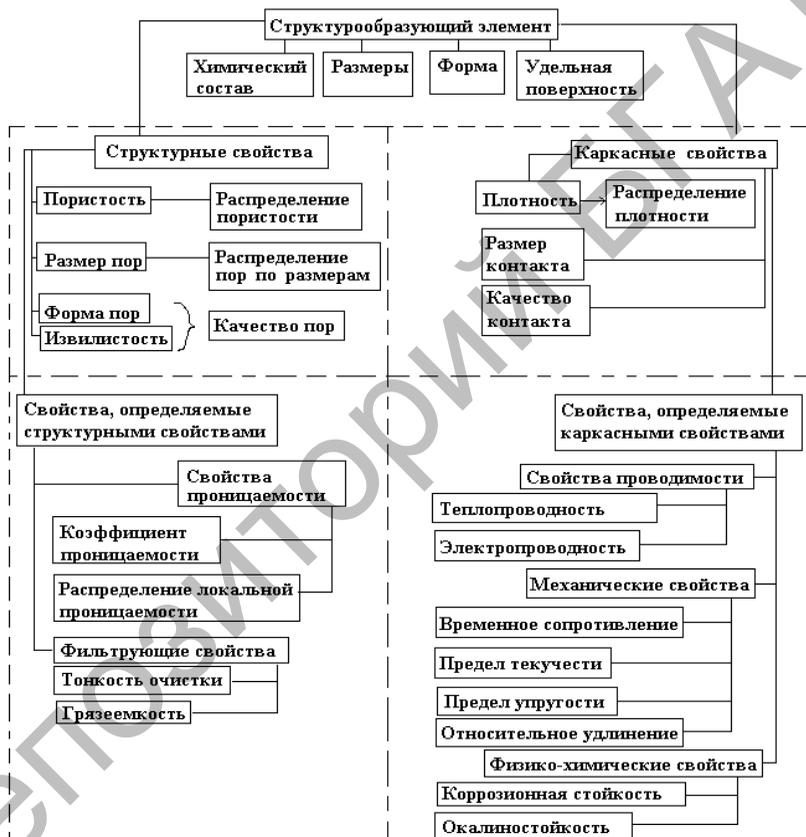


Рис. 1.1. Классификация свойств ПФМ

К основным характеристикам ПФМ относятся значения максимального и среднего размеров пор, распределение пор по размерам,

коэффициенты извилистости пор и регулярности пористой структуры, равномерность распределения свойств по поверхности фильтрации.

Максимальные размеры пор являются одной из важнейших характеристик ПФМ, так как определяют максимальный размер частиц загрязнителя, которые могут пройти через материал. Средние размеры пор обычно используют для сравнения различных ПФМ и проведения гидродинамических расчетов. Распределение пор по размерам дает представление о числе или объеме пор в ПФМ и является более полной характеристикой по сравнению с максимальными и средними размерами пор.

Наиболее распространенным методом определения максимального и среднего размеров пор является метод вытеснения жидкости из пор газом [2, 3]. Он основан на измерении давления, которое необходимо для прохождения пузырьков газа через пористый образец, поры которого заполнены смачивающей жидкостью с известным поверхностным натяжением. Если представить пористую среду содержащей цилиндрические капилляры одного радиуса, то в случае вытеснения жидкости из таких пор их размер определяется из соотношения

$$d = \frac{4\sigma \cos \theta}{\Delta P}, \quad (1.1)$$

где d – размер (диаметр) пор, м;
 σ – поверхностное натяжение, Н/м;
 θ – краевой угол смачивания, град.;
 ΔP – перепад давления на капилляре, Па.

Схема установки для определения размеров пор приведена на рис. 1.2.

Указанный способ применяют для определения пор размером от 1 до 250 мкм. Нижний предел ограничен ростом необходимого давления газа под образцом $>3 \dots 4$ МПа, а верхний предел – невозможностью заполнения пор жидкостью, так как капиллярные силы, удерживающие жидкость в порах, становятся сравнимыми с силами тяжести.

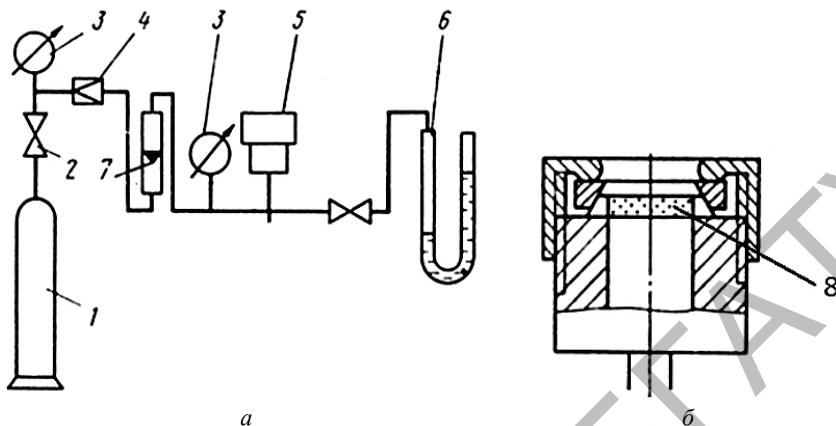


Рис. 1.2. Схема установки для определения размеров пор и проницаемости ПФМ (а) и патрон с образцом в разрезе (б):
 1 – источник избыточного давления; 2 – кран; 3 – манометр;
 4 – редуктор; 5 – патрон с образцом; 6 – U-образный манометр;
 7 – расходомер; 8 – образец

Распределение пор по размерам может быть получено несколькими методами. Одним из них является метод ртутной порометрии. Ртутная порометрия, основанная на капиллярных явлениях, используется для изучения распределения пор по размерам вдавливанием ртути в поры. Жидкая ртуть не смачивает большинство материалов и практически не взаимодействует с ними. Каждому давлению соответствует определенный объем ртути, вдавненный в поры определенного радиуса. Повышая давление и одновременно измеряя объем ртути, вдавненной в поры, можно построить интегральную и дифференциальную кривые распределения удельного объема и количества пор по их диаметрам, определить пористость и удельную поверхность [2, 4]. При этом, используя метод Ревербери [5, 6], можно определять объемы пор в пористом материале, заполняемые через поры меньших объемов. К недостаткам метода следует отнести необходимость работы с вредным веществом – ртутью.

Последнего недостатка лишен метод, основанный на вытеснении жидкости из пористого тела по принципу работы, заложенного в водяных порозиметрах.

Компрессионный жидкостный экструзионный порозиметр компании Porous Materials, Inc обладает способностью измерять объем и размеры пор образца [7]. Прибор используется для исследования пористости материалов во многих отраслях промышленности: биотехнология, фармацевтика, пищевая промышленность, экология. Абсолютно безопасен, не использует ртуть или любые другие вредные вещества. В камере для образцов исследуемое вещество помещается на мембрану (рис. 1.3).

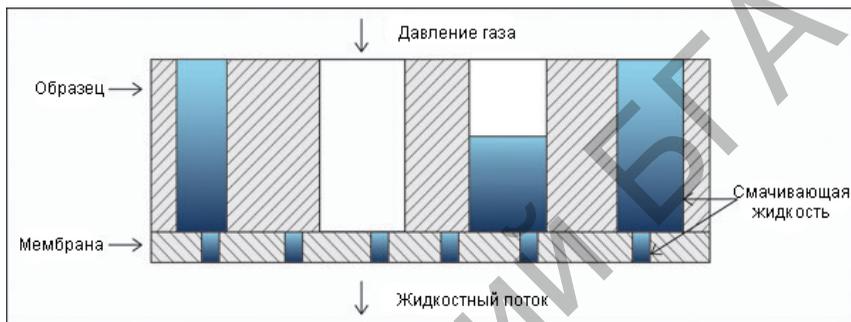


Рис. 1.3. Схема процесса измерения

Мембрана подбирается с расчетом, чтобы ее наибольшая пора была меньше самой маленькой поры исследуемого образца. Поры образца и мембрана заполняются смачивающей жидкостью. Нерагирующий газ подают под нарастающим давлением, которое и вытесняет жидкость из образца. Дифференциальное давление, требуемое для вытеснения жидкости из пор, соотносится с диаметром поры, поверхностным натяжением жидкости, краевым углом смачивания в соответствии с выражением (1.1). Давление газа позволяет получить диаметр пор, объем жидкости дает объем пор.

Важной характеристикой, определяющей структуру ПФМ, является коэффициент извилистости пор ξ , определяемый как отношение средней длины порового канала h_{Π} к толщине пористого материала $h / \xi = h_{\Pi} / h$ [8].

Теоретически показано, что для пористой среды, состоящей из одинаковых сферических частиц, коэффициент извилистости изменяется от 1,305 до 1,000 при изменении соответственно пористости

от 0,259 до 0,476. Для реальных ПФМ величина ξ почти всегда больше теоретически найденных значений. Это объясняется дисперсностью порошков, отклонением формы частиц от сферической, наличием шероховатостей на поверхности частиц [8].

Как правило, величину коэффициента извилистости пор оценивают по результатам исследований проницаемости ПФМ и определения среднего размера пор методами вытеснения жидкости из пор или ртутной порометрии.

В этом случае

$$\xi = D_{\text{п}} / D_{\text{пг}}, \quad (1.2)$$

где $D_{\text{п}}$ – размер пор, определенный методами вытеснения жидкости из пор или ртутной порометрии, м;

$D_{\text{пг}}$ – размер пор, определяемый совместным решением уравнения Дарси и Гагена–Пуазейля, м.

Экспериментально установлено, что коэффициент извилистости пор для ПФМ равен 1,0...1,5 при пористости от 0,84 до 0,26. Значениям пористости 0,3...0,4 соответствует $\xi = 1,0...1,2$ [9].

Понятие нерегулярности пористой структуры было введено А. Г. Косторновым по отношению к тонким слоям ПФМ [10–14]. Использование данной характеристики для пористых материалов связано с тем, что измерение структурных свойств (пористость, средний и максимальный размеры пор) тонкого слоя пористого материала дает результаты, отличные от аналогичных для большого объема пористого материала, изготовленного из того же исходного порошка при тех же технологических параметрах. Схематичное представление регулярной и нерегулярной пористых структур приведено на рис. 1.4 [12].

В области регулярной структуры I (достаточно большие толщины) пористый материал характеризуется вполне определенным («равновесным») максимальным размером пор. При уменьшении толщины слоя пористого материала происходит смещение в область нерегулярной структуры, где измеренный максимальный размер пор (а также средний размер пор и пористость) оказываются большими по сравнению с регулярной областью.

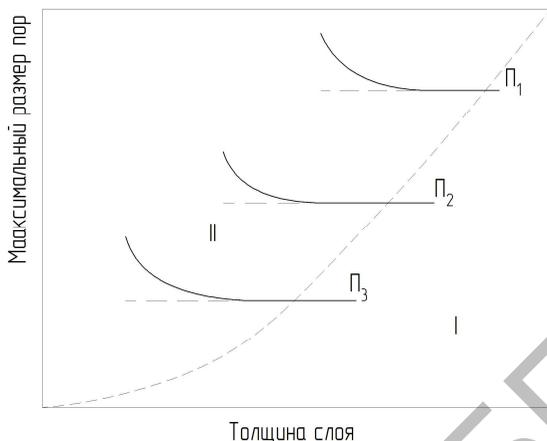


Рис. 1.4. Схема областей регулярности (I) и нерегулярности (II) пористой структуры порошкового материала при различных значениях пористости Π ($\Pi_1 > \Pi_2 > \Pi_3$)

Для количественной характеристики нерегулярности пористой структуры используется коэффициент регулярности [10, 11]:

$$C = D_{\max}^{\text{равн}} / D_{\max}, \quad (1.3)$$

где $D_{\max}^{\text{равн}}$ – равновесный максимальный диаметр пор в ПФМ при толщине образца больше критической, м;

D_{\max} – текущее значение максимального диаметра пор, м.

Максимальное значение коэффициента регулярности равно единице при структуре материалов, соответствующей области I. В области II значение коэффициента регулярности C меньше единицы, и чем оно меньше, тем более нерегулярной является пористая структура.

Проницаемость – это свойство пористого материала пропускать через себя жидкость или газ под действием приложенного градиента давления. Оно характеризуется количеством жидкости или газа, прошедшего в единицу времени через единицу поверхности фильтрующей перегородки определенной толщины при фиксированном

перепаде давления. Проницаемость по отношению к газам называется газопроницаемостью (например, воздухопроницаемость), маслу – маслопроницаемостью и т. д. Эта характеристика зависит от геометрии порового пространства и режимов течения жидкости или газа. Проницаемость увеличивается с возрастанием пористости, размеров пор, перепада давления и уменьшается с увеличением толщины фильтрующей перегородки, вязкости фильтра [9].

В ряде случаев вместо проницаемости используется параметр, называемый производительностью, характеризующий количество жидкости или газа, прошедшего в единицу времени [9].

Недостатками указанных параметров являются их зависимость от геометрических размеров и формы пористых материалов, а также рода фильтруемой жидкости или газа. Эти недостатки устраняются при использовании абсолютного коэффициента проницаемости k , имеющего размерность площади и определяемого из закона Дарси [9]:

$$Q = \frac{k \Delta p}{\mu h} S, \quad (1.4)$$

где Q – объем жидкости или газа, прошедшего через ПФМ за единицу времени, м³/с;

Δp – перепад давления на ПФМ, Па;

μ – коэффициент динамической вязкости фильтруемой среды, Па·с;

h – толщина ПФМ, м;

S – площадь фильтрации, м².

Экспериментально проницаемость оценивают на установке, схема которой была приведена на рис. 1.2.

Коэффициент проницаемости при ламинарном движении и отсутствии явлений взаимодействия между каркасом и фильтруемой средой не должен зависеть от характера жидкости или газа. Однако на практике такое отличие наблюдается довольно часто и объясняется образованием областей застойных жидкостей, не участвующих в общем течении при фильтрации вязкой жидкости, существенным вкладом простеночного скольжения в поровых каналах и молекулярного течения, наличием в жидкости газовых пузырей и т. п.

Закон Дарси справедлив лишь для ламинарного течения газа или жидкости. В общем случае процесс фильтрации описывается двумя членными уравнениями следующего вида [9]:

$$\frac{\Delta p}{h} = \frac{\mu}{k_{\mu}} \frac{Q}{S} + \frac{\rho}{k_p} \left(\frac{Q}{S} \right)^2, \quad (1.5)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

k_{μ} и k_p – соответственно вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости, м².

Для газа

$$\frac{\rho_{\text{вх}}^2 - \rho_{\text{вых}}^2}{2RTh} = \frac{\mu}{k_{\mu}} j + \frac{1}{k_p} j^2, \quad (1.6)$$

где $p_{\text{вх}}$ и $p_{\text{вых}}$ – соответственно давление на входе и выходе из ПФМ, Па;

R – газовая постоянная, Дж/моль·К;

T – средняя температура газа в порах, К;

$j = pQ / S$.

Процесс очистки жидкости от загрязнений при ее прохождении через ПФМ характеризуется качественно тонкостью фильтрования. В общем случае тонкость фильтрования определяется такими показателями, как абсолютная и номинальная тонкость фильтрования, а также коэффициентами отфильтровывания и полнотой фильтрования.

Абсолютная тонкость фильтрования определяется как максимальный размер частиц загрязнителя, прошедших через ПФМ [9].

Тонкость фильтрования численно равна минимальному размеру частиц, прошедших через ПФМ с заранее установленным коэффициентом отфильтровывания ψ_i . Как правило, $\psi_i \geq 0,97$. В свою очередь, коэффициент отфильтровывания ψ_i характеризует снижение содержания в рабочей жидкости количества частиц загрязнителя

определенного размера при однократном пропускании ее через ПФМ [9]:

$$\psi_i = 1 - N_{2i} / N_{1i}, \quad (1.7)$$

где N_{2i} , N_{1i} – количество частиц i -го размера, содержащихся соответственно в единице объема суспензии и фильтрата, шт./м³.

Коэффициент полноты фильтрования ϕ характеризует уменьшение массы загрязнений в рабочей жидкости при однократном ее пропускании через ПФМ.

Согласно [9, 15] тонкость фильтрования связана с максимальным размером пор соотношением

$$d_{\text{п. макс}} / \alpha = 2 \dots 4, \quad (1.8)$$

где $d_{\text{п. макс}}$ – максимальный размер пор, мкм;
 α – тонкость фильтрования, мкм.

Для пористых материалов, изготовленных из порошков со сферической формой частиц, это отношение близко к 2 и практически не зависит от размера частиц. Для пористых материалов, полученных из порошков с произвольной формой частиц, отношение максимального размера пор к тонкости фильтрования изменяется от 2 до 4 в зависимости от формы и размера частиц [9, 15].

На рис. 1.5 приведена схема установки для определения характеристик фильтрования. Как правило, для исследований используется искусственный загрязнитель, который должен удовлетворять следующим требованиям: частицы должны быть однородны по химическому составу, иметь сферическую форму, должны хорошо смачиваться и равномерно распределяться по объему фильтруемой жидкости, образовывать в ней устойчивые суспензии, распределение частиц по размерам должно быть близким к нормальному. Следует отметить, что при использовании в качестве дисперсионной жидкости дистиллированной воды этим требованиям удовлетворяют такие загрязнители, как

порошки алюминия, оксида алюминия, кварцевой пыли, корунда, олова, стеклянные шарики [2].

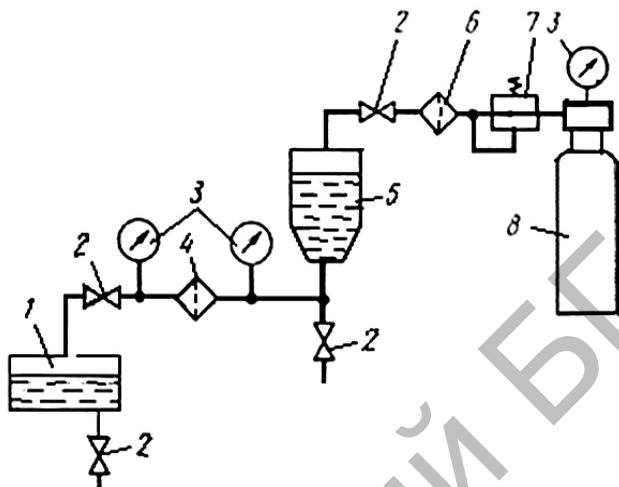


Рис 1.5. Схема установки для определения тонкости фильтрования:
1 – емкость для отфильтрованного масла; 2 – краны; 3 – манометр;
4 – испытуемый фильтр; 5 – емкость для загрязненного масла;
6 – фильтр для очистки воздуха; 7 – регулятор давления;
8 – баллон с воздухом

Анализ размеров частиц, присутствующих в суспензии (как исходной, так и фильтрате), позволяет производить разработанная в БГАТУ методика с помощью компьютерного микроскопа, изготовленного ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс» (Республика Беларусь) на базе микроскопа Микмед-6, предназначенного для исследования объектов в проходящем свете (рис. 1.6).

Микроскоп был дооснащен цифровой видеокамерой типа DCM 320, работающей совместно с персональным компьютером. Кроме того, он был дооснащен спектральным осветителем высокого контраста типа ОС-16 ЦОМ с устройством управления режимами осветителя. Осветитель позволяет подсвечивать объекты в видимом спектре, обеспечивая высокую равномерность (6 %) поля подсветки. Конструкция осветителя (освещение микрообъекта) исключает посторонние засветки (блики), что значительно улучшает

качество воспроизводимого изображения. Компьютерный микроскоп имеет высокую разрешающую способность и контрастную чувствительность: позволяет наблюдать слабоконтрастные микрообъекты на дисплее с увеличением до 3000 раз (разрешение не хуже 300 нм) и с контрастом воспроизводимого изображения не менее 80:1.

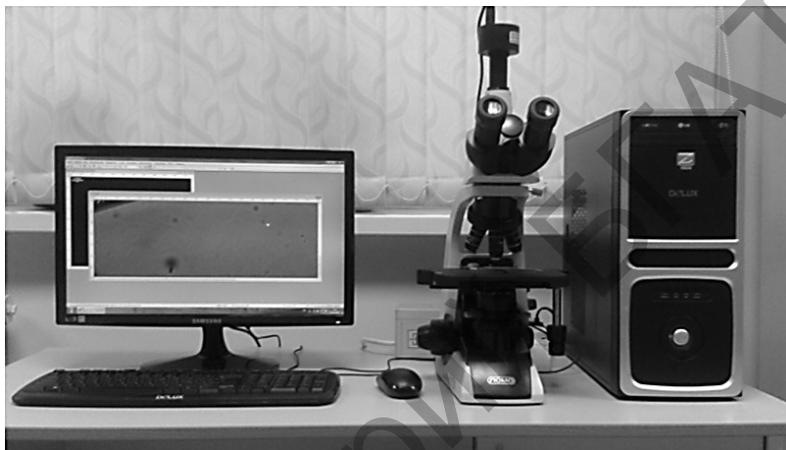


Рис. 1.6. Компьютерный микроскоп на базе микроскопа Микмед-6

Измерения структурных параметров суспензий осуществляются на копиях микроизображений, предварительно сохраненных в базе данных компьютерного микроскопа. Для определения размеров отдельных структурных элементов (частиц) или расстояний между ними на микроизображения наносятся измерительные линии, которые пересекают эти элементы в выбранных направлениях или соединяют их между собой. При этом автоматически фиксируются значения измеряемых размеров или расстояний. Для измерения площади отдельных структурных элементов (частиц) на микроизображения наносятся измерительные контуры этих элементов. При этом также автоматически фиксируются значения измеряемых площадей.

В ГНУ «Институт порошковой металлургии» задерживающую способность (тонкость очистки) ПФМ определяют путем анализа суспензии, пропущенной через фильтроэлемент, с помощью лазерного

анализатора гранулометрического состава Malvern Mastersizer 2000 с автоматическим модулем диспергирования и подачи образца Hydro S, позволяющего непосредственно измерять размеры включений в фильтрате.

Важной характеристикой ПФМ является равномерность распределения свойств по рабочей поверхности, которая наиболее точно оценивается путем определения равномерности распределения коэффициента локальной проницаемости по площади фильтрации [16]. Предложенное в [16] устройство для определения локальной проницаемости включает измерительную головку и измеритель расхода. Измерительная головка состоит из металлической трубки, плотно вставленной в полихлорвиниловую оболочку, обеспечивающую герметизацию границы трубки и поверхности образца в месте измерения. Поток воздуха, проходя через локальный участок образца, попадает в трубку и измеритель расхода. Зная перепад давления на образце и расход воздуха можно рассчитать коэффициент локальной проницаемости. При сканировании измерительной головкой поверхности образца определяется ряд значений коэффициента локальной проницаемости, по полученным значениям которого определяется среднее значение, среднее квадратичное отклонение от среднего значения и коэффициент вариации, равный их отношению. По величине коэффициента вариации судят о степени равномерности распределения исследуемой величины: чем он меньше, тем равномерность выше. Пороговым принято считать значение этого коэффициента, равное 0,2.

Методику можно упростить, пропуская воздух через трубку на образец. В этом случае воздух поступает только на локальный участок, а не на весь образец, при этом отсутствует необходимость в оснастке для герметичного крепления образца.

В процессе эксплуатации изделия из ПФМ подвергаются определенным механическим нагрузкам. Поэтому, несмотря на то, что основными характеристиками ПФМ, определяющими эффективность их использования в процессе эксплуатации, являются проницаемость, размеры пор, равномерность распределения свойств, фильтрующие материалы должны обладать достаточной механической прочностью.

При проведении научных исследований наиболее широкое распространение получили испытания ПФМ на растяжение в соответствии с ГОСТ 18227–85. В этом случае используют плоские образцы заданной формы и размеров. Для измерения величины деформации по всей рабочей части образца через каждые 5 мм наносят риски. В результате испытаний определяют временное сопротивление $\sigma_{в}$, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и относительное сужение ψ . Для предотвращения разрыва образцов в местах их крепления эти участки образца усиливают дополнительной пропиткой эпоксидной смолой.

Прочность при изгибе определяют на плоских образцах с использованием специального приспособления, включающего гибочный пуансон и опорную плиту с гибочными опорами. Величину предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ определяют из выражения

$$\sigma_{изг} = \frac{3Pl}{2ba^2}, \quad (1.9)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;
 l – расстояние между опорами, м;
 a и b – толщина и ширина образца, м.

На практике для оценки механической прочности удобно использовать предел прочности при срезе [9, 17, 18]. Эта характеристика имеет преимущество: может определяться не на образцах-свидетелях, а непосредственно на исследуемых образцах после определения остальных свойств и хорошо коррелирует с другими механическими характеристиками. На рис. 1.7 приведена оснастка для испытания ПФМ на срез.

Предел прочности при срезе $\sigma_{ср}$ рассчитывается по формуле

$$\sigma_{ср} = \frac{P}{\pi Dh}, \quad (1.10)$$

где P – усилие среза;
 D – диаметр срезаемой поверхности;
 h – толщина исследуемого образца.

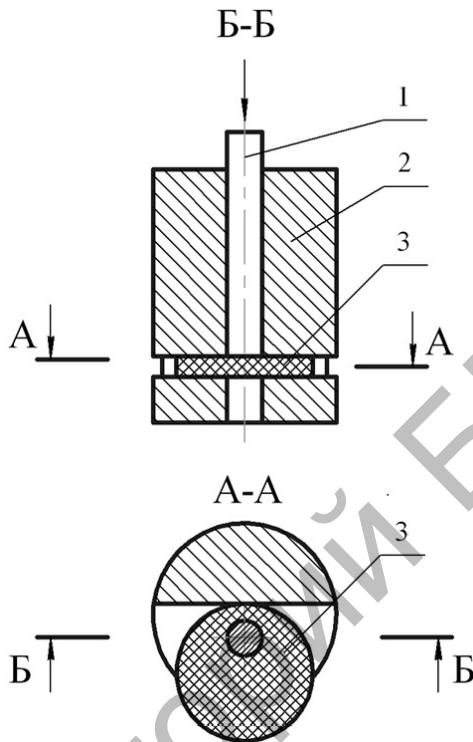


Рис. 1.7. Схема оснастки для определения номинального усилия среза образцов ПФМ:
 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – исследуемый образец

1.2. Исходное сырье, технология изготовления и свойства ПФМ

Процесс получения металлических порошков является исходным в технологии изготовления ПФМ и изделий из них. Свойства металлических порошков зависят от способов их получения и от природы соответствующих металлов. Методами порошковой металлургии в настоящее время изготавливают ПФМ из порошков меди, бронзы, латуни, железа, коррозионно-стойких сталей, никеля и его сплавов, титана, алюминия, вольфрама, молибдена, ниобия и др. Следует отметить, что в последнее десятилетие потребители

приобретали фильтрующие элементы, как правило, из порошков бронзы, титана, коррозионно-стойкой стали, никеля.

Основные способы получения металлических порошков можно разделить на две группы: физико-химические и технологические.

Механические методы получения порошков – это технологические процессы, в которых исходный материал в результате воздействия внешних сил измельчается без существенного изменения химического состава. Их можно разделить на дробление и размол, распыление расплавленного металла [19–23].

Наибольшее распространение в настоящее время получило распыление расплавов сжатым газом благодаря своей высокой производительности и относительно малым затратам на организацию производства. Основными технологическими параметрами распыления являются давление и температура газового потока, температура расплава. По этому методу разрушение металла происходит за счет кинетической энергии сжатого газа (воздуха, азота, аргона и др.), направленного под некоторым углом к струе жидкого металла.

Этим методом округлые или сферические частицы порошка получают в том случае, когда силы поверхностного натяжения успевают придать каплям и брызгам шарообразную форму до их затвердевания. В связи с этим крупные распыленные порошки, как правило, менее сферичны, чем мелкие. Образованию частиц со сферической формой способствует также некоторый перегрев металла (на 150...200°C выше точки плавления), обеспечивающий пребывание капли в жидком состоянии до тех пор, пока она не превратится в сферическую. Например в [20], для получения порошка бронзы марки БрОФ-10-1 (ТУ 26-130-76) готовый по химическому составу расплав, перегретый на 100...150 °С, сливают в металлоприемник, предварительно подогретый газовыми горелками до 800 °С, процесс диспергирования струи расплава проводят воздушным потоком с дозвуковой скоростью. Давление газа при этом $\geq 0,3$ МПа, его расход равен 0,3...0,4 м³ на 1 кг расплава, а диаметр струи расплава составляет 5...6 мм. После диспергирования, охлаждения в воде и сушки порошок содержит более 80 % частиц размером >63 мкм.

Отдельно остановимся на разработанной в ГНУ «Институт порошковой металлургии» малогабаритной установке для исследования

процессов получения и производства порошков на основе меди и алюминия (рис. 1.8).

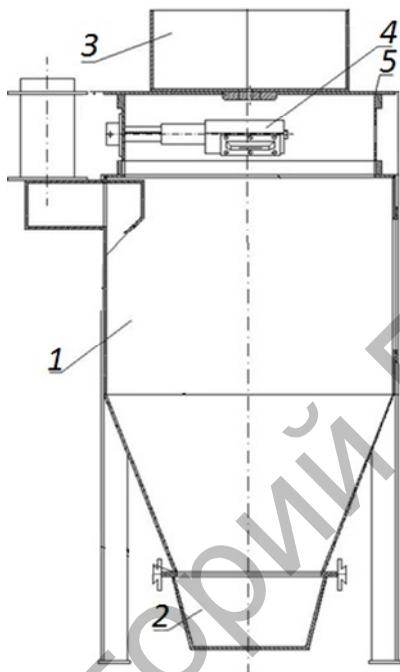


Рис. 1.8. Установка для получения металлических порошков распылением расплава металла воздухом

Перед началом работы устанавливается заданный угол наклона форсунок 4 распылительной головки, затем корпус закрывается крышкой 5, на которую устанавливается металлоприемник 3. К корпусу 1 установки герметично крепится поддон 2. После проверки герметичности корпуса установки она заполняется водой до заданного уровня. После подготовки установки к работе за 3...4 секунды до подачи расплава в распылительную головку подается воздух, затем перегретый расплав заливается в металлоприемник. По истечении расплава подача воздуха в распылительную головку прекращается. Через 3...5 минут после распыления вода из корпуса установки сливается, поддон с влажным металлическим порошком

снимается, после чего производится сушка металлического порошка в сушильном шкафу.

Установка позволяет получать порошки различных фракций. Варьируя давлением воздуха при распылении и углом наклона форсунок, можно регулировать до определенной степени выход заданной фракции порошка. Как показали исследования, выход годного порошка составляет 95 %. В зависимости от режимов распыления выход распыленного порошка крупных фракций при использовании щелевых форсунок составляет 5...35 %, а фракций с размером частиц меньше 0,16 мм – до 5 %. На рис. 1.9 представлены диаграммы распределения частиц по размерам получаемых на данной установке порошков оловянно-фосфористой бронзы.

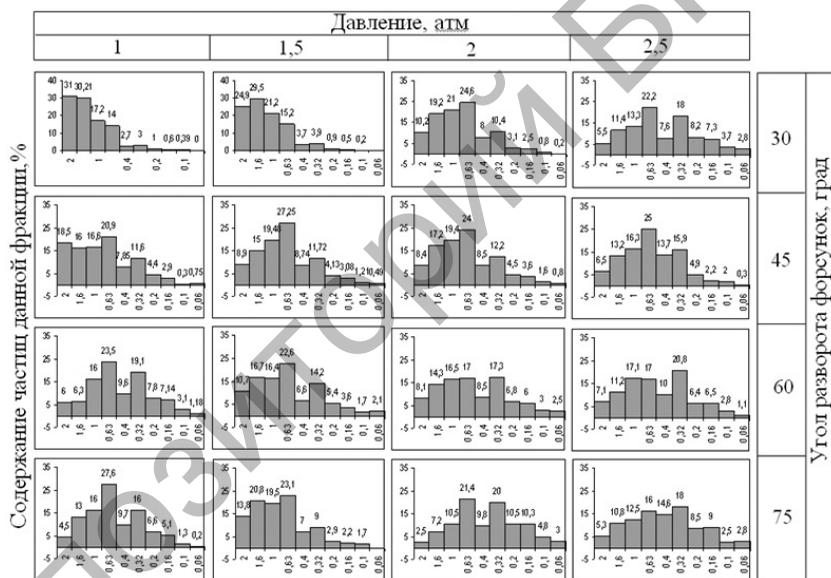


Рис. 1.9. Диаграммы распределения частиц порошка по размерам

При применении этих порошков для изготовления пористых изделий такое распределение допустимо и практически весь порошок без переплава может быть использован на производстве. В то же время простота и экономичность нанесения покрытий методом газопламенного напыления при упрочнении новых и восстановлении

изношенных поверхностей, а также при защите от коррозии деталей различного функционального назначения делают привлекательным использование этого метода на производственных участках аграрного сектора, специализирующихся на ремонте и обслуживании сельскохозяйственной техники. Для реализации этого метода достаточно иметь в наличии оборудование для газопламенного напыления порошков, состоящее из аппарата-распылителя и пульта управления газами, и порошковые материалы для нанесения покрытий. Однако, для нанесения покрытий газотермическим и газодинамическим способом на изношенные поверхности или с целью их защиты от коррозии, требуются порошки с размерами частиц менее 125 мкм, что приводит к переплаву порошка с крупными частицами и, соответственно, к значительным дополнительным энергетическим затратам. В этой связи был разработан специализированный узел распыления с комплектом съемных форсунок.

Известно, что основными факторами, определяющими дисперсность порошка, являются вязкость, поверхностное натяжение расплава и энергия газового потока. Вязкость расплава регулируется химическим составом сплава и температурой расплава, поверхностное натяжение расплава – диаметром истекающей струи расплава. Для получения порошков с частицами менее 125 мкм было решено увеличить относительную скорость потока газа. Для решения этой задачи на основе сопла Лавалья была разработана новая конструкция форсунки для распыления расплава металла воздухом. Комплект съемных форсунок позволяет менять угол атаки газа в широком диапазоне и изменять площадь их сечения.

При использовании специализированного узла распыления для получения распыленных сферических порошков оловянно-фосфористой бронзы, выход годного порошка фракций менее 125 мкм составил более 80 %. На рис. 1.10 представлен внешний вид частиц изготовленного порошка указанного гранулометрического состава. Аналогичные результаты были получены и при исследовании процесса получения порошков алюминия с той разницей, что распыление осуществляли аргоном, а не воздухом, а выход порошков фракции минус 125 мкм не превысил 60 %. Свойства порошков оловянно-фосфористой бронзы приведены в табл. 1.1, насыпная плотность порошков алюминия – в табл. 1.2.

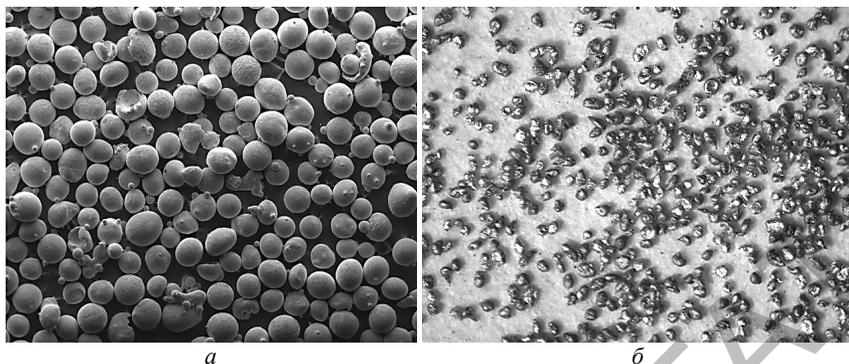


Рис. 1.10. Порошки оловянно-фосфористой бронзы (а) и алюминия (б) с размером частиц менее 125 мкм

Таблица 1.1

Свойства порошков оловянно-фосфористой бронзы

Фракция, мм	Насыпная плотность, γ , г/см ³	Текучесть, τ , сек	Плотность утряски, г/см ³	Фактор сферичности
(минус 1,0+0,63)	4,05	3	4,42	0,95
(минус 0,63+0,4)	4,96	3	5,30	0,95
(минус 0,4+0,2)	5,00	3	5,37	0,95
(минус 0,2+0,16)	5,22	3	5,70	0,95
(минус 0,16+0,1)	5,22	3	5,70	0,95
(минус 0,1+0,063)	5,32	3	5,80	0,95

Таблица 1.2

Значения насыпной плотности алюминиевых порошков

Фракция порошка, мм	(минус 1,0 +0,63)	(минус 0,63 +0,4)	(минус 0,4 +0,315)	(минус 0,315 +0,2)	(минус 0,2 +0,1)
Насыпная плотность, г/см ³	1,07	1,08	1,09	1,13	1,15

Следует отметить, что на данной установке могут быть изготовлены порошки сплавов на основе меди и алюминия других составов, используемых, например, для восстановления и упрочнения поверхностей шеек коленчатых валов, «посадок» под подшипники качения, внутренних поверхностей подшипников скольжения (при условии, что длина покрытия не превышает диаметр отверстия); поверхностей валов коробок передач, шеек распределителей, ступиц колес и др.

Изготовленные порошки оловянно-фосфористой бронзы и алюминия с размером частиц менее 125 мкм были напылены на стальные подложки методом высокоскоростного газопламенного напыления аппаратом отечественного производства ТЕНА-Ппм (рис. 1.11) с использованием в качестве горючего синтетического газа метилацетиленаленовой фракции (МАФ).



Рис. 1.11. Камера полу-автоматического напыления ТЕНА-КПАН-1300 с установкой газопламенного напыления ТЕНА-Ппм

Микроструктуры покрытий приведены на рис. 1.12.

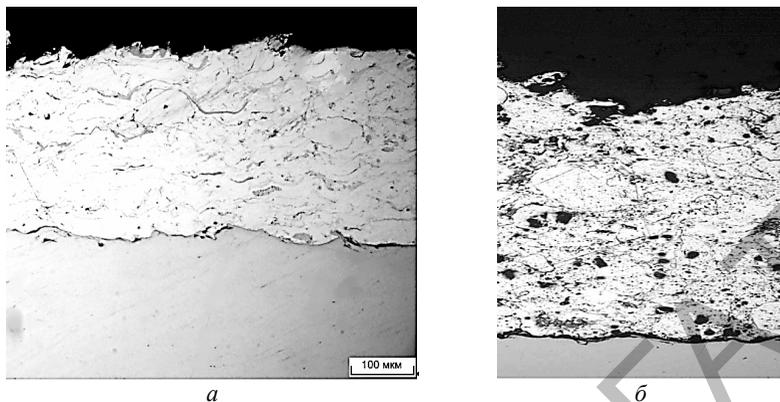


Рис. 1.12. Микроструктуры напыленных покрытий из порошков оловянно-фосфористой бронзы (*а*) и алюминия (*б*), нанесенных на стальные пластины

Анализ микроструктур полученных покрытий позволяет сделать вывод о высоком качестве напыленных покрытий: общая пористость в нанесенном слое гораздо ниже допустимых 2 %.

К преимуществам методов распыления следует отнести простоту управления процессом и возможность его автоматизации, высокую производительность, получение порошков заданного химического состава с требуемыми размерами и формой частиц, воспроизводимость химического состава и структуры порошков, которые характеризуются высокой степенью гомогенности.

Физико-химические методы – это технологические процессы, при использовании которых получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья в результате глубоких физико-химических превращений. При этом конечный продукт (порошок), как правило, отличается от исходного материала по химическому составу. Существуют методы получения порошков восстановлением оксидов или солей, электролизом водных растворов и расплавленных солей, диссоциацией карбониллов. Имеется ряд других способов получения порошков физико-химическими методами, но они не являются промышленными и представляют в настоящее время интерес только для лабораторных исследований.

Восстановлением различных химических соединений могут быть получены практически все металлы.

Восстановителем может быть только то вещество, которое при температуре реакции обладает более высоким химическим средством к кислороду, хлору, фтору или другим элементам, входящим в состав восстанавливаемого соединения. От химического средства восстановителя, с одной стороны, и восстанавливаемого металла к элементу, с другой, будут зависеть интенсивность и полнота реакции восстановления.

В качестве восстановителя при производстве порошков высоколегированных сталей и сплавов (ПХ12Н2, ПХ18Н15, ПХ23Н18, ПХ18Н9Т, ПХ18Н12М2Т, ПХ20Н80 и др.) используют гидрид кальция. Гранулометрический состав получаемых этим методом порошков можно регулировать [24] изменением величины избытка восстановителя: дополнительной специальной добавкой в шихту CaO , NaCl , CaCl_2 ; добавкой в шихту порошка получаемого материала (до 10 %); изменением соотношения в шихте между металлами и восстанавливаемыми оксидами. Увеличение (по массе) количества оксидов в шихте, как правило, приводит к получению мелкозернистых порошков. С увеличением содержания оксида кальция размеры частиц порошка уменьшаются. Увеличение содержания хлористого натрия, наоборот, вызывает укрупнение частиц.

Исходным сырьем для производства титана металлотермическим восстановлением служит четыреххлористый титан (TiCl_4), а восстановителем – магний или натрий. В случае восстановления магнием в начальный момент после подачи TiCl_4 в реактор, содержащий расплавленный металл-восстановитель, в газовой фазе образуются частицы металлического титана диаметром ~50 нм. Эти частицы, а также образовавшийся хлористый магний оседают на поверхности расплава и удерживаются на ней благодаря силам поверхностного натяжения. Реакция восстановления теперь протекает в основном на активных центрах частиц металлического титана, что ведет к их росту и превращению в агрегаты, которые опускаются на дно реактора. Так как температура процесса (850...870 °С) превышает температуру, при которой начинается заметное протекание процессов диффузии (500...600 °С), опустившиеся частицы спекаются в губчатый блок. Для снижения температуры процесса в реактор вводят хлориды натрия или калия, образующие в реакторе легкоплавкие системы, или ведут восстановление смесью магния или натрия. Полученный губчатый титан очищают и измельчают.

Независимо от типа восстановителя порошки получают дендритными с сильно развитой поверхностью. Такие порошки хорошо прессуются и спекаются.

Электролитический способ получения порошков заключается в разложении водных растворов металлических соединений или расплавов солей при пропускании через них постоянного электрического тока.

Порошок никеля получают электролизом из раствора сернокислой никелевой соли. Состав ванны, г/л: Ni 15...25 ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); NH_4Cl 40; NaCl 50...80. Процесс осуществляют в следующих условиях: pH = 6,5...7,2; температура 20...30 °С; плотность тока 1000...5000 А/м²; напряжение на ванне 7...12 В; анод – графит; катоды охлаждаемые [25].

Электролитические порошки отличаются большой чистотой, а также хорошей прессуемостью и спекаемостью.

Процесс получения металлического порошка никеля карбонильным способом включает два этапа. На первом этапе исходное сырье, содержащее металл, взаимодействует с оксидом углерода, образуя карбонил. На втором этапе карбонил подвергается термической диссоциации с выделением чистого металла и оксида углерода. Этим способом изготавливают очень чистые мелкодисперсные порошки со сферической формой частиц.

Характеристики ПФМ определяются свойствами порошков, которые в свою очередь во многом зависят от способов их получения. Основные свойства металлических порошков условно подразделяют на две группы: физико-химические и технологические.

К первой группе относятся дисперсность и гранулометрический состав, форма частиц, удельная поверхность, пикнометрическая плотность, микротвердость, коэффициент внутреннего трения и химический состав. Ко второй – насыпная плотность, плотность утряски, текучесть, прессуемость.

Дисперсность порошков, получаемых различными методами, колеблется от долей микрометра до 1 мм. Металлические порошки в зависимости от размера частиц классифицируют на ультратонкие (<0,5 мкм); весьма тонкие (0,5...10 мкм); тонкие (10...40 мкм); средней тонкости (40...150 мкм); грубые (150...1000 мкм). Гранулометрический состав – это количественное соотношение частиц разных размеров или распределение по размерам между их верхним и нижним значениями, выраженное в процентах. Форма частиц

зависит от метода получения порошка и может быть сферической, округлой, губчатой, дендритной, угловатой, пластинчатой, чешуйчатой (рис. 1.13). Форма частиц существенно влияет на основные свойства порошков и получаемых из них ПФМ. Сферические порошки формуют без приложения давления методом свободной засыпки в форму или с приложением давления, используя различного рода связующие.

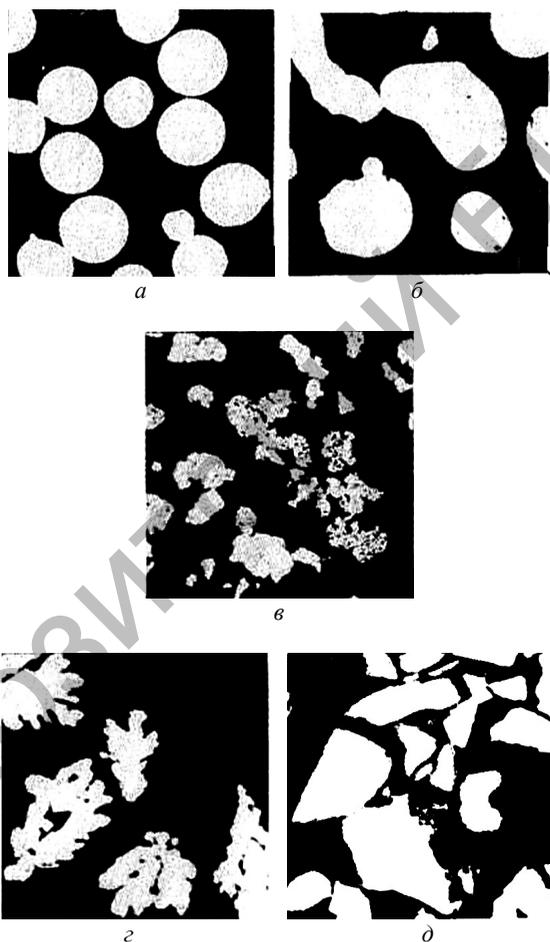


Рис. 1.13. Металлические порошки со сферической (а), округлой (б), губчатой (в), дендритной (z), угловатой (d) формами частиц

Для количественного описания формы частиц используют безразмерные характеристики – факторы формы, которые сохраняют постоянную величину для частиц заданной формы независимо от их размера [2].

Удельная поверхность порошка – это площадь поверхности его частиц, находящихся в единице объема S_V или в расчете на единицу массы S_m . В зависимости от размеров, формы частиц и микрогеометрии их поверхности удельная поверхность S_m порошков колеблется от 0,01 м²/г до десятков м²/г. Как правило, с уменьшением размера частиц и увеличением степени развитости их поверхности величина удельной поверхности возрастает. Величина удельной поверхности является одним из главных показателей, характеризующих дисперсность и активность металлических порошков. Это связано с тем, что все физико-химические процессы, сопутствующие формированию пористых тел, каталитическим реакциям и т. п., происходят на поверхности частиц.

Микротвердость металлического порошка характеризуется пластическими свойствами и определяется измерением диагонали отпечатка при вдавливании алмазной пирамидки (угол при вершине 136°) под действием небольших нагрузок (5...2000 мН) в шлифованную поверхность частицы.

Значение микротвердости H рассчитывают по формуле

$$H = 1,8544 P / l^2, \quad (1.11)$$

где P – нагрузка на индентор, Па;
 l – длина диагонали отпечатка, м.

Насыпная плотность – это масса единицы объема порошка при свободной засыпке. Чем больше размеры частиц, чем ближе к сфере их форма, тем выше насыпная плотность данного порошка. Насыпная плотность сферических частиц одинакового диаметра зависит от типа их укладки (простая кубическая, объемно- или гранецентрированная кубическая, гексагональная). Насыпную плотность определяют по ГОСТ 19440–74.

Плотность утряски – масса порошка в единице объема после его уплотнения встряхиванием или вибрацией (ГОСТ 25279–82).

Эта величина характеризует способность порошка к структурному уплотнению без деформации частиц при вибровстряхивании, когда частицы наиболее компактно перераспределяются в занимаемом объеме.

Текучесть – время высыпания определенной массы порошка (50 г) из воронки через калиброванное отверстие диаметром 2,5 мм. Чем больше влажность и удельная поверхность порошка, чем больше отклонение частиц от сферической формы, тем хуже текучесть порошка. Текучесть порошка определяют по ГОСТ 20899–75.

Прессуемость – способность металлических порошков образовывать брикеты заданной формы под действием внешнего давления и удерживать эту форму после снятия нагрузки. Прессуемость порошка определяется двумя технологическими характеристиками: уплотняемостью и формуемостью. Уплотняемость представляет собой зависимость плотности брикета от величины давления прессования. Формуемость характеризуется способностью порошка сохранять форму при определенном значении плотности и определяется количественно по величине того минимального давления прессования, при котором получается брикет. Прессуемость в основном зависит от пластичности частиц порошка, размера и состояния их поверхности. Прессуемость металлических порошков определяют по ГОСТ 25280–82.

Наиболее распространенным способом оценки уплотняемости является построение зависимости плотности брикетов одинакового сечения, спрессованных из данного порошка, от давления. Полученная графическая зависимость и является характеристикой уплотняемости порошка.

Основные характеристики металлических порошков, используемых для изготовления ПФМ, представлены в табл. 1.3.

При изготовлении ПФМ методом порошковой металлургии помимо изготовления порошков технологический процесс включает следующие основные операции: подготовку порошков перед формованием, формование, спекание и, при необходимости, дополнительную обработку (выполнение отверстий под крепеж, проточку канавок под уплотнения и др.).

Таблица 1.3

Характеристики металлических порошков

Материал, марка	Способ получения	Размер частиц, мм	Фактор формы, $4\pi A/L02$	Насыпная плотность, $кг/м^3$	Насыпная плотность с утряской, $кг/м^3$	Пикнометрическая плотность, $кг/м^3$	Удельная поверхность, $м^2/м^3$
1	2	3	4	5	6	7	8
Бронза, БрОФ 10-1	Распыление расплава воздухом и откатка	(минус 0,1+0,63)	0,93	5050	5670	8790	188 985
		(минус 0,16+0,1)	0,92	5030	5570	8780	98 336
		(минус 0,2+0,16)	0,90	4950	5500	8800	95 040
		(минус 0,315+0,2)	0,96	5320	5750	8800	56 320
		(минус 0,4+0,315)	0,95	5230	5680	8790	38 676
		(минус 0,63+0,4)	0,94	5200	5660	8790	36 030
Коррозионно-стойкая сталь, Х18Н10	Распыление расплава водой	(минус 0,063+0,045)	0,59	2590	–	7750	0,1117
		(минус 0,1+0,063)	0,57	2440	–	7760	0,1085
		(минус 0,2+0,1)	0,53	2270	–	7750	0,1044
		(минус 0,315+0,2)	0,58	2170	–	7820	0,0734
		(минус 0,5+0,315)	0,62	2100	–	7790	0,0684
		(минус 0,8+0,5)	0,61	1780	–	7820	0,0557

1	2	3	4	5	6	7	8
Коррозионно-стойкая сталь, Х18Н15	Гидридно-кальциевое восстановление	(минус 0,1+0,063)	0,62	2330	2630	7870	291 944
		(минус 0,16+0,1)	0,62	2240	2560	7764	259 317
		(минус 0,2+0,16)	0,63	2100	2470	7704	217 252
		(минус 0,315+0,2)	0,65	1860	22 100	7664	172 440
Титан, ПТЭ	Электролиз	(минус 0,1+0,063)	0,31	1250	1600	4520	1 785 400
		(минус 0,16+0,1)	0,33	1210	1500	4550	1 215 000
		(минус 0,2+0,16)	0,40	1200	1490	4550	832 650
		(минус 0,315+0,2)	0,35	1180	1480	4240	589 360
		(минус 0,4+0,315)	0,36	1160	1400	4550	334 325
		(минус 0,63+0,4)	0,32	1150	1400	4590	288 190
Медь, ПМС	Электролиз	(минус 0,1+0,063)	0,27	2720	3074	8910	1 917 100
		(минус 0,16+0,1)	0,26	2310	2669	8895	1 613 900
		(минус 0,2+0,16)	0,26	2112	2400	8890	1 321 190
		(минус 0,315+0,2)	0,26	1840	2000	8890	720 143
		(минус 0,4+0,315)	0,24	2110	2679	8892	460 087
		(минус 0,63+0,4)	0,22	2096	2444	8886	310 112

Процессы подготовки порошков к формованию занимают важное место в общей схеме производства ПФМ. При этом, наряду с традиционно применяемыми в порошковой металлургии операциями по подготовке порошков (рассев, отжиг, смешивание), используются методы обработки особо важные при изготовлении ПФМ: сфероидизация порошка, откатка, покрытие частиц связующим и др., из которых наиболее часто применяют смешивание, рассев и покрытие частиц связующим. Смешивание, как правило, механическое в шаровых мельницах или смесителях применяют в двух случаях:

1) когда необходимо повысить проницаемость и размеры пор ПФМ при использовании мелкодисперсных порошков. В качестве добавок при производстве пористых изделий вводят, как правило, соединения, количество которых колеблется от 5 до 40 % (по массе) в зависимости от плотности основного металла. Такими наполнителями служат углекислый аммоний, мочевины, бикарбонат аммония, парафин, карбонат или нитрат аммония, некоторые сорта пластмасс и др.;

2) при формовании сферических порошков с приложением давления для повышения прессуемости сферических порошков применяют покрытие частиц связующим добавлением в порошки пластификаторов. Они должны не только обладать высокой смачивающей способностью, но и выгорать при нагреве без остатка, легко растворяться в органических растворителях (спирт, бензин). Раствор пластификатора заливают в перемешиваемый порошок (эта операция называется замешиванием), а затем смесь сушат для удаления растворителя. Высушенную смесь подвергают просеиванию и протирке через сита. Хорошими пластификаторами являются 4...5%-й раствор каучука в бензине, парафин, воск, спиртовые растворы бакелита.

Рассев порошков проводят либо при их производстве, либо непосредственно перед приготовлением шихтовой смеси. Эта операция позволяет выделить порошки необходимой дисперсности, которые обеспечивают в дальнейшем получение требуемых свойств ПФМ.

Среди существующих методов разделения частиц по размерам наиболее распространены механическая классификация на ситах

и воздушная классификация. Ситовая классификация основана на механическом разделении частиц порошка на ситах на две части (остаток и проход) путем встряхивания, вибрации или другими способами. Воздушную классификацию проводят в струе воздуха в закрытых аппаратах, что исключает возможность пылевыведения. Существует несколько типов аппаратов: центробежные, инерционные и др. При воздушной классификации разделение основано на зависимости скорости падения частиц в газовых или жидких средах от их размера. Этим методом можно классифицировать частицы размерами от 20 до 100 мкм.

Формование – это придание заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления ПФМ.

Методы формования ПФМ подразделяют на две группы: без приложения давления и с приложением давления. К первой группе относят: свободную засыпку порошка в форму, шликерное литье, формование пластифицированных масс. Вторую группу методов подразделяют на прерывистые, непрерывные и, в зависимости от способа приложения давления, на методы с постепенным и мгновенным приложением давления. К прерывистым методам формования с постепенным приложением давления относят прессование в закрытых пресс-формах, вибрационное прессование, изостатическое прессование; с мгновенным приложением давления – гидродинамическое, магнитно-импульсное, электрогидравлическое прессование. Непрерывные методы формования подразделяют на прокатку и мундштучное прессование. Основные требования, которые предъявляются к формованию ПФМ, связаны с получением изделий заданных форм и размеров с требуемой пористостью и обеспечением равномерного или заданного распределения пористости и, соответственно, проницаемости и размеров пор.

Наиболее распространенными в республике являются три способа: свободная засыпка порошка в форму, прессование в закрытых пресс-формах и сухое радиально-изостатическое прессование.

Свободная засыпка порошка в форму – простейший способ формования ПФМ без приложения давления. Для лучшего заполнения форм порошком, устранения арочного эффекта, а также с целью получения ПФМ с равномерной пористостью форму при

засыпке подвергают вибрации (вручную или на вибровстряхивателе). Этим способом получают изделия в виде втулок, дисков, стаканчиков и т. п. Кроме того, этим методом получают листовые заготовки, которые затем вальцуют с герметичным соединением пайкой или сваркой стыков с целью получения длинномерных трубчатых изделий.

Прессование в закрытых пресс-формах является наиболее распространенным и применяется для изготовления изделий простой формы (диски, конус, втулка и др.). На практике выбирают такие схемы прессования, которые обеспечивают наиболее равномерное порораспределение. Неравномерность распределения пористости (плотности) при прессовании обусловлена двумя факторами: во-первых, внешним трением порошка о стенки матрицы, во-вторых, наличием внутренних и внешних ступенчатых переходов в направлении прессования, а также криволинейных поверхностей или непараллельных основанию плоскостей, ограничивающих деталь.

Различают одностороннее и двустороннее прессование. Одностороннее прессование применяют для формования изделий с отношением высоты к диаметру $< 1,5$. В противном случае наблюдается значительное неравномерное распределение пористости в направлении прессования. Наименьшее ее значение наблюдается у стенки матрицы и под подвижным пуансоном, наибольшее – у стенки матрицы возле неподвижного пуансона. Двустороннее прессование используют при изготовлении ПФМ с повышенным значением отношения высоты к диаметру.

Сухое радиально-изостатическое прессование – это метод прессования порошка в эластичной оболочке под действием всестороннего сжатия.

В настоящее время получили широкое распространение способы прессования, основанные на использовании деформирующего элемента выполненного из высокоэластичных материалов [26]. Обладая способностью деформироваться в области больших упругих деформаций с дальнейшим полным восстановлением свойств и геометрии, такой инструмент обеспечивает не только большой ресурс работоспособности, но и достижение равномерного перераспределения в формируемых заготовках.

Этим методом в большинстве случаев изготавливают трубчатые изделия.

Спекание сформованных заготовок является одной из важнейших технологических операций, применяемых при изготовлении ПФМ, назначение которой состоит в окончательной консолидации пористой структуры и соответствующих физико-механических, гидравлических и химических свойств. Температура спекания, как правило, составляет 0,6...0,9 от температуры плавления наиболее легкоплавкой компоненты, входящей в шихту. Спекание заготовок из порошка проводят в среде защитного газа или в вакууме. Применение защитных сред необходимо для предохранения спекаемых материалов от окисления в процессе термической обработки, а также восстановления оксидных пленок, имеющихся на поверхности частиц. Наиболее широкое распространение при спекании ПФМ получили водород, диссоциированный аммиак, аргон, вакуум. В практике спекания наряду с защитными средами широкое применение находят защитные засыпки, которые способствуют более равномерному прогреву спекаемых изделий и предотвращают их от припекания друг к другу. В качестве засыпок применяют, как правило, кварцевый песок, оксид алюминия или магния. Добавка в них титановых сплавов предохраняет изделия не только от действия паров воды и кислорода, но и от азота, и оксида углерода. Температура плавления засыпки всегда выше температуры спекания, и засыпка не взаимодействует со спекаемым материалом.

В табл. 1.4 обобщены основные структурные, гидродинамические, капиллярные и фильтрующие свойства ПФМ, изготовленных различными методами из порошков коррозионно-стойких сталей, титана, никеля, оловянно-фосфористой бронзы, меди и алюминия, которые дают представление о возможностях порошковой металлургии в области изготовления ПФМ.

Таблица 1.4

Свойства пористых порошковых материалов

Характеристики порошка				Технология получения ПФМ	Максимальная высота подъема жидкости	Размер пор, мкм		Коэффициент проницаемости, $k, \text{м}^2, \times 10^{13}$	Пористость, %	Номинальная тонкость очистки, мкм
Материал, марка	Технология получения	Форма частиц	Размер частиц, мм			$d_{\text{п макс}}$	$d_{\text{п ср}}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь, Х18Н10	Распыленные струи расплава газом	Округлая	(минус 0,1+0,63) (минус 0,16+0,1) (минус 0,315+0,2) (минус 0,4+0,315) (минус 0,63+0,4) (минус 1,0+0,63)	Прессование со связующим и спекание	320...397 276...294 152...171 112...138 83...101 62...69	20...43 47...70 76...104 95...130 123...170 175...280	18...25 28...40 55...78 64...86 94...116 104...160	30...60 75...110 150...245 210...450 450...680 800...1400	36...38 36...39 37...40 37...42 38...42 38...43	7...10 14...18 20...30 25...38 35...48 55...80
Сталь, Х18Н15	Гидридно-кальциевое восстановление оксидов	Чешуйчатая	(минус 0,1+0,063) (минус 0,16+0,1) (минус 0,2+0,16) (минус 0,315+0,2)	Прессование и спекание	812...990 783...829 614...663 411...456	12...18 16...28 20...34 25...46	7...11 10...14 12...18 16...24	4...7 8...14 11...19 18...26	27...31 29...32 29...33 29...33	1,5...3 2...5 4...8 7...10
Титан, ПТЭ	Электродлиз	Дендритная	(минус 0,1+0,063) (минус 0,16+0,1) (минус 0,2+0,16) (минус 0,315+0,2) (минус 0,4+0,315) (минус 0,63+0,4) (минус 0,1+0,63)	Прессование и спекание	411...468 340...392 226...272 165...189 103...157 82...126 53...81	22...30 29...45 34...60 45...80 56...105 85...125 140...190	13...20 19...27 26...45 42...60 54...75 69...90 105...138	9...26 14...33 53...80 85...150 120...205 210...360 350...440	30...38 34...39 35...39 34...39 33...40 35...41 36...42	3...6 7...11 10...14 12...16 16...22 23...30 35...46

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Бронза, БрОФ10-1	Распылен- ные струи расплава воздухом и откатка	Сфе- риче- ская	минус 0,063 (минус 0,1+0,063) (минус 0,16+0,1) (минус 0,2+0,16) (минус 0,315+0,2) (минус 0,4+0,315) (минус 0,63+0,4) (минус 0,1+0,63)	Спекание со свободной насыпкой	401...563	15...20	10...16	25...31	29...31	5...8
					220...317	35...40	25...30	50...60	31...33	10...15
					147...189	50...58	43...47	100...120	32...34	15...18
					105...164	60...80	58...61	110...160	34...35	18...24
					78...126	94...98	73...79	250...395	35...36	24...33
					49...83	131...140	109...116	643...700	35...36	35...45
					35...47	179...190	151...164	895...925	35...37	50...70
					30...39	320...350	246...259	1110...1840	36...37	90...110
Никель	Разложение карбониллов	То же	0,003	Прокатка и спекание	-	2...4	0,95...1,0	0,12	24...25	0,25...0,37
	Электролиз	Денд- ритная	0,003 0,008	То же	- -	3...5 7...10	0,98...1,1 1,7...1,9	0,3...0,4 0,8...1,5	32...35 35...40	0,08...0,1 0,36...0,5
Никель, Н2	Распыление воздухом струи расплава	Сфе- риче- ская	(минус 0,2+0,1) (минус 0,3+0,2) (минус 0,4+0,3) (минус 0,6+0,4) (минус 0,8+0,6)	Прессование и спекание	116...192	65...80	45...53	47...63	32...41	19...41
					114...157	80...98	50...98	80...115	33...35	24...28
					86...110	100...128	72...95	162...186	32...40	30...50
					63...82	123...151	94...116	215...267	32...40	35...60
					41...60	160...220	132...180	350	39...44	70...95
Медь, ПМС	Электролиз водного раствора	Денд- ритная	(минус 0,1+0,063) (минус 0,16+0,1) (минус 0,2+0,16) (минус 0,315+0,2) (минус 0,63+0,4)	То же	203...284	55	36	145	63	18
					182...200	57	39	224	63	20
					139...166	91	61	361	59	26
					89...110	109	89	668	62	41
					57...73	182	145	2110	65	78

Окончание таблицы 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Алюминий	Распыление расплава ультразвуком и механическое измельчение	Округлая	(минус 0,03+0,01) (минус 0,1+0,063) (минус 0,4+0,315)	Спекание со свободной насыпкой в вакууме	664...715 270...290 72...84	10,6...16,9 40...55 164...189	5...9 25...35 104...153	5...10 80...100 749...842	39...42 38...40 35...37	1...3 10...15 45...60

Литература к главе 1

1. Капцевич, В. М. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства / В. М. Капцевич, Р. А. Кусин, Д. И. Кривальцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2007 – 232 с.

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

3. ГОСТ 26849–86. Материалы порошковые. Метод определения величины пор. – Введ. 01.01.1987. – М. : Государственный комитет по стандартам, 1986. – 11 с.

4. Фандеев, В. П. Методы исследования пористых структур / В. П. Фандеев, К. С. Самохина // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015.– Том 7, № 4. – С. 1–21.

5. Vityaz, P. A. Pore structure of sintered permeable materials by mercury porosimetry methods / P. A. Vityaz [et al.] // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – Luxembourg , 1980. – Vol. 19, № 10. – P. 718.

6. Витязь, П. А. Применение методов ртутной порометрии для исследования поровой структуры спеченных проницаемых материалов / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – 1980. – № 10. – С. 74–78.

7. Akshaya Jena. Characterization of pore structure of filtration media / Akshaya Jena, Krishna Gupta // Fluid Particle Separation Journal. – 2002. – Vol. 4, № 3. – Pp. 227–241.

8. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

9. Витязь, П. А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. – Минск : Вышэйшая школа, 1987. – 164 с.

10. Докторов, В. В. Исследование угла естественного откоса нерегулярных медных пористых капиллярных структур для тепловых труб / В. В. Докторов, В. В. Мазюк // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого : научно-практический журнал. – 2017. – № 1. – С. 65–69.

11. Косторнов, А. Г. Количественные критерии пористой структуры проницаемых волоконных материалов / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – 1977. – № 4. – С. 80–87.

12. Косторнов, А. Г. Параметры пористой структуры проникаемых волоконных материалов. 1. Теоретические предпосылки и модельные исследования / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – М. : 1978. – № 4. – С. 34–40.

13. Косторнов, А. Г. Параметры пористой структуры проникаемых волоконных материалов. 2. Материалы из металлических волокон / А. Г. Косторнов // Порошковая металлургия. – М. : 1978. – № 5. – С. 63–68.

14. Регулярность структуры пористых материалов из порошка бронзы / Р. П. Тодоров [и др.] // Порошковая металлургия. – 1986. – № 3. – С. 31–33.

15. Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В. Н. Анциферов [и др.] – М. : Металлургия, 1987. – 792 с.

16. Устройство для измерения локальной проницаемости материалов: а. с. 735972 СССР, МКИ G 01 N 15/08 / П. А. Витязь [и др.]; Науч.-исслед. ин-т порошковой металлургии Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института – № 2544647 ; заявл. 16.11.77 ; опубл. 25.05.80. – 1980. – Бюл. № 19.

17. Бокань, Г. А. Повышение свойств пористых материалов на основе порошков коррозионноустойчивых сталей с применением порообразователей / Г. А. Бокань [и др.] // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: Материалы междунар. научн.-техн. конф. – Могилев : МГТЦ, 2001. – С. 19–20.

18. Аренсбургер, Д. С. Металлокерамические фильтры из титана / Д. С. Аренсбургер, В. С. Пугин, А. А. Гатушкин // Порошковая металлургия. – 1969. – № 10. – С. 93–99.

19. Либенсон, Г. А. Оборудование цехов порошковой металлургии / Г. А. Либенсон, В. С. Панов. – М. : Металлургия, 1983. – 264 с.

20. Силаев, А. Ф. Диспергирование жидких металлов и сплавов / А. Ф. Силаев, Б. Д. Фишман. – М. : Металлургия, 1983. – 144 с.

21. Глазунов, С. Г. Порошковая металлургия титановых сплавов / С. Г. Глазунов, В. Г. Говоров // Порошковая металлургия. – 1976. – № 9. – С. 84–99.

22. Витязь, П. А. Свойства пористых материалов из порошков титана / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – 1987. – № 2. – С. 66 – 68.

23. Ничипоренко, О. С. Распыленные металлические порошки / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. В. Медведовский. – Киев : Наукова думка, 1980. – 240 с.

24. Порошковая металлургия сталей и сплавов / Ж. И. Дзnelадзе [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 263 с.

25. Спеченные материалы для электротехники и электроники / Г. Г. Гнесин [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 344 с.

26. Богинский, Л. С. Твердофазные превращения в смеси высоко дисперсных порошков системы W Mo с добавками никеля и углерода при спекании / Л. С. Богинский // Порошковая металлургия. – 1987. – № 10. – С. 28–33.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СВОЙСТВ ПФМ

2.1. Моделирование ПФМ

Сокращение количества экспериментов при разработке новых методов получения ПФМ или объяснение полученных в результате экспериментов результатов предполагает теоретическое описание поведения исследуемого объекта. Ниже рассмотрено моделирование для описания процессов необратимого деформирования пористых тел и дисперсных систем: четыре модели, объединенные одним общим подходом: расчеты эксплуатационных параметров проводились на идеальных капиллярах, параметры которых (диаметр, длина, количество) взаимосвязаны с параметрами принятой геометрической модели [1].

Первая из разработанных моделей представляла собой пористое тело в виде совокупности протяженных пор – каналов, имеющих в первом приближении форму цилиндров, внутренний радиус которых определяется из функции распределения пор по размерам [2]. Были сделаны допущения, что спеченное тело состоит из цилиндрических пор различного радиуса, характеризующихся функцией распределения. Единичная пора (рис. 2.1) представляет собой полый цилиндр, внутренний радиус которого соответствует радиусу окружности, описываемой по внутренней шейке контактирующих частиц, а наружный равен сумме внутреннего и диаметра шейки, образованной при спекании частиц порошка. Диаметр шейки составляет 0,25 диаметра частиц порошка.

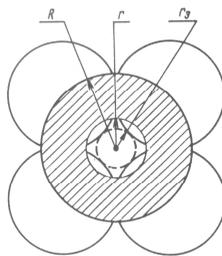


Рис. 2.1. Модель поры, образованной четырьмя частицами одного размера

Размер пор связан с размером частиц порошка, а каждая пора образуется спеканием частиц одного размера. Под действием прикладываемого давления пористое тело испытывает всестороннее сжатие, причем это давление одинаково для пор разного размера и равно внешнему.

Расчеты, выполненные с использованием данной модели на основании уравнений (2.1) и (2.2) [3], позволили подтвердить предположение, что в процессе деформирования спеченного пористого тела, характеризуемого функцией распределения пор по размерам, происходит избирательное уменьшение пор в зависимости от их размеров.

$$P = 2\tau_s \ln \frac{R_0}{r_0}; \quad (2.1)$$

$$R_0^2 - r_0^2 = R^2 - r^2; \quad (2.2)$$

$$r = \sqrt{\frac{R_0^2 - r_0^2}{e^{P/\tau_s} - 1}}, \quad (2.3)$$

где R_0 и r_0 и R и r исходные и текущие значения радиусов полого цилиндра;

P – прикладываемое давление, Па;

τ_s – предел текучести при чистом сдвиге, Па.

При одной и той же величине внешнего давления более крупные поры уменьшают свои размеры на большую величину, что способствует выравниванию размеров пор (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Исходные и текущие значения радиусов полого цилиндра

Исходное состояние				После деформирования	
$r_{0Э}$, МКМ	d_r , МКМ	r_0 , МКМ	R_0 , МКМ	r , МКМ	$r_{Э}$, МКМ
20	100	37,50	62,50	26,80	14,28
18	90	33,75	56,25	24,12	12,86

Исходное состояние				После деформирования	
$r_{0Э}$, мкм	d_r , мкм	r_0 , мкм	R_0 , мкм	r , мкм	$r_{Э}$, мкм
16	80	30,00	50,00	21,44	11,43
14	70	26,25	43,75	18,76	10,00
12	60	22,50	37,50	16,08	8,57
10	50	18,75	31,25	13,4	7,14

Однако данная модель не позволяет использовать ее для описания процесса прессования, пригодна только для расчета простых схем нагружения и не учитывает анизотропию свойств ПФМ. Она позволила обосновать свободную осадку как метод повышения равномерности порораспределения спеченных пористых тел.

При разработке следующей математической модели на основе теории Р. Дж. Грина были получены уравнения пластичности, учитывающие деформационную анизотропию [5]. При выводе уравнений пластичности были сделаны допущения, что в недеформированном состоянии материал изотропен; сплошная часть материала является идеально пластичной; в процессе пластического деформирования поры деформируются анизотропно, то есть изменяют свои размеры и форму. В качестве модели анизотропно деформируемого пористого материала была выбрана сплошная среда, содержащая регулярно расположенные и одинаково ориентированные эллипсоидные поры, характеризующиеся размерами осей и расстояниями между центрами соседний пор, причем оси прямоугольной системы координат являются главными осями описываемого анизотропного пористого материала, в качестве которых наиболее удобно выбрать главные оси тензора напряжений (рис. 2.2).

На основании разработанной модели были получены уравнения, описывающие деформирование пористого материала:

$$\begin{aligned}
 & (K_{21}\sigma_1 - K_{12}\sigma_2)^2 + (K_{31}\sigma_1 - K_{13}\sigma_3)^2 + (K_{32}\sigma_2 - K_{23}\sigma_3)^2 + \\
 & + (N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3)^2 = y^2;
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

$$K_{jk} = \frac{\left[3 - 2 \left(a_j / l_j \right)^{3/4} \right] a_k^2 / a_j^2}{3 \left(1 - a_i / l_i \right)}; \quad (2.5)$$

$$N_i = \frac{\left(a_i / \sqrt{a_j a_k} \right) + 1,5}{2 \ln \left(l_i / a_i \right)}; \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1 &= 2d\lambda \left[\left(K_{31}^2 + K_{21}^2 + N_1^2 \right) \sigma_1 + \left(-K_{12} K_{21} + N_1 N_2 \right) \sigma_2 + \left(-K_{13} K_{31} + N_1 N_3 \right) \sigma_3 + \right], \\ d\varepsilon_2 &= 2d\lambda \left[\left(K_{32}^2 + K_{12}^2 + N_2^2 \right) \sigma_2 + \left(-K_{12} K_{21} + N_1 N_2 \right) \sigma_1 + \left(-K_{23} K_{32} + N_2 N_3 \right) \sigma_3 + \right], \\ d\varepsilon_3 &= 2d\lambda \left[\left(K_{23}^2 + K_{13}^2 + N_3^2 \right) \sigma_3 + \left(-K_{13} K_{31} + N_1 N_3 \right) \sigma_1 + \left(-K_{23} K_{32} + N_2 N_3 \right) \sigma_2 + \right]. \end{aligned} \quad (2.7)$$

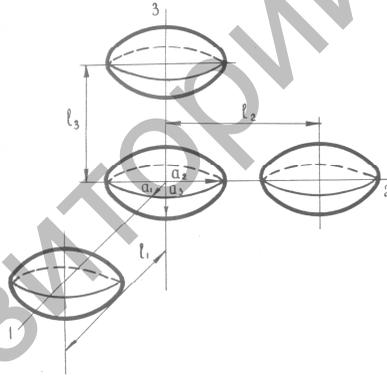


Рис. 2.2. Модель анизотропно деформируемого тела

Для определения коэффициента проницаемости и размера пор использовалась эквивалентная проницаемая модель ПФМ, представляющая поровое пространство материала в виде системы цилиндрических капилляров. При этом объем капилляра в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений приравнивался к объему элементарной поры (рис. 2.3).

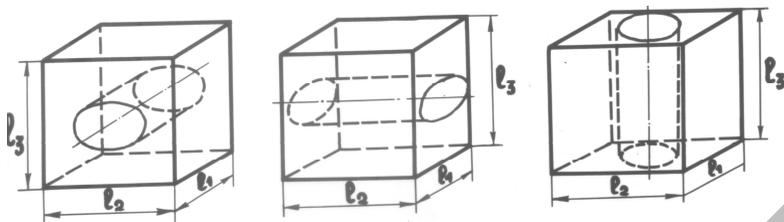


Рис. 2.3. Модель поры

$$dl_i = l_i d\varepsilon_i; \quad (2.8)$$

$$da_i = a_i [d\varepsilon_i + (1/\Pi - 1) d\varepsilon_v / 3]; \quad (2.9)$$

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3; \quad (2.10)$$

$$\Pi = \frac{4\pi}{3} \frac{a_1 a_2 a_3}{l_1 l_2 l_3}; \quad (2.11)$$

$$r_i = 2 \sqrt{\frac{a_1 a_2 a_3}{3l_i}}; \quad (2.12)$$

$$k_i = \frac{\pi r_i^4}{8l_j l_k}; \quad (2.13)$$

$$\Pi_0 = \frac{4}{3} \pi \frac{a_0^3}{l_0^3}; \quad (2.14)$$

$$d_{\text{ср}0} = 4 \sqrt{\frac{a_0^3}{3l_0}}; \quad (2.15)$$

где r_i – радиус капилляра (поры) в заданном направлении, м.

Более приближенной к реальному строению пористого проникаемого порошкового материала является модель, согласно которой

свойства каждого элемента ПФМ определяются параметрами элементарной ячейки в виде параллелепипеда, выделенного из регулярной укладки 8 частиц порошка, соединенных межчастичными контактами. Авторами модели были получены уравнения, связывающие ее параметры (расстояния между центрами частиц, углы их укладки, размеры контактных шеек) со структурными, гидродинамическими, фильтрующими и физико-механическими свойствами, а также исследованы закономерности изменения свойств ПФМ при пластическом деформировании спеченных заготовок [6–10]. Для расчета гидродинамических свойств ПФМ пору элементарной ячейки для каждого из трех направлений, задаваемых осями неортогональной системы координат, представляли в виде капилляра переменного сечения, состоящего из трех частей. Две из них соответствовали узкому входному участку поры, а третья – широкая – внутренней части поры. Разработанная теория учитывает анизотропию свойств ПФМ и позволяет описывать закономерности изменения регулярности пористого материала при пластическом деформировании. Элементарная ячейка, узкое сечение поры и модель поры приведены на рис. 2.4–2.6.

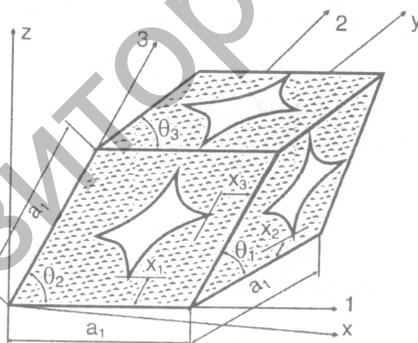


Рис. 2.4. Элементарная ячейка

$$\Pi = \frac{a_v \pi D^3}{6a_1 a_2 a_3 (1 - \cos^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3)^{1/2}}, \quad (2.16)$$

где D – диаметр частиц порошка, м.

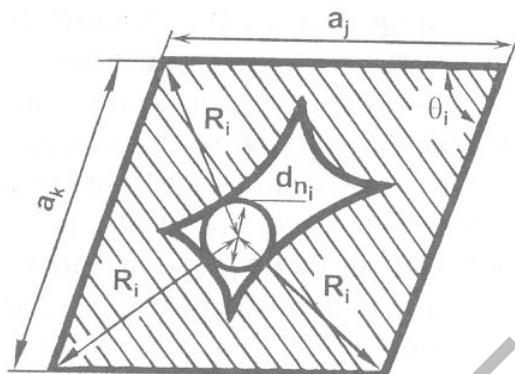


Рис. 2.5. Модель поры

$$d_{ni} = \frac{(a_j^2 + a_k^2 - 2a_j a_k \cos \theta_i)^{1/2}}{\sin \theta_i} \cdot \frac{D_i}{R_i} \quad (2.17)$$

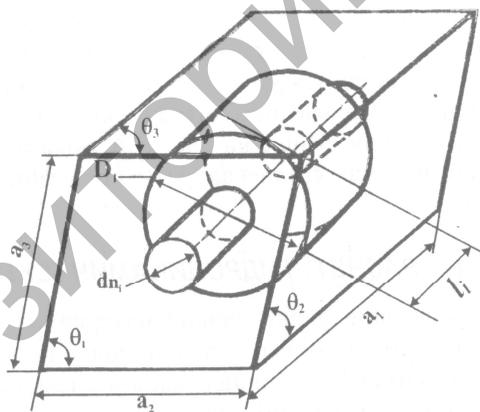


Рис. 2.6. Модель поры

$$K_\alpha = \frac{\pi \sum_{m=1}^3 n_{m\alpha}^2 \frac{D_m^4}{l_m} \left[\frac{D_m^4 (a_m - l_m)}{d_{nm}^4 l_m} \right]^{-1} h_{j\alpha} h_{k\alpha} g}{128 N_{i\alpha} a_i} \quad (2.18)$$

С учетом влияния использования порообразователей на расширение диапазона свойств ПФМ, представляет интерес моделирование пористого тела с наличием порообразователей. Анализ приведенных моделей структуры ПФМ показывает, что моделью, наиболее полно описывающей особенности строения металлического каркаса материала и при этом позволяющей определять фильтрующие свойства, является элементарная ячейка, в которой свойства каждого элемента объема ПФМ задаются параметрами элементарной ячейки в виде параллелепипеда, выделенного из 8 частиц порошка. Согласно [11, 12] наличие порообразователя в этой модели учитывается путем сдвига $1/4$ части одной из граней в направлении соответствующей оси неортогональной системы координат (рис. 2.7).

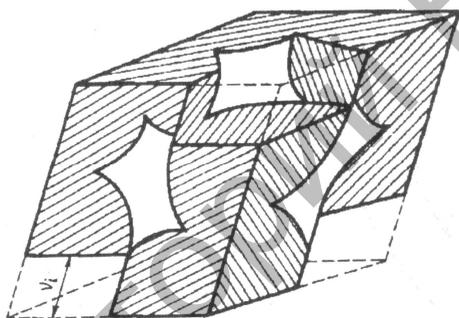


Рис. 2.7. Схема смещения частиц порошка:
 v_i – область сдвига

Авторами [13] для выяснения взаимосвязи различных структурных характеристик и определения роли порообразователя в формировании пористой структуры была использована идеализированная (геометрически упорядоченная) структурная модель ПФМ, в которой в первом приближении принято, что частицы порообразователя, а следовательно и пустоты, образующиеся после их разложения, имеют сферическую форму, причем эти пустоты в готовом материале распределены равномерно и образуют простую кубическую решетку с шагом a . Промежутки между сферическими пустотами (стенки этих пустот) образованы спеченным металлическим порошком и имеют соответствующую пористость, в образовании

которой порообразователь не участвует (рассматривается случай, когда размеры частиц порообразователя значительно больше, чем частиц металлического порошка). На рис. 2.8 показано сечение описанной модели для трех различных случаев, характеризующихся разным количеством пустот в единице объема ПФМ, то есть разным количеством порообразователя. Как видно из рис. 2.8 пористость структуры уменьшается слева направо.

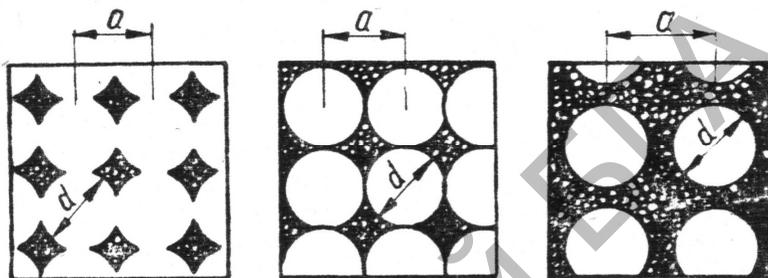


Рис. 2.8. Модель структуры ПФМ для различных случаев укладки порообразователя:
 a – расстояние между центрами частиц порообразователя;
 d – размер частиц порообразователя

Однако первая из приведенных моделей не учитывает размеры частиц порообразователя, вторая – размеры частиц металлического порошка.

Рассмотрим процесс формирования металлических порошков с частицами порообразователя. Одной из характерных черт современных исследований стала математизация физического познания, интенсивное применение методов математического моделирования. Это, по существу, означает определение свойств и характеристик рассматриваемого явления или процесса путем решения с помощью ЭВМ системы неких уравнений – *математической модели* [14]. При этом важно так «сконструировать» приближенную модель, чтобы она достаточно точно отражала характерные свойства рассматриваемого явления, при этом могут быть опущены несущественные и второстепенные свойства явления с тем, чтобы приближенная математическая модель была доступна для исследования на данном уровне развития. Потребность такого подхода

диктуется все усложняющимися запросами практики, а также связана с попыткой создания более рациональных общих теоретических моделей для изучения сложных физических явлений.

Применение численного моделирования особенно актуально в задачах механики сплошной среды, что объясняется рядом обстоятельств: а) *трудность проведения эксперимента, техническая сложность или дороговизна эксперимента*, б) *сложность рассматриваемых уравнений*. В общем случае это нелинейная система дифференциальных уравнений смешанного типа с неизвестной формой поверхности перехода (где уравнения меняют тип) и *подвижными* (свободными) границами. Граничные условия задачи ставятся на поверхностях или линиях, которые сами определяются в процессе вычислений. Математические трудности изучения такого типа проблем связаны также с нелинейностью уравнений, а также с большим числом независимых переменных. Поэтому обычные методы аналитического решения здесь зачастую не проходят.

Основными этапами численного решения задач механики сплошной среды являются следующие: 1) выбор модели физического процесса, 2) выбор математической модели или математическая постановка задачи, 3) выбор и разработка численного метода решения соответствующей математической задачи, 4) разработка способа реализации алгоритма на ЭВМ и проведение серийных расчетов, накопление опыта, оценка эффективности и пределов применимости алгоритма.

В данной работе, следуя вышеуказанным этапам, разрабатывается математическая модель для расчета свойств ПФМ, получаемых в результате прессования гранулированных с использованием порообразователя металлических порошков.

Для того чтобы рассчитать свойства ПФМ, прежде всего необходимо определить величину (размер) порового пространства для некоторого выбранного элементарного (регулярного) объема, которая определяется размером пустоты между металлическими частицами в этом объеме.

Для этого рассмотрим в качестве элементарного объема ячейку, характеризующуюся кубической объемно-центрированной укладкой частиц, причем в центре куба находится частица порообразователя.

Процесс уплотнения порошков при приложении давления имеет достаточно сложный характер. Физический процесс характеризуется уплотнением частиц. Математически это означает, что при заданной нагрузке на выделенный объем в нем создаются напряжения и возникают деформации. Для определения структуры каркаса ячейки фильтрующего тела необходимо рассмотреть размер пор в этой ячейке, которую можно представить в виде пространства между деформированными элементарными частицами вещества определенной формы и размера.

На данном этапе построим математическую модель для определения размера пор, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных со всеми связями, предложим численный метод расчета и разработаем численный алгоритм ее решения.

Рассмотрим элемент регулярной укладки частиц, состоящий из 8 металлических частиц и одной частицы порообразователя в центре (рис. 2.9).

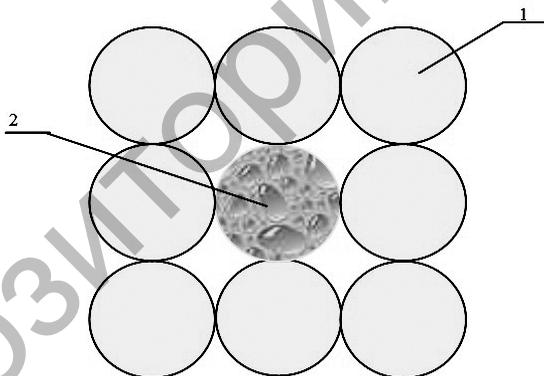


Рис. 2.9. Сечение элементарной ячейки:
1 – металлический порошок; 2 – порообразователь

Ниже рассмотрим процессы, происходящие с этим элементарным объемом в процессе прессования, и составим систему уравнений для нахождения деформированного тела.

На предыдущем этапе моделирование образования поры проводилось на примере четырех частиц, полагая, что они представляют

элемент регулярной укладки, образующий пору при заданном угле упаковки частиц. В данной модели на вид упаковки (угол укладки частиц) и первоначальную форму частиц не накладывается никаких ограничений, кроме того, что она должна быть известна.

Предполагалось, что каждая частица однородная и состоит из вещества, которое подчиняется всем законам классической механики как отдельное компактное тело. Был рассмотрен механизм смятия (прессования) четырех частиц под действием заданной нагрузки и предложена численная модель для расчета образовавшейся пустоты (поры). Заметим, что в общем случае частицы могут быть из разных материалов.

Покажем, что выбор модели с порообразователем, представленной на рис. 2.9, расширяет возможности получения пористой структуры и дает возможность для прогнозирования качества ПФМ.

Остановимся на некоторых моментах при составлении математической модели.

На основании законов механики сплошной среды [15, 16] с использованием статических уравнений (уравнений равновесия выделенного элемента среды), геометрических уравнений, которые определяют деформации по перемещениям точек, и физической группы уравнений, которые учитывают механические свойства материала и определяют связь между напряжениями и деформациями элемента (законом Гука), была предложена математическая модель и описан приближенный алгоритм численного расчета, позволяющий рассчитать поры и ее размеры. Геометрия поры определялась совокупностью некоторых точек M_k , называемых граничными с координатами (r_i^k, z_i^k) , по которым нетрудно восстановить замкнутую кривую, определяющую пору.

При выводе уравнений использовался линейный закон Гука [15] в виде

$$T = \lambda_m D E^1 + 2\mu_m \epsilon \quad (2.19)$$

или

$$T = 2\mu_m \left(\frac{\nu_m}{1 - 2\nu_m} D E^1 + \epsilon \right), \quad (2.20)$$

где T – тензор напряжений;

ε – тензор деформаций;

E^1 – единичная матрица;

D – дивергенция вектора перемещений ($D = \nabla \cdot \dot{\mathbf{v}} = \text{div } \dot{\mathbf{v}} = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z}$);

m – индекс, указывающий либо на свойства металла ($m=1$), либо на свойства порообразователя ($m=2$);

λ_m, μ_m – постоянные модули упругости или коэффициенты Ламе для m -го материала, которые определяются через модуль Юнга E_m и коэффициент Пуассона ν_m посредством формул

$$\mu_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}, \quad \lambda_m = 2\mu_m \frac{\nu_m}{1 - 2\nu_m}.$$

Таким образом, для вектора перемещений $\dot{\mathbf{u}}$, возникающего в m -й частице под действием приложенной нагрузки, имеем систему нелинейных уравнений в частных производных:

$$\frac{1}{1 - 2\nu_m} \text{grad } \text{div} \dot{\mathbf{u}} + \nabla^2 \dot{\mathbf{u}} + \frac{\rho_m}{\mu_m} \dot{\mathbf{Q}} = 0, \quad (2.21)$$

где $\dot{\mathbf{Q}}$ – объемные или массовые силы. В нашем случае, объемной силой является собственный вес.

С учетом цилиндрической симметрии (при рассмотрении задачи) и предположении о независимости искомых величин от угла ϕ , в проекциях на соответствующие оси для компонент вектора перемещений имеем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{1 - 2\nu_m} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nabla^2 u = 0, \\ \frac{1}{1 - 2\nu_m} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nabla^2 w - \frac{\rho_m}{\mu_m} g = 0, \end{cases} \quad (2.22)$$

где u , v – проекции вектора перемещения на соответствующие оси r и z ;

$$\nabla^2 u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2};$$

$$\nabla^2 w = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}.$$

Поскольку полученная система уравнений содержит частные производные, то для однозначного определения неизвестных к системе уравнений, определяющих поведение линейно-упругого тела в точках его объема, надо добавить условия на ограничивающей его поверхности S , к которой относятся поверхности частиц, точки приложения нагрузок, точки контакта с твердой поверхностью (основание формы прессования), точки контакта или соприкосновения частиц.

Краевые условия определяются заданием внешних поверхностных сил или перемещений точек поверхности в зависимости от конкретной задачи. Точки свободной поверхности – это те точки границы контура частиц, которые граничат с газом (воздухом) и в них задается распределение поверхностных сил F ; краевым условием является уравнение равновесия на поверхности:

$$\mathbf{\hat{n}} T|_S = \mathbf{F}, \quad (2.23)$$

где $\mathbf{\hat{n}}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности тела;
 T – тензор напряжений в точках поверхности.

Направляющие косинусы внешней нормали $n_r = \cos(r, \mathbf{\hat{n}})$, $n_z = \cos(z, \mathbf{\hat{n}})$ к кривой $z = z(r)$, определяющей границу поверхности, находятся по формулам

$$n_r = \frac{|z'|}{\sqrt{1 + (z')^2}}; \quad (2.24)$$

$$n_z = -\frac{z'}{\sqrt{1+(z')^2}}. \quad (2.25)$$

Поскольку свободная поверхность S частицы в начальный момент известна и в безразмерной форме на плоскости (r, z) имеет вид

$$r^2 + (z - 1)^2 = 1, \quad (2.26)$$

то, согласно формулам (2.24) и (2.25), нетрудно определить направляющие косинусы нормали в точках границы M^k :

$$n_{r,M^k} = r^k; \quad (2.27)$$

$$n_{z,M^k} = \pm\sqrt{1-r^k}. \quad (2.28)$$

В отличие от ранее рассмотренного, здесь добавляются условия контакта или сопряжения между частицами металл–порообразователь.

Рассматриваются 5 типов граничных условий [17, 18].

Первое граничное условие: точки свободной поверхности, в которых приложена внешняя нагрузка:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}|_S = \mathbf{P}_{\text{нагр}}. \quad (2.29)$$

При заданной осевой нагрузке основных уравнений следует условие

$$\sigma_z = -P_{\text{нагр}}. \quad (2.30)$$

Поскольку задача решается в перемещениях, это условие для нагрузок перепишем в терминах перемещений, используя выражение напряжений через перемещения (и с учетом ограниченности решения при $r=0$, которое эквивалентно условию $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial u}{\partial r} = 0$).

Тогда заданное граничное условие примет вид

$$2\mu_m \frac{1 - \nu_m}{1 - 2\nu_m} \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_s = -P_{\text{нагр}}, \quad (2.31)$$

или

$$\frac{\partial w}{\partial z} \Big|_s = -\frac{1 - 2\nu_m}{2\mu_m (1 - 2\nu_m)} P_{\text{нагр}}. \quad (2.32)$$

Второе граничное условие: точки свободной поверхности это те точки свободной поверхности, граничащие с газом, в которых отсутствуют внешние нагрузки:

$$\mathbf{\hat{n}} T \Big|_s = 0. \quad (2.33)$$

Откуда в покомпонентной форме имеем

$$\begin{cases} \sigma_r n_r + \tau_{rz} n_z = 0, \\ \tau_{rz} n_r + \sigma_z n_z = 0. \end{cases} \quad (2.34)$$

Используя уравнения для компонент напряжений через перемещения, для предыдущих условий получим следующий вид:

$$\begin{cases} 2\mu_m \left(\frac{\nu}{1 - 2\nu} D + \frac{\partial u}{\partial r} \right) n_r + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) n_z = 0, \\ \mu_m \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) n_r + 2\mu_m \left(\frac{\nu}{1 - 2\nu} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) n_z = 0, \quad D = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}. \end{cases} \quad (2.35)$$

Третье граничное условие: точки на линии контакта с твердым основанием пресс-формы.

В точках или площадках, на которых тело опирается на гладкое основание, краевые условия записываются в виде

$$\mathbf{\hat{u}} \mathbf{\hat{n}} = 0; \quad (2.36)$$

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} = 0. \quad (2.37)$$

Первое условие (уравнение (2.36)) выражает отсутствие нормальной компоненты перемещения, а второе (уравнение (2.37)) – отсутствие касательной составляющей вектора силы, тогда как ее проекция на нормаль $\mathbf{r} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{F} \cdot \mathbf{n}$ (распределенная реакция гладкого основания) заранее неизвестна. Здесь предполагается, что площадка основания препятствует перемещению тела в направлении нормали:

$$w|_{M^1} = 0. \quad (2.38)$$

В противном случае задача значительно усложняется.

Четвертое граничное условие: точки на линии контакта частиц из различных материалов. задается равенство потоков со стороны разных частиц.

Пятое граничное условие: точки на линии симметрии $r=0$ нормальная компонента вектора перемещений должна быть нулевой, то есть

$$u|_{r=0} = 0. \quad (2.39)$$

Задание граничных условий приводит к замкнутой системе дифференциальных уравнений, из решения которой каким-либо приближенным методом определяется реализуемое в теле напряженное состояние и вектор перемещения точек среды. В линейной постановке задача определения формы и размеров полученного тела в конечном состоянии отодвигается на второй план – их находят после того, как задача решена в предположении неизменности начальной формы частицы. Этот прием позволяет избежать серьезной трудности нелинейной теории упругости, когда напряженное состояние приходится разыскивать в теле с неизвестной наперед границей. Поэтому предварительно граничные условия формулируем на первоначальной геометрии тела.

Таким образом, окончательно для вектора перемещений $\mathbf{u}(u, w)$ получили систему уравнений в частных производных с описанными выше граничными условиями в точках границы.

Остановимся на численном методе решения этой системы. Следует отметить, что все численные подходы в механике сплошных сред используют *дискретное* представление среды: эйлеровы или лагранжевы ячейки, крупные частицы, конечные элементы и т. д. То есть приемы вычислительной математики используют приближенное представление уравнений баланса для указанных элементарных (но конечных) объемов.

Для численного решения задачи применялся метод конечных разностей, который характеризуется наибольшей универсальностью, точностью и простотой. Область интегрирования здесь разбивается на счетные ячейки с помощью некоторой сетки, как правило, прямоугольной. Производные функции по всем направлениям заменяются конечными разностями с помощью тех или иных соотношений, причем чаще всего используются неявные разностные схемы. При построении неявной разностной схемы, например, методом контрольного объема, с хорошей аппроксимацией первых производных, связанных с переносом, получаем консервативные устойчивые схемы с хорошей точностью. Однако при расчетах в областях сложной формы этот метод приводит к значительной громоздкости и трудоемкости вычислительных процедур. В этой ситуации наиболее целесообразно применять метод конечных элементов, отличающийся наибольшей компактностью и значительно более широкими возможностями при расчете задач как с произвольной геометрией, так и со смешанными производными. Однако разбиение области, изменяющейся со временем на конечное число элементов, и нумерация узлов, также является нетривиальной задачей. Кроме того, использование конечных элементов приводит к решению системы алгебраических уравнений, в матрице которой большое число коэффициентов равно нулю. Из сказанного следует, что наиболее перспективным являлось бы создание совместного метода, сочетающего достоинства разностного метода и метода конечных элементов.

Ниже для численного решения системы уравнений (2.22)–(2.39), подобно предыдущему этапу, будем использовать метод конечных разностей. Решение находим не аналитически, а на некоторой выбранной совокупности точек, называемой разностной сеткой. Построенный алгоритм является модифицированным аналогом метода маркеров и ячеек. Область решения разбивается координатными

линиями с равномерными узлами $M_{ij} = M_{(i,j)} = (r_i, z_j)$, $z_j = (j-1) h_z$ на ячейки (объемы), в результате чего получаем постоянную эйлерову сетку.

В ячейках области задаем признак заполнения ячейки веществом по принципу функции объема, то есть для ячейки не полностью занятой веществом вводится скалярная функция F , значение которой равно фракционному объему ячейки, занятой веществом. Предполагается, что $F = 1$, когда ячейка полностью занята веществом, и $F = 0$ в случае пустой ячейки. Ячейки со значениями $0 < F < 1$ содержат свободную поверхность. С использованием этого признака строится алгоритм решения с учетом соответствующих условий.

Система разностных уравнений для численного решения, полученная интегро-дифференциальным методом [16] (путем интегрирования системы уравнений по элементарному объему или по ячейке разностной сетки), с учетом обезразмеривания имеет вид

$$\begin{cases} \frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u_{\bar{r}})_r + u_{\bar{z}\bar{z}} + \frac{1}{1-2\nu_m} \left(\left(\frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u)_{\bar{r}} + w_z \right)_r = 0, \\ \frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}w_{\bar{r}})_r + w_{\bar{z}\bar{z}} + \frac{1}{1-2\nu_m} \left(\left(\frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u)_{\bar{r}} + w_z \right)_r - \frac{\rho_m}{\mu_m} gr_0 = 0, \end{cases} \quad (2.40)$$

для точек $M_{ij} = M_{(i,j)} \in$ частице из m -го материала.

Система решается итерационным методом установления с использованием метода переменных направлений по итерациям.

$$\begin{cases} \frac{u^{s+1} - u^s}{\tau_s} + \frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u_{\bar{r}})_r + u_{\bar{z}\bar{z}} + \frac{1}{1-2\nu_m} \left(\left(\frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u)_{\bar{r}} + w_z \right)_r = 0, \\ \frac{w^{s+1} - w^s}{\tau_s} + \frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}w_{\bar{r}})_r + w_{\bar{z}\bar{z}} + \frac{1}{1-2\nu_m} \left(\left(\frac{1}{\bar{r}}(r_{-0,5}u)_{\bar{r}} + w_z \right)_r - \frac{\rho_m}{\mu_m} gr_0 = 0, \end{cases} \quad (2.41)$$

где τ_s – итерационный параметр.

Метод основан на явном нахождении вида пересечения границы материала частицы с координатными линиями постоянной эйлеровой сетки.

Остановимся на некоторых этапах решения системы.

Этап 1: решая итерационную систему относительно неизвестных перемещений, находим совокупность значений $u = u_{ij}$, $w = w_{ij}$, которые представляют значения вектора перемещений в узлах выбранной сетки $u_{ij} = u(M_{ij}) = u(r_i, z_j)$, $w_{ij} = w(M_{ij}) = w(r_i, z_j)$.

Этап 2: зная найденные перемещения, нетрудно определить координаты смещенных точек $M^* = (r_i^*, z_j^*)$ по формулам

$$r_i^* = (r_i + u_{ij})r_0; \quad (2.42)$$

$$z_j^* = (z_j + w_{ij})r_0, \quad (2.43)$$

которые определяют положение деформируемого тела. Получив новые значения $M^{*k} = (r_i^{*k}, z_j^{*k})$ граничных точек $M^k = (r_i^k, z_j^k)$, находим новую поверхность деформируемой частицы.

Этап 3: далее проводим перераспределение ячеек по заданной постоянной эйлеровой сетке с учетом нового положения деформированных частиц, формируем, исходя из новых координат точек, функцию, указывающую на заполнение объема в ячейке, вводим новые маркеры и т. д.

При построении алгоритма решения для описания поведения вещества в неполной ячейке, предполагая линейный характер изменения вещества в ячейке, вводили 2 маркера в неполных ячейках, находящихся в граничных ячейках на точках пересечения вещества с координатными линиями эйлеровой сетки. Такого количества маркеров было достаточно для определения нормалей и радиусов кривизны в точках свободной поверхности. Нумерация (в порядке возрастания) маркеров-частиц M^k в дробных ячейках производится таким образом, чтобы область, занятая веществом, находилась слева.

Расчетный алгоритм рассматривает 12 типов дробных ячеек, отличающихся друг от друга видом пересечения свободной

поверхности частиц ячейки сеточной области, конфигурация которых показана в предыдущем отчете.

При введении новых координат маркеров и признаков заполнения ячеек далее алгоритм повторяется, но уже на модифицированной области, граничные условия на которой и условия сопряжения различных веществ определяются согласно виду точек.

Напряженное состояние в каждой точке тела (из выбранной системы точек – разностной сетки) определяется тензором напряжений. Компоненты тензора напряжений определим через найденные перемещения по следующим разностным формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{r,ij} = 2\mu_m \left(\frac{v_m}{1-2v_m} D_{ij} + (u_{ij} - u_{i-1j}) / h_r \right), \\ \sigma_{\phi,ij} = 2\mu_m \left(\frac{v}{1-2v} D_{ij} + \frac{u_{ij}}{r} \right), \quad \sigma_{z,ij} = 2\mu_m \left(\frac{v_m}{1-2v_m} D_{ij} + (w_{ij} - w_{ij-1}) / h_z \right), \\ \sigma_{rz,ij} = \mu_m \left((u_{ij} - u_{ij-1}) / h_z + (w_{ij} - w_{i-1j}) / h_r \right), \quad \sigma_{r\phi,ij} = 0, \quad \sigma_{z\phi,ij} = 0, \\ D_{ij} = (u_{ij} - u_{i-1j}) / h_r + \frac{u_i}{r_i} + (w_{ij} - w_{ij-1}) / h_z. \end{array} \right. \quad (2.44)$$

Напряжения в среде можно представить состоящими из напряжений, связанных с равномерным гидростатическим давлением (все три нормальные компоненты напряжения равны), плюс напряжения, характеризующие сопротивление материала деформациям сдвига. Поэтому если разложить каждое напряжение $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z$ на гидростатическую составляющую P и девиаторную S , то будем иметь соотношения

$$\sigma_r = -P + s_r; \quad (2.45)$$

$$\sigma_\phi = -P + s_\phi; \quad (2.46)$$

$$\sigma_z = -P + s_z, \quad (2.47)$$

где P – среднее арифметическое трех напряжений.

$$P = (\sigma_r + \sigma_\phi + \sigma_z). \quad (2.48)$$

Будем использовать условие текучести Мизеса для описания предела текучести. Если главные напряжения известны, то условие текучести записывается так:

$$(\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 = 2(Y_0^m)^2, \quad (2.49)$$

где Y_0^m – предел текучести для простого растяжения для частицы из m -го материала. Вычисления продолжаем до тех пор, пока значения напряжений в левой части не станут меньше $2(Y_0^m)^2$.

В технологии прессования для достижения максимальной пористости необходимо ограничить давление прессования, чтобы не произошло закрытия пор. Прессование проводят в закрытых пресс-формах. Из результатов экспериментов известно, что при введении наполнителя (порообразователя) пористость прессовок, содержащих порообразователь, больше пористости прессовок, состоящих только из металлических порошков. Вид основных уравнений в перемещениях, при использовании в качестве одной или нескольких частиц порошка порообразователя, остается прежним, поскольку в предложенной модели ограничений на вид материала не было, а указывалось, что материал может иметь только упругую деформацию.

Это свидетельствует о том, что при уплотнении смеси металлов с порообразователем наблюдаются такие же закономерности, как и при прессовании однокомпонентных материалов.

Решение нелинейной системы дифференциальных уравнений позволяет определить перемещения, описывающие в итоге поровое пространство моделируемой ячейки и позволяющие определить удельную поверхность, размер пор, пористость с последующим расчетом проницаемости по известным методикам [12].

На рис. 2.10 приведены расчетные зависимости изменения свойств ПФМ от давления прессования при начальной пористости 0,55.

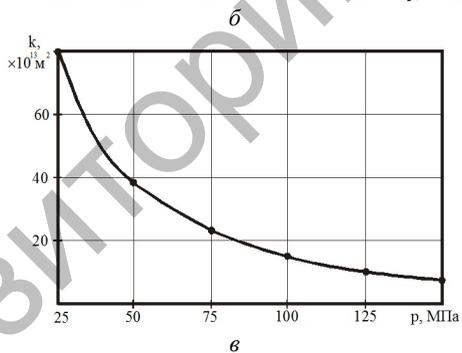
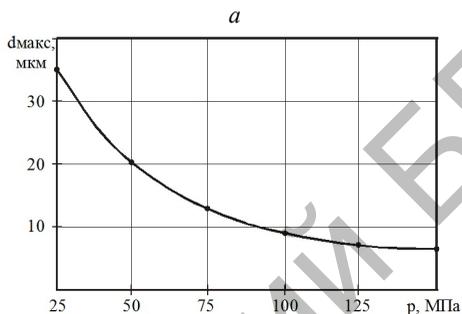
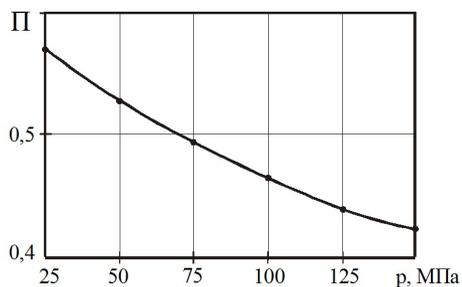


Рис. 2.10. Расчетные зависимости пористости (а), размера пор (б) и коэффициента проницаемости (в) от давления прессования. Размер частиц металлического порошка (никеля) и порообразователя (мочевины) (минус 0,1) мм

Достоинством разработанной математической модели является возможность ее развития для описания процесса спекания.

Спекание сформованных заготовок является одной из важнейших технологических операций, применяемых при изготовлении

ПФМ. Ниже расширим предложенную модель с учетом частицы порообразователя, дополняя ее процессами спекания, основными из которых являются тепловые процессы.

С учетом температуры закон Гука примет вид (вводится температурное слагаемое)

$$T = 2\mu_m \left(\frac{\nu_m}{1 - 2\nu_m} D E^1 + \varepsilon - \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \alpha_m \Theta E^1 \right), \quad (2.50)$$

где α_m – коэффициент объемного температурного расширения, К;

Θ – температура, отсчитываемая от температуры начального состояния, $10^{-6}/\text{К}$.

Записывая краевое условие через перемещения и сравнивая с предыдущим (без температуры), заметим, что влияние температурного слагаемого в выражении закона Гука можно формально свести к заданию массовых сил с потенциалом, пропорциональным температуре:

$$\Pi = 2\mu_m \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \alpha_m \Theta, \quad (2.51)$$

и нормальных к поверхности частицы поверхностных сил:

$$F = 2\mu_m \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \alpha_m \Theta \mathbf{n} = \mathbf{n} \Pi. \quad (2.52)$$

С учетом температурных слагаемых, повторив вывод уравнений по аналогии с предыдущим отчетом, получим окончательную систему уравнений в перемещениях:

$$\frac{1}{1 - 2\nu_m} \text{grad div } \mathbf{u} + \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\rho_m}{\mu_m} \mathbf{Q} - 2 \frac{1 + \nu_m}{1 - 2\nu_m} \text{grad } \alpha_m \Theta = 0, \quad (2.53)$$

или в проекциях на соответствующие оси

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{1-2\nu_m} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nabla^2 u - 2 \frac{1+\nu_m}{1-2\nu_m} \alpha_m \frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0, \\ \frac{1}{1-2\nu_m} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \nabla^2 w - \frac{\rho_m}{\mu_m} g - 2 \frac{1+\nu_m}{1-2\nu_m} \alpha_m \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0, \end{array} \right. \quad (2.54)$$

где

$$\nabla^2 u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.55)$$

и

$$\nabla^2 w = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \quad (2.56)$$

Систему уравнений необходимо дополнить уравнением для расчета температуры, полученным из закона сохранения энергии, предполагая, что внутренняя энергия тепловая:

$$\rho_m C_m \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{v}\Theta) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_m(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2}, \quad (2.57)$$

где $\rho_m, C_m, \lambda_m, \alpha_m$ – плотность (кг/м^3), теплоемкость (Дж/К), теплопроводность ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$) и коэффициент объемного расширения вещества ($10^{-6}/\text{К}$) из m -го материала соответственно;

\mathbf{v} – вектор скорости или деформации.

Заметим, что начальная температура частиц $\Theta_m = \Theta_0$ должна быть значительно меньше их температуры плавления.

В предыдущем пункте были приведены граничные условия и вид системы для нахождения перемещений. Вид граничных условий здесь остается прежним, в основные уравнения для перемещений добавятся лишь температурные слагаемые.

Пространственные граничные условия отражают воздействие окружающей среды на поверхность рассматриваемого тела. На свободной поверхности нагрев поверхности формы, содержащей частицы, происходит за счет теплообмена с окружающей средой. Поэтому на свободной поверхности будем задавать граничные условия III рода.

Модель предусматривает возможность использования двух видов условия: либо условие теплообмена (по закону Ньютона):

$$\lambda_m \frac{\partial \Theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_T^m (\Theta - \Theta_{gaz}) \Big|_{\Gamma}, \quad (2.58)$$

либо условие теплообмена с излучением по закону Стефана–Больцмана:

$$\lambda_m \frac{\partial \Theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \alpha_T^m (\Theta - \Theta_{gaz}) \Big|_{\Gamma} + \beta \sigma_b (\Theta^4 - \Theta_{gaz}^4) \Big|_{\Gamma}, \quad (2.59)$$

где $\frac{\partial \Theta}{\partial n} \Big|_{\Gamma_i}$ – производные по нормали к границе области в точках Γ_i ;

α_T^m – коэффициент теплоотдачи, характеризующий теплообмен на внешней стороне частиц, граничащих с газом.

На оси симметрии $r = 0$ будем задавать условия симметрии:

$$\lambda_m(\Theta) \frac{\partial \Theta_m}{\partial r} = 0. \quad (2.60)$$

Поскольку спекание происходит при температурах ниже температуры плавления, то задача будет однофазной и частицы не будут переходить в жидкую фазу.

В случае контакта частиц с различными теплофизическими свойствами (то есть частиц из различных материалов) необходимо определить граничные условия сопряжения, или так называемые граничные условия IV рода, при предположении, что температуры соприкасающихся поверхностей одинаковы:

$$\lambda_m(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial n} = \lambda_{m_1}(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial n}, \quad \Theta_{\Gamma^+} = \Theta_{\Gamma^-}.$$

Это граничное условие представляет собой равенство тепловых потоков в области контакта частиц из m и m_1 -го материалов.

Таким образом, системы уравнений (2.57)–(2.60) полностью определяют тепловые процессы в заданном объеме.

Алгоритм решения совместной задачи. Основные моменты численного решения были приведены в предыдущем разделе. С добавлением нахождения температуры в каждой ячейке сеточной области процедура решения будет следующей:

1) решаем задачу в перемещениях (температура веществ берется, например, начальная). По найденным перемещениям находим новую область взаимосвязанных частиц;

2) решаем тепловую задачу с учетом найденных перемещений.

С учетом найденной температуры уточняется поле перемещений.

Если вещества (металлы или др.), из которых состоит выделенный объем, под действием температуры изменяются незначительно, это означает, что при спекании их форма не изменяется или изменяется достаточно мало. Для частичек, которые состоят из порообразователя, наоборот происходит их выпаривание, в результате которого образуется пустота. Таким образом на месте порообразователя образуется пора.

Схематично процесс образования такой поры в результате пресования и спекания представлен на рис. 2.11.

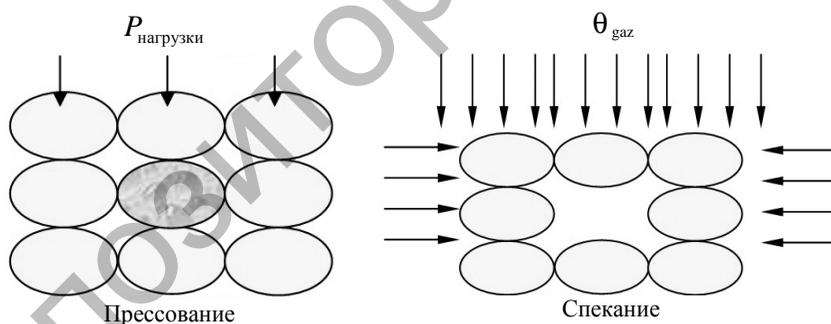


Рис. 2.11. Схема образования поры при пресовании и спекании:

$P_{нагрузки}$ – нагрузка на образец; θ_{gaz} – температура спекания

Кроме того, разработанная математическая модель может быть использована для расчетов видоизмененных элементарных ячеек. Один из вариантов такого видоизменения представлен ниже на рис. 2.12, на котором схематично показана гранула, образованная металлическим

порошком и порообразователем и полученная в результате растворения порообразователя (например, мочевины), смешивания раствора с металлическими сферическими частицами, сушки полученной смеси и ее измельчения.

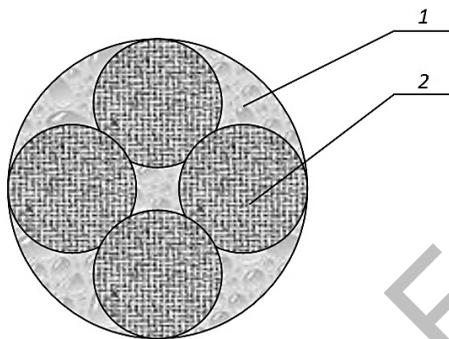


Рис. 2.12. Схема гранулы (однородные частицы металла в среде порообразователя):
1 – порообразователь; 2 – металл

Процесс образования поры (следуя разработанной модели) можно схематично представить на рис. 2.13 на примере других частиц с неоднородными свойствами (гранул).

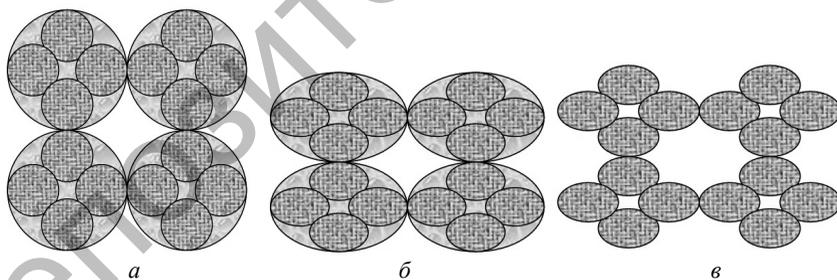


Рис. 2.13. Схема образования поры в случае неоднородных частиц состава металл-порообразователь:
а) укладка; б) после прессования; в) после спекания

Построенная модель ПФМ позволяет учесть наличие порообразователя при расчете процесса прессования и отражает все виды

связи на границах контакта частиц металлического порошка. На основании построенной модели разработаны приближенный метод и алгоритм расчета свойств ПФМ, получаемых прессованием гранулированных с использованием порообразователя металлических порошков. Предложенный метод является модификацией метода конечных разностей с явным выделением свободной поверхности материала, который позволяет с достаточной степенью достоверности описать поровое пространство и, таким образом, определить размеры пор, удельную поверхность, пористость с последующим расчетом проницаемости по известным методикам. В качестве примера приведены результаты расчета изменения свойств ПФМ в процессе прессования при начальной пористости материала 0,55.

Достоинством предложенной математической модели является возможность ее развития для описания процесса спекания, а также возможность ее использования для расчета видоизмененных элементарных ячеек, используемых исследователями при моделировании структуры ПФМ с порообразователем.

Предложенная математическая модель, учитывающая напряженно-деформированное состояние частицы, получаемой прессованием гранулированных с использованием порообразователя металлических порошков является актуальной и не имеет аналогов в области исследований в процессах ПФМ в порошковой металлургии.

2.2. Перспективные способы повышения свойств ПФМ

Как отмечено в главе 1, предметом рассмотрения данной работы является первая группа – ПФМ, которые условно можно разделить на фильтры и распределители газовых или жидкостных потоков. Основным назначением фильтров является очистка жидкостей или газов от посторонних примесей. Отличительной их особенностью является осуществление фазоразделения в результате процесса фильтрования. Применение ПФМ позволяет повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность пневмо- и гидросистем различного назначения, обеспечить защиту окружающей среды и многое другое. Фильтры используются для очистки

воды, щелочных, кислотных и солевых растворов, горючесмазочных материалов, молока, смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров, сжиженных и сжатых газов (азот, кислород, гелий, воздух и другие) при их производстве и практическом применении, отходящих газов в технологических циклах химического, металлургического, цементного и других производств. В ряде случаев ПФМ позволяют улавливать дорогостоящие пылевидные катализаторы, используемые в технологических процессах химического и нефтехимического производства, что позволяет значительно удешевлять эти процессы [2].

Распределители потоков в соответствии со своим названием предназначены для равномерного (или, в случае необходимости, неравномерного) распределения газовых или жидкостных потоков. В процессе их эксплуатации осуществляется подвод жидкости или газа к поверхности ПФМ или отвод их от нее. Распределители потоков используются при пневмотранспорте сыпучих сред, аэрации жидкостей для их перемешивания или насыщения газами, в качестве элементов пористого охлаждения или нагрева, газораспределительных решеток для создания кипящего или псевдоожиженного слоя, аэростатических или гидростатических подшипников, в которых отсутствует соприкосновение трущихся поверхностей, огнепреградителей для локализации распространения пламени, глушителей шума и др. Как правило, в процессе эксплуатации таких ПФМ хотя и не ставится задача фазоотделения от посторонних включений определенных размеров, тем не менее, в процессе эксплуатации с помощью распределителей потоков осуществляется решение и этой проблемы, что, соответственно, уменьшает срок службы и приводит к необходимости регенерации таких материалов. Последнее во многом сближает эти два класса ПФМ – фильтры и распределители потоков [2].

В работе [2] на основании анализа источников [19–27] были сформулированы основные требования к ПФМ:

а) ПФМ должны обладать высокой проницаемостью при заданном размере пор и высокой тонкостью фильтрования. Очевидно, что чем выше проницаемость, тем более эффективно и рационально осуществляется использование ПФМ. В этом случае, например, при меньшем перепаде давления, может быть осуществлено

пропускание необходимого количества фильтрата, возможно уменьшение габаритов фильтрующего изделия, а следовательно, и снижение расхода материала на его изготовление; при сохранении тех же габаритов возрастает срок службы ПФМ;

б) при создании ПФМ необходимо стремиться обеспечить равномерное распределение пор по всей поверхности фильтрации. Это способствует равномерному распределению газа или жидкости по рабочей поверхности, что является необходимым и определяющим условием хорошей работоспособности распределителей жидкостных или газовых потоков, а также обеспечивает улавливание загрязнителя требуемого размера, что повышает срок службы фильтра;

в) ПФМ должны обладать высокой грязеемкостью, то есть способствовать задержанию большего количества загрязнителя при сохранении высокой проницаемости и длительности эксплуатации;

г) ПФМ должны быть коррозионно-стойкими относительно фильтруемой среды и температуры процесса, обладать необходимой механической прочностью, способностью подвергаться механической обработке, сварке, склеиванию и т. п.

Нетрудно заметить, что такие свойства, как проницаемость, распределение пор по поверхности фильтрации, грязеемкость, оптимальные значения которых могут быть достигнуты при выполнении первых трех требований, всецело определяются поровой структурой ПФМ. В то же время выполнение последнего требования может быть достигнуто соответствующим выбором химического состава порошка и природы самого материала. Если учесть, что в настоящее время освоен выпуск порошков из самых различных металлов и их сплавов [28–29], традиционно используемых в промышленности, то очевидным становится необходимость направления усилий на решение задач создания ПФМ, удовлетворяющих требованиям а)–в), другими словами, на создание материалов с улучшенными свойствами.

Далее приводятся сведения о разработанных с участием авторов процессах получения ПФМ с повышенной равномерностью распределения свойств по площади фильтрации и повышенной проницаемостью при заданном размере пор, свойства которых регулируются введением в шихту перед прессованием порообразователей.

2.2.1. Повышение равномерности порораспределения ПФМ гранулированием металлических порошков порообразователем

Регулирование свойств ПФМ при традиционном прессовании металлических порошков ограничено размерами частиц порошка и давлением прессования, а получаемые этим способом изделия имеют относительно невысокие пористость и проницаемость [10, 30, 31]. Одним из основных способов создания ПФМ с высокой пористостью и проницаемостью является введение в шихту различных порообразователей [32–36]. Этот способ позволяет создать в материале так называемую бидисперсную структуру [33, 34], состоящую из двух систем пор, существенно отличающихся по размерам пор. Первая система образована крупными порами, которые образуются в результате улетучивания добавок, вторая система образована мелкими естественными порами между частицами металлического порошка. Крупные поры, размеры которых определяются количеством наполнителя и величиной его частиц, распределены в матрице, содержащей мелкие поры, размеры которых зависят от размера частиц металлического порошка и давления прессования. Такие бидисперсные структуры можно разделить на «закрытые» и «открытые»: к первым относятся структуры, у которых крупные поры, образованные порообразователем, изолированы друг от друга порошковой матрицей и практически не влияют на среднюю и максимальную величины пор, ко вторым – у которых крупные поры образовали свою сквозную сообщающуюся систему пор и полностью определяют среднюю и максимальную величины пор. Примеры обеих структур приведены на рис. 2.14.

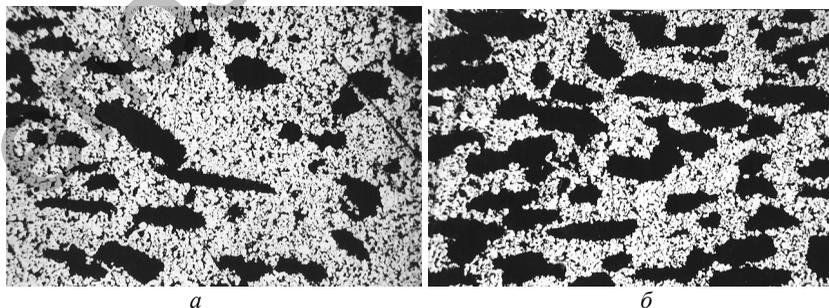


Рис. 2.14. Закрытая (а) и открытая (б) бидисперсные структуры пористых образцов

Наиболее часто на практике введение порообразователя в шихту производят путем обычного смешивания [34, 37, 38]. Однако обычное смешивание не может обеспечить равномерное распределение порообразователя по объему прессовки и, соответственно, равномерное распределение свойств по поверхности ПФМ, особенно в тех случаях, когда в силу своей химической природы плотности компонентов смеси в шихте (порообразователя и металлического порошка) различаются в 5–6 раз [39]. Кроме того, низкая текучесть шихты не позволяет использовать пресс-автоматы для формования пористых заготовок. Особый интерес представляет работа [40], в которой шихту с порообразователем гранулировали водными растворами связующего – 1 % раствором поливинилового спирта, что улучшило текучесть шихты и позволило применить пресс-автоматы для ее формования. Однако этот метод также не решает проблемы получения ПФМ с повышенной равномерностью распределения свойств ПФМ по поверхности фильтрации при прессовании металлических порошков с порообразователем.

Повышение равномерности распределения свойств было достигнуто путем перевода порообразователя в растворенное состояние, засыпки в подготовленный раствор металлического порошка, сушки при периодическом перемешивании, размола образовавшихся конгломератов и просеивания через сита или, другими словами, путем гранулирования металлического порошка порообразователем. Это обеспечило возможность использования пресс-автоматов, лучшие условия для хранения и транспортировки шихты. Кроме того, при таком методе гранулирования отсутствует необходимость в обеспечении определенных параметров влажности шихты для осуществления процесса прессования. Следует отметить, что предметом рассмотрения при этом были «открытые» бидисперсные структуры. Ниже приведены результаты, полученные при гранулировании порошка электролитического никеля марки ПНЭ–1. В качестве порообразователя использовали карбамид, растворителя – дистиллированную воду.

Выбор порообразователя обеспечен его доступностью, низкой стоимостью, широким применением в порошковой металлургии; выбор растворителя – его безопасностью.

Химический состав порошка приведен в табл. 2.2, гранулометрический состав порошка и насыпная плотность в табл. 2.3 [41].

Таблица 2.2

Химический состав электролитического порошка никеля ПНЭ-1

Массовая доля, %							
Никель плюс кобальт, не менее	примеси, не более						
	Углерод	Железо	Кобальт	Кремний	Кислород	Медь	Сера
99,5	0,02	0,1	0,2	0,03	0,10	0,06	0,008

Таблица 2.3

Гранулометрический состав и насыпная плотность электролитического порошка никеля марки ПНЭ-1

Гранулометрический состав, %		Насыпная плотность, г/см ³
>71 мкм	<45 мкм	
Не более 4	Не менее 30	3,4

В табл. 2.4 приведены свойства ПФМ, изготовленных из порошка никеля марки ПНЭ-1 в состоянии поставки путем одностороннего прессования и последующего спекания: давление прессования составляло 50, 75, 100, 125 и 150 МПа, спекание образцов производили в электропечи в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре спекания 950 °С в течение 1 ч.

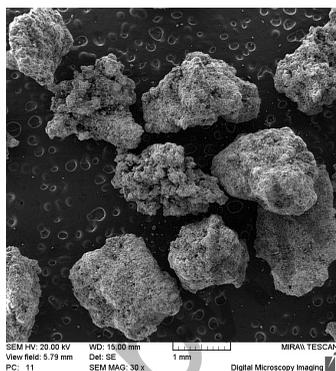
Таблица 2.4

Свойства экспериментальных образцов, изготовленных из электролитического порошка никеля ПНЭ-1

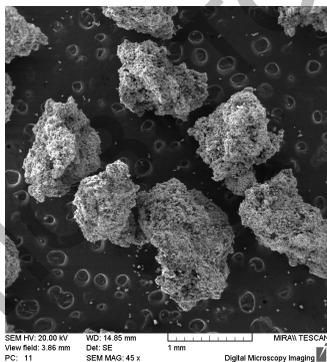
Номер образца	Давление прессования, МПа	Пористость	Коэффициент проницаемости, м ² , ×10 ¹³	Средний размер пор, мкм	Предел прочности при срезе, МПа
1	50	0,45	3,8	4,8	120
2	75	0,41	2,9	4,0	137
3	100	0,39	2,0	3,2	155
4	125	0,38	1,2	2,5	177
5	150	0,36	0,7	1,7	200

Анализ данных, приведенных в табл. 2.4, показывает, что диапазон регулирования свойств ПФМ, получаемых из выпускаемого промышленностью электролитического порошка никеля ПНЭ–1 невелик: для пористости он составляет 0,09, коэффициента проницаемости – $3,1 \times 10^{-13} \text{ м}^2$, для среднего размера пор – 3,1 мкм.

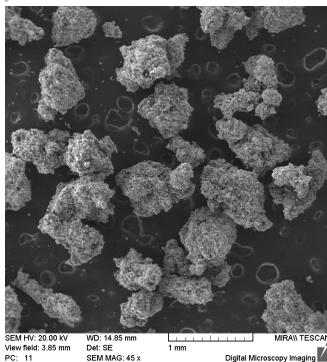
При изготовлении гранул объемное соотношение карбамида и ПНЭ–1 выдерживали 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4. Гранулы выделялись трех фракций: (минус 2,0+1,0), (минус 1,0+0,63) и (минус 0,63+0,2) мм, внешний вид гранул приведен на рис. 2.15.



a



б



в

Рис. 2.15. внешний вид гранул:
a) размер гранул (минус 2,0+1,0) мм;
б) размер гранул (минус 1,0+0,63) мм;
в) размер гранул (минус 0,63+0,2) мм

С целью оценки равномерности распределения порошка никеля в гранулах различных размеров из контейнеров, где хранились рас-сеянные гранулы, с пяти различных уровней по глубине было взято по 5 навесок массой 50 г, из которых затем путем двухступенчатого отжига в вакуумной печи при температурах 250 °С (3 ч) и 500 °С (3 ч) был удален порообразователь, произведено повторное взвешивание и определено количество удаленного порообразователя. Результаты измерений приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Масса порообразователя в навеске шихты массой 50 г, г

Номер образца	Размер частиц гранул, мм		
	(минус 2,0+1,0)	(минус 1,0+0,63)	(минус 0,63+0,2)
1	6,46	6,64	6,48
2	6,46	6,7	6,63
3	6,7	6,71	6,6
4	6,53	6,5	6,6
5	6,49	6,55	6,52

Анализ полученных данных показал, что гранулы всех фракций по раздельности и в совокупности по всем размерам гранул отличаются высокой стабильностью содержания порообразователя: коэффициент вариации в первом случае не превышает 1,4 %, во втором составляет 1,3 %. Это весьма важно для практического применения предложенного метода, так как дает возможность не разделять гранулы на более узкие фракции, используя лишь сита с размерами ячеек 0,2 и 2,0 мм.

Изготовление ПФМ из металлических порошков включает в общем случае следующие основные стадии: подготовку шихты, формование заготовки и спекание изделия.

Процесс подготовки шихты включает в себя растворение мочевины в дистиллированной воде, смешивание полученного раствора с порошком никеля, сушку шихты, ее размол и рассев. Поскольку для проведения исследований выбран один состав исходного металлического порошка (порошок никеля ПНЭ–1 в состоянии поставки),

влияние размера частиц порошка на свойства ПФМ не исследовалось. Очевидно, что основным технологическим параметром, влияющим на свойства получаемого ПФМ, на данной стадии процесса является объемное соотношение между порошком мочевины и никеля: $V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$. Следует также предположить, что существенное влияние на свойства готового ПФМ окажут и размеры гранул $D_{\text{гр}}$.

Для изучения влияния $V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$ и $D_{\text{гр}}$ на свойства ПФМ готовили шихту шести составов $V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$ (0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 и 1,4), причем при изготовлении гранул каждого состава ситовым методом были выделены три фракции с размерами частиц (минус 0,315+0,1), (минус 0,63+0,315) и (минус 1,0+0,63) мм.

Для приготовления раствора мочевины на 1 кг мочевины использовали немногим более 1,1 и 1,2 литра дистиллированной воды, сушку шихты производили в сушильном шкафу СНВС 4,5.4.5/ЗИ–1 при температуре 80 °С в течение 2 ч с перемешиванием через каждые 30 мин. Растворение мочевины, смешивание шихты и ее размол после сушки осуществляли вручную, рассев на фракции – на механическом лабораторном приборе зернового состава 029.

Формование заготовки производили путем прессования в пресс-форме при пяти давлениях: 50, 75, 100, 125 и 150 МПа.

Спекание ПФМ производили в электропечи в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре спекания 950 °С в течение 1 ч. Подъем температуры происходил ступенчатым образом с двумя выдержками по 40 мин каждая при температурах 150 и 400 °С.

Установление взаимосвязи между режимами процесса и свойствами ПФМ проводили с привлечением аппарата математического планирования. Матрица планирования была выбрана на основании рекомендаций, приведенных в работе [42]. В табл. 2.6 представлены кодированные и натуральные значения факторов ($V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$, $D_{\text{гр}}$, p). Средние размеры гранул, приведенные в табл. 2.6 и далее по тексту, определялись по формуле Андерсона [43]:

$$D_{\text{гр}} = \frac{D_{\text{min}} D_{\text{max}}}{\sqrt{0,5 (D_{\text{min}}^2 + D_{\text{max}}^2)}}, \quad (2.61)$$

где D_{\min} и D_{\max} – соответственно минимальные и максимальные размеры ячеек сит, используемых для выделения исследуемой фракции, м.

Таблица 2.6

Кодированные и натуральные значения факторов

Номер эксперимента	Значения факторов					
	кодированные			натуральные		
	X_1	X_2	X_3	$V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$	$D_{\text{гр}}, \text{мм}$	$p, \text{МПа}$
1	-1	-1	-1	0,4	0,1348	50
2	-1	-1	-1	0,4	0,1348	50
3	-1	-1	+1	0,4	0,1348	150
4	-1	-0,148	+1	0,4	0,3984	150
5	-1	+1	-1	0,4	0,7538	50
6	-1	+1	0	0,4	0,7538	100
7	-1	+1	+1	0,4	0,7538	150
8	0	-1	+1	0,8	0,1348	150
9	0	-0,148	0	0,8	0,3984	100
10	0	-0,148	0	0,8	0,3984	100
11	0	+1	-1	0,8	0,7538	50
12	0	+1	+1	0,8	0,7538	150
13	+1	-1	-1	1,2	0,1348	50
14	+1	-1	0	1,2	0,1348	100
15	+1	-1	+1	1,2	0,1348	150
16	+1	-0,148	-1	1,2	0,3984	50
17	+1	-0,148	+1	1,2	0,3984	150
18	+1	+1	-1	1,2	0,7538	50
19	+1	+1	0	1,2	0,7538	100
20	+1	+1	+1	1,2	0,7538	150

При проведении исследований для повышения достоверности полученных результатов изготавливалось по три образца на каждую экспериментальную точку. Затем определялись характеристики образцов. Результаты измерений сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Свойства экспериментальных образцов ПФМ

Номер эксперимента	$d_{п\ ср}$, МКМ			k , $m^2, \times 10^{13}$			П			$\sigma_{ср}$, МПа			δ		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	9,05	9,00	9,03	9,03	9,00	8,96	0,485	0,480	0,482	93	93	93	0,28	0,28	0,29
2	8,89	9,00	9,07	9,07	9,00	8,74	0,487	0,480	0,481	92	93	93	0,28	0,28	0,27
3	2,03	2,00	1,95	2,11	2,00	2,03	0,385	0,390	0,395	168	170	171	0,27	0,27	0,27
4	4,10	4,00	3,89	5,04	5,00	4,95	0,440	0,448	0,442	94	95	95	0,24	0,25	0,26
5	32,00	30,00	29,27	19,83	20,00	20,15	0,570	0,572	0,574	26	25	25	0,31	0,32	0,33
6	15,70	16,00	16,04	11,69	12,00	12,34	0,534	0,536	0,532	44	43	42	0,24	0,24	0,24
7	5,10	5,00	4,79	9,08	9,00	9,01	0,514	0,504	0,507	57	58	58	0,31	0,30	0,29
8	4,93	5,00	5,14	5,11	5,00	5,05	0,480	0,474	0,476	139	138	138	0,20	0,20	0,20
9	25,70	26,00	26,08	16,79	17,00	17,30	0,570	0,571	0,578	57	57	58	0,09	0,10	0,11
10	26,34	26,00	25,74	16,83	17,00	17,00	0,569	0,571	0,572	57	57	57	0,10	0,10	0,10
11	70,00	68,00	67,50	44,01	45,00	45,70	0,675	0,680	0,683	21	20	20	0,20	0,20	0,20
12	30,50	31,00	31,30	17,67	18,00	18,03	0,597	0,594	0,591	52	52	53	0,17	0,18	0,19
13	17,09	17,00	17,07	22,06	21,00	21,40	0,684	0,680	0,689	62	60	59	0,32	0,31	0,33
14	12,40	12,00	12,10	13,01	13,00	13,05	0,617	0,613	0,614	79	80	80	0,21	0,22	0,23
15	6,95	7,00	7,03	7,86	8,00	8,00	0,548	0,543	0,543	98	98	98	0,28	0,28	0,28
16	54,50	56,00	57,08	48,76	50,00	51,24	0,734	0,730	0,735	28	28	28	0,27	0,27	0,27
17	25,70	26,00	26,10	24,89	25,00	25,03	0,625	0,620	0,621	57	58	57	0,24	0,25	0,26
18	105,0	107,0	108,1	90,57	90,00	92,04	0,814	0,800	0,823	14	13	23	0,29	0,29	0,29
19	83,30	84,00	84,11	62,70	63,00	63,15	0,749	0,743	0,749	27	27	27	0,19	0,18	0,28
20	59,80	60,00	60,12	39,80	40,00	40,09	0,721	0,700	0,705	38	38	38	0,28	0,27	0,27

На основании экспериментальных данных методом шагового регрессионного анализа были получены регрессионные зависимости параметров процесса (Π , k , $d_{п.ср}$, $\sigma_{ср}$, δ) от факторов ($V_{моч}/V_{Ni}$, $D_{гр}$, p), которые, после того как по критерию Стьюдента были отброшены незначимые коэффициенты, приняли следующий вид:

$$\begin{aligned} \Pi = & 0,5805 + 0,00997X_1 + 0,0505X_2 - 0,0441X_3 + \\ & + 0,0089X_1X_2 - 0,0109X_1X_3 + 0,0078X_2X_3; \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} k \cdot 10^{13} = & 18,38 + 16,62X_1 + 10,88X_2 - 6,64X_3 + 10,43X_1X_2 - \\ & - 5,74X_1X_3 - 5,08X_2X_3 - 4,13X_1X_2X_3 + 4,76X_{12} + 3,54X_{12}X_2; \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} d_{п.ср} = & 28,93 + 19,84X_2 + 17,06X_1 + 14,9X_1X_2 - 13,43X_3 - \\ & - 6,91X_2X_3 - 3,24X_1X_3 - 2,39X_1X_2X_3 + 1,99X_1X_{22} + 1,7X_{22}X_3; \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ср} = & 51,85 - 35,68X_2 + 22,13X_3 - 10,53X_1 + 20,74X_{22} + \\ & + 9,08X_1X_2 - 7,24X_2X_3 - 5,92X_1X_3 + 3,94X_1X_2X_3 - 6,49X_1X_{22}; \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 0,0958 + 0,0905X_{12} + 0,0737X_{32} + 0,0312X_{22} - 0,0132X_1X_2 - \\ & - 0,0104X_3 + 0,0148X_{12}X_2 - 0,0203X_2 + 0,0042X_1X_2X_3 - 0,0155X_1. \end{aligned} \quad (2.66)$$

Характер полученных зависимостей Π , k , $d_{п.ср}$, $\sigma_{ср}$ и δ от давления прессования и объемного отношения мочевины к порошку никеля при фиксированном значении размера гранул, равном 0,3984 (фракция (минус 0,63+0,315) мм), графически отображен на рис. 2.16–2.20.

Для сравнения равномерности распределения локальной проницаемости по площади фильтрации ПФМ, изготовленных по предлагаемому и известному способам, методом обычного смешивания порошка никеля ПНЭ-1 в состоянии поставки и мочевины с размером частиц менее 0,16 мм при различных давлениях прессования (50, 75, 100, 125 и 150 МПа) были изготовлены образцы ПФМ. При этом для уменьшения влияния сегрегации на равномерность распределения порообразователя по объему шихты в последнюю

добавляли уайт-спирит в количестве 1,5 % по отношению к массе мочевины, отношение $V_{\text{моч}}/V_{\text{Ni}}$ составляло 0,8, спекание производили в электрической печи изготовления ГНУ ИПМ при температуре 950 °С в течение 1 ч с двумя выдержками по 40 мин при температурах 150 и 400 °С в среде диссоциированного аммиака. Результаты измерения свойств полученных образцов приведены в табл. 2.8.

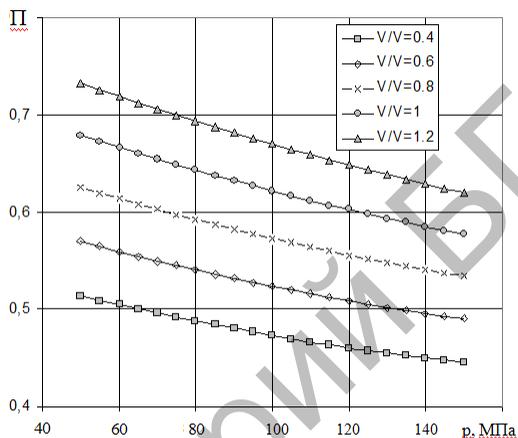


Рис. 2.16. Зависимость пористости от давления прессования

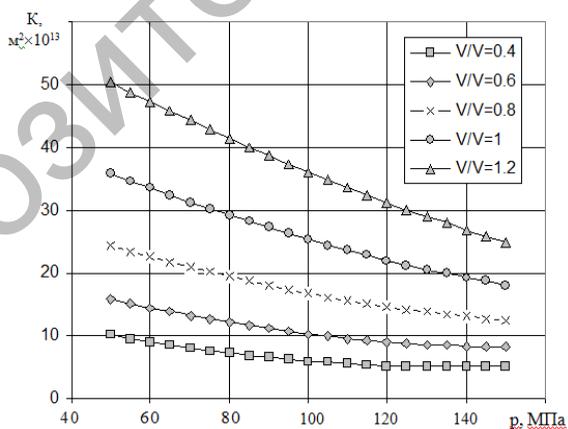


Рис. 2.17. Зависимость коэффициента проницаемости от давления прессования

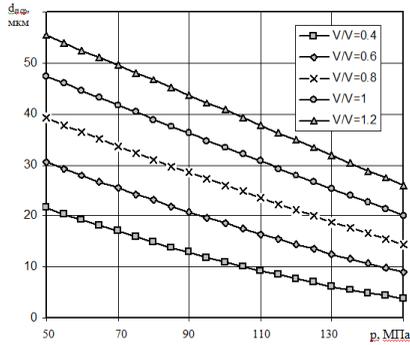


Рис. 2.18. Зависимость размера средних пор от давления прессования

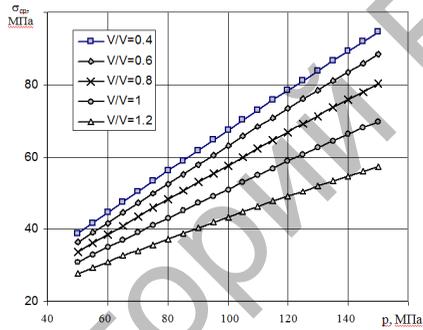


Рис. 2.19. Зависимость предела прочности при срезе от давления прессования

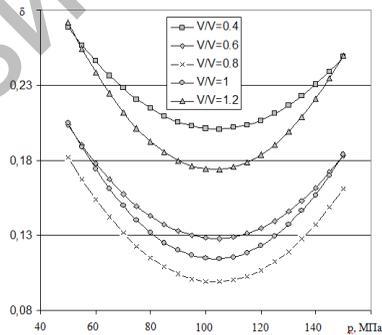


Рис. 2.20. Зависимость коэффициента вариации локальной проницаемости от давления прессования

Таблица 2.8

Свойства экспериментальных образцов, изготовленных по известному способу

Номер образца	Давление прессования, P , МПа	Пористость, %	Средний размер пор, $d_{п. ср}$, мкм	Коэффициент проницаемости, k , $m^2, \times 10^{13}$	Коэффициент вариации, δ
1	50	66	41	25	0,45
2	75	62	36	20	0,35
3	100	58	32	15	0,31
4	125	55	28	9	0,33
5	150	52	24	6	0,4

Анализ данных, представленных в табл. 2.7–2.8 и на рис. 2.16–2.20, позволяет сделать следующие выводы:

1) применение порообразователя позволяет в широком диапазоне регулировать основные свойства ПФМ: пористость от 0,38 до 0,82, средний размер пор от 2 до 108 мкм, коэффициент проницаемости от 2×10^{-13} до $100 \times 10^{-13} m^2$;

2) равномерность распределения свойств по площади фильтрации, оцениваемая по коэффициенту вариации локальной проницаемости, у ПФМ, изготовленных по разработанному способу, более чем на 50 % выше по сравнению с ПФМ, изготовленными по известному способу.

2.2.2. Повышение равномерности порораспределения ПФМ при заданном размере пор созданием двухслойных пористых структур

Наиболее распространенными и эффективными способами повышения свойств пористых фильтрующих материалов на основе металлических порошков являются способы, направленные на создание градиентных структур, у которых размеры пор изменяются в направлении фильтрации [44–46]. Характерными представителями 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.

В работах [47–49] на примере порошков коррозионно-стойкой стали марки ПХ18Н15 рассмотрена возможность создания двух-слойных ПФМ двумя методами: поэтапным прессованием порошка одной фракции при различных давлениях прессования и совместным прессованием порошков разных фракций. В табл. 2.9 и 2.10 приведены результаты исследований свойств образцов ПФМ, у которых толщина мелкодисперсного слоя составляла 1 мм, крупнодисперсного (подложки) – 2 мм.

Таблица 2.9

Свойства ПФМ из порошков разных фракций

Номер образца	D_{r_1} , мм	D_{r_2} , мм	p , МПа, $\times 10^{-2}$	$d_{п.ср}$, мкм	k , м ² , $\times 10^{13}$
1	0,063	0,477	1,3	3,12	1,8
2	0,063	0,477	1,0	5,73	5,5
3	0,063	0,477	0,9	7,17	8,0
4	0,063	0,477	0,8	7,83	9,5
5	0,063	0,477	0,7	8,15	10,2
6	0,063	0,477	0,6	10,27	15,0
7	0,063	0,477	0,5	11,01	17,4
8	0,063	0,477	0,4	11,31	17,8
9	0,063	0,477	0,3	12,97	22,3
10	0,063	0,477	0,2	13,65	24,8
11	0,063	0,238	1,3	3,01	1,5
12	0,063	0,238	1,0	5,57	4,7
13	0,063	0,238	0,9	7,03	6,1
14	0,063	0,238	0,8	7,67	8,3
15	0,063	0,238	0,7	7,97	8,8
16	0,063	0,238	0,6	10,02	12,8
17	0,063	0,238	0,5	10,83	14,1
18	0,063	0,238	0,4	11,05	14,6
19	0,063	0,238	0,3	12,77	18,1
20	0,063	0,238	0,2	13,12	19,0

Таблица 2.10

Свойства двухслойных ПФМ, полученных из порошка одной фракции

Номер образца	D_r , мм	$P_1 \cdot 10^{-2}$, МПа	$P_2 \cdot 10^{-2}$, МПа	$d_{п.ср.}$, мкм	$k \cdot 10^{13}$, м ²
1	0,238	1,9	0,9	4,21	2,74
2	0,238	1,7	1,2	6,71	6,1
3	0,238	1,5	0,7	9,17	9,6
4	0,238	1,3	0,6	11,23	12,9
5	0,238	1,0	0,7	16,03	19,9
6	0,238	0,9	0,6	18,57	23,2
7	0,238	0,7	0,5	23,49	30,2
8	0,477	1,9	0,9	5,32	4,6
9	0,477	1,7	1,2	7,09	7,4
10	0,477	1,5	0,7	10,23	13,1
11	0,477	1,3	0,6	13,07	18,8
12	0,477	1,0	0,7	17,19	28,4
13	0,477	0,9	0,6	21,03	37,4
14	0,477	0,7	0,5	27,14	50,7

Из приведенных данных (табл. 2.9) видно, что свойства двухслойных ПФМ в большей степени зависят от размера частиц мелкой фракции и давления прессования. Использование в качестве крупнопористого слоя порошков двух фракций с разным размером частиц дает только небольшое различие в коэффициенте проницаемости, в то время как изменение давления прессования приводит к уменьшению размера пор и проницаемости в несколько раз.

При использовании одной фракции (табл. 2.10) наблюдается также изменение свойств ПФМ в зависимости от давления прессования, причем эти изменения (особенно коэффициента проницаемости) более резко выражены для фракции со средним размером частиц порошка 0,238 мм.

Оценку эффективности полученных ПФМ проводили по параметру эффективности E_1 , равному отношению корня квадратного из коэффициента проницаемости к среднему размеру пор $d_{п.ср.}$

Результаты расчетов приведены на рис. 2.21 и 2.22 в виде зависимости параметра эффективности от среднего размера пор. Как видно из рис. 2.21, для двухслойных ПФМ лучшей эффективностью обладает материал, образованный фракциями с большим соотношением D_{r_2} / D_{r_1} . При этом до значения $d_{п.ср} = 4,4$ мкм однослойный материал имеет более высокую эффективность по сравнению с двухслойным ПФМ, а также изделиями, у которых $D_{r_2} / D_{r_1} = 7$. Для ПФМ, у которых отношение $D_{r_2} / D_{r_1} = 3$, аналогичное значение средней величины пор составляет 7,6 мкм. Это объясняется возникновением на границе слоев «зоны перекрытия». Эта «зона» имеет наименьшую, по сравнению с прилегающими слоями, пористость, что приводит к увеличению перепада давления на образце и уменьшению коэффициента проницаемости и параметра эффективности. Точка пересечения кривых 2 и 3 (рис. 2.21) с кривой 1 определяет критическую величину давления прессования при его увеличении, когда влияние «зоны перекрытия» становится определяющим.

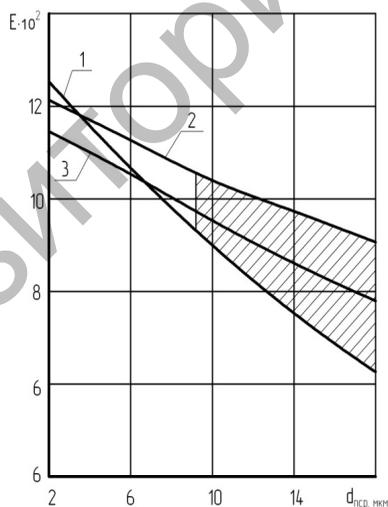


Рис. 2.21. Зависимость параметра эффективности двухслойных ПФМ из порошка разных фракций от средней величины пор:

1 – для однослойного ПФМ; 2 – при $D_{r_2} / D_{r_1} = 7$; 3 – $D_{r_2} / D_{r_1} = 3$

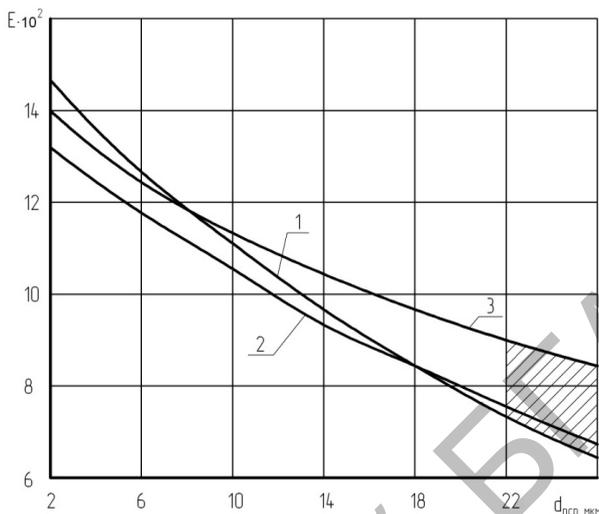


Рис. 2.22. Зависимость параметра эффективности двухслойных ПФМ из порошка одной фракции от средней величины пор:
 1 – для однослойного ПФМ; 2 – при $P_1/P_2 = 2,1$; 3 – $P_1/P_2 = 1,4$

Анализ полученных данных для двухслойных ПФМ, полученных из порошка одной фракции при различных давлениях (рис. 2.22), показывает, что лучшей эффективностью обладает двухслойный материал, полученный при прессовании с большим отношением давлений P_1/P_2 , где P_1 – давление прессования слоя, определяющего тонкость очистки образца, P_2 – давление повторного прессования. Таким образом, лучшей эффективностью при заданной величине пор, обладает материал, изготовленный из более крупной фракции порошка.

При этом до значения $d_{п.ср} = 7,2$ мкм однослойный материал имеет более высокую эффективность по сравнению с двухслойным, у которого отношение $P_1/P_2 = 2,1$. Для ПФМ, у которого отношение $P_1/P_2 = 1,4$, аналогичное соотношение составляет 17,6 мкм. Это объясняется возникновением на границе слоя зоны с пониженной проницаемостью. Однако если в случае получения двухслойных ПФМ из порошков разных фракций «зона перекрытия» образовалась вследствие заполнения порового пространства крупных частиц частицами порошка более мелкой фракции, то во втором случае слой

с пониженной проницаемостью образовался за счет трения на границе порошок–пуансон при прессовании первого слоя.

Точка пересечения кривых 2 и 3 (рис. 2.22) и кривой 1 определяет критическую величину давления прессования первого слоя, когда влияние слоя с пониженной проницаемостью становится определяющим. С практической точки зрения, применение двухслойного материала из порошка разных фракций и порошка одной фракции становится целесообразным, когда его параметр эффективности на 15 % больше параметра эффективности однослойного материала, что отражено на рис. 2.21 и 2.22 в виде заштрихованной области.

Таким образом показано, что изготовление двухслойных ПФМ из порошков разных фракций позволяет получить фильтрующие материалы с повышенным комплексом свойств. При этом следует стремиться к использованию порошков с большим соотношением средних размеров частиц применяемых фракций, а прессование производить при низких давлениях прессования. Так, параметр эффективности двухслойных ПФМ, полученных совместным прессованием фракций (минус 0,1+0,05) и (минус 0,63+0,4) мм при давлении 20...80 МПа, на 15...30 % выше по сравнению с однослойными материалами, имеющими одинаковую тонкость очистки.

Для двухслойных ПФМ из порошка одной фракции следует стремиться к использованию порошков с более крупными размерами частиц. Процесс прессования желательно проводить при относительно небольших давлениях прессования первого слоя. Так, параметр эффективности двухслойных ПФМ, полученных ступенчатым прессованием порошка фракции (минус 0,63+0,4) мм при давлении прессования первого слоя 1,1...0,7 МПа, на 15...46 % выше по сравнению с однослойными материалами, имеющими одинаковую тонкость очистки.

Однако при формировании 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 [50, 51]. Одним из эффективных путей повышения свойств двухслойных ПФМ является уменьшение толщины мелкодисперсного слоя [51–55]. В этом плане представляют интерес методика и результаты расчетов влияния зоны перекрытия

на свойства двухслойных ПФМ, представленных в работе [55] и приведенные далее.

При получении двухслойных материалов путем совместного формирования 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 рис. 2.23 и 2.24 проиллюстрированы примеры образования таких структур при получении двухслойных материалов на основе порошков титана и меди. Определим влияние зоны перекрытия на проницаемость двухслойных ПФМ.

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.

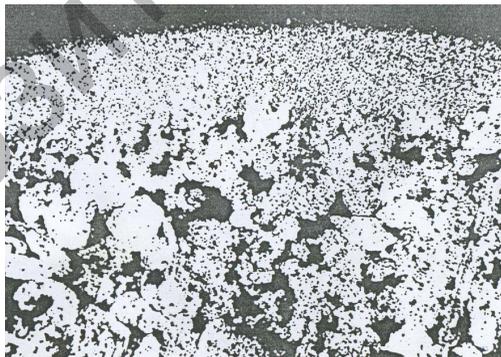


Рис. 2.23. Структура двухслойного ПФМ, изготовленного из порошков титана с размером частиц (минус 1000+400) и (минус 100+40) мкм

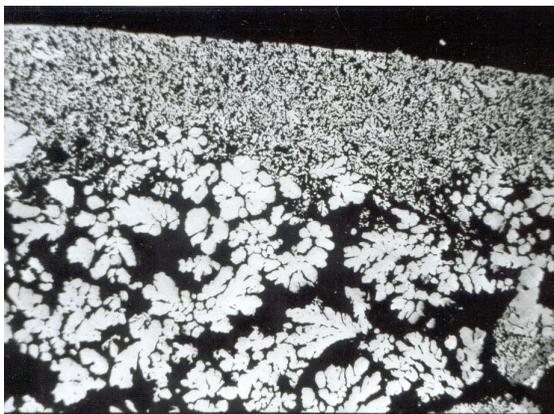


Рис. 2.24. Структура двухслойного ПФМ, изготовленного из порошков меди с размерами частиц (минус 315+200) и (минус 80+40) мкм

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

$$Q = \frac{k\Delta p}{\mu h} S, \quad (2.67)$$

где k – коэффициент проницаемости, м^2 ;
 Δp – перепад давления на ПФМ, Па;
 μ – вязкость фильтруемой среды, Па·с;
 h – толщина ПФМ, м;
 S – площадь фильтрации, м^2 .

Для каждого слоя в отдельности выражение (2.67) можно записать следующим образом:

$$Q_1 = \frac{k_1\Delta p_1}{\mu h_1} S; \quad (2.68)$$

$$Q_{12} = \frac{k_{12}\Delta p_{12}}{\mu h_{12}} S; \quad (2.69)$$

$$Q_2 = \frac{k_2 \Delta p_2}{\mu h_2} S, \quad (2.70)$$

где Δp_1 , Δp_{12} , Δp_2 – соответственно перепады давления на каждом из слоев с толщинами h_1 , h_{12} , h_2 , Па;

S – площадь фильтрации всех слоев: первого слоя (подложки); промежуточного слоя (зоны перекрытия) и второго слоя (из мелкодисперсного порошка), м².

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

$$Q = Q_1 = Q_{12} = Q_2, \quad (2.71)$$

а перепад давления на ПФМ и его толщина составляют

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_{12} + \Delta p_2; \quad (2.72)$$

$$h = h_1 + h_{12} + h_2. \quad (2.73)$$

На основании (2.67)–(2.70) с учетом (2.71)–(2.73) можно получить следующие уравнения:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{kh_1}{k_1 h}, \quad (2.74)$$

$$\frac{\Delta p_{12}}{\Delta p} = \frac{kh_{12}}{k_{12} h}, \quad (2.75)$$

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p} = \frac{kh_2}{k_2 h}. \quad (2.76)$$

Суммируя левые и правые части уравнений (2.74)–(2.76), получаем выражение для расчета k :

$$1 = \frac{kh_1}{k_1 h} + \frac{kh_{12}}{k_{12} h} + \frac{kh_2}{k_2 h}, \quad (2.77)$$

откуда

$$k = \frac{h}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_{12}}{k_{12}} + \frac{h_2}{k_2}}. \quad (2.78)$$

Для определения коэффициента проницаемости в зоне перекрытия воспользуемся следующими соображениями. Из процесса фильтрации этого слоя исключены участки поверхности, блокированные 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 (2.71) величину Q_{12} можно представить в виде

$$Q_{12} = \frac{k_2 \Delta p_{12}}{\mu h_{12}} S_{12}. \quad (2.79)$$

Приравняв правые части выражений (2.69) и (2.79) друг к другу, получим

$$k_{12} = k_2 \frac{S_{12}}{S}. \quad (2.80)$$

Для расчета величины S/S_{12} воспользуемся моделью элементарной ячейки, рассмотренной в [10]. Тогда величина S_{12} в пределах такой ячейки изменяется от минимального значения, равного

$$S_{12\min} = D_1^2 - \frac{\pi}{4} D_1^2, \quad (2.81)$$

до максимального значения

$$S_{12\max} = D_1^2. \quad (2.82)$$

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

$$S_{12\text{cp}} = D_1^2 - \frac{\pi}{8} D_1^2. \quad (2.83)$$

Если учесть, что

$$S = D_1^2, \quad (2.84)$$

то

$$\frac{S}{S_{12}} = \frac{1}{1 - \frac{\pi}{8}}. \quad (2.85)$$

Полученные выражения (2.77), (2.80) и (2.81) позволяют рассчитать коэффициент проницаемости двухслойного ПФМ с учетом зоны перекрытия между слоями, зная значения коэффициентов проницаемости подложки и мелкодисперсного слоя.

В табл. 2.11 приведены результаты расчетов коэффициентов проницаемости ПФМ для двухслойных материалов, структуры которых приведены на рис. 2.23 и 2.24, и их экспериментальные значения. Значения коэффициентов проницаемости подложки и мелкодисперсного слоя и толщины слоя перекрытия определены экспериментально.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, во-первых, удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных, 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 2.11

Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов проницаемости двухслойных ПФМ

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

На рис. 2.25 приведены расчетные зависимости коэффициентов проницаемости двухслойных ПФМ на основе порошков титана 1 и меди 2 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.

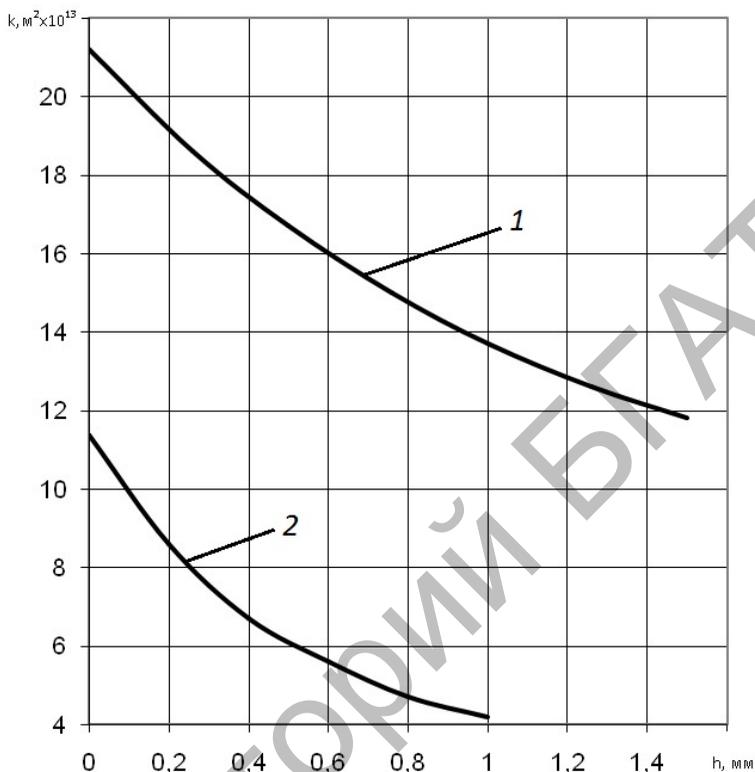


Рис. 2.25. Зависимость коэффициента проницаемости двухслойного ПФМ от толщины мелкодисперсного слоя:
 1 – ПФМ на основе титана; 2 – на основе меди

На основании вышеизложенного можно констатировать, что в работе [52] получено выражение для расчета коэффициента проницаемости двухслойных ПФМ с учетом зоны перекрытия, удовлетворительно согласующееся с экспериментальными данными; показано негативное влияние этой зоны на коэффициент проницаемости пористого материала, который вследствие ее наличия снижается более чем в 1,46 раза и установлено, что это влияние может быть компенсировано уменьшением слоя мелкодисперсного порошка, то есть подтверждена эффективность предложенного метода создания двухслойных ПФМ.

Задача уменьшения толщины мелкодисперсного слоя была решена путем разработки технологии, основанной на совместном прессовании крупнодисперсного и мелкодисперсного порошков, причем мелкодисперсный порошок был предварительно нанесен с помощью связующего (парафина) на один из формообразующих элементов [53, 1, 56, 57].

Количество наносимого на формообразующий элемент парафина должно составлять $0,012 \dots 0,016$ г на 1 см^2 его поверхности: при количестве менее $0,012 \text{ г/см}^2$ парафин не покрывает равномерно поверхность формообразующего элемента, имеют место непокрытые или недостаточно покрытые парафином участки, что ухудшает равномерность распределения проницаемости при заданном размере пор (хотя проницаемость может незначительно увеличиться, однако материал в этом случае характеризуется уже более крупными порами). При количестве парафина более $0,016 \text{ г/см}^2$ он не покрывает равномерно формообразующий элемент, наблюдаются «наплывы» парафина, что приводит, во-первых, к неравномерной толщине мелкодисперсного слоя, во-вторых, к ее увеличению, что снижает проницаемость получаемого ПФМ и ухудшает равномерность распределения проницаемости по его поверхности (площади фильтрации). Кроме того, повышенное содержание парафина приводит к увеличению в местах «наплыва» максимальных размеров пор.

С целью уменьшения количества экспериментов, исследования проводили с привлечением аппарата математического планирования, определяя функциональные зависимости свойств от технологических факторов в виде регрессионных уравнений. Матрица планирования была выбрана на основании рекомендаций, приведенных в работе [58]. В табл. 2.12 представлены кодированные и натуральные значения факторов: размеров частиц мелкодисперсного и крупнодисперсного порошков ($D_{\text{ч}}^{\text{м}}$ и $D_{\text{ч}}^{\text{кп}}$), давления прессования (p).

При проведении исследований для повышения достоверности полученных результатов изготавливалось по три образца на каждую экспериментальную точку. В табл. 2.12 представлены свойства экспериментальных образцов, пористость (Π), коэффициент проницаемости (k), размер пор средних и максимальных ($d_{\text{п. ср}}$, $d_{\text{п. макс}}$), предел прочности при срезе ($\sigma_{\text{ср}}$), полученные в ходе исследований.

Таблица 2.12

Кодированные и натуральные значения факторов и свойства экспериментальных образцов

Значения факторов						Свойства экспериментальных образцов ПФМ				
кодированные			натуральные							
X_1	X_2	X_3	p , МПа	$D_{ч}^M$, мкм	$D_{ч}^{KP}$, мкм	Π	k , $M^2 \cdot \times 10^{13}$	$d_{п. макс}$, мкм	$d_{п. ср}$, мкм	$\sigma_{ср}$, МПа
-1	-1	-1	29,4	50,6	349,9	0,563	235,6	33,9	30,2	26,60
-0,483	0,099	1	59,8	119,9	753,8	0,505	205,0	67,8	45,7	63,40
0,017	1	-0,368	89,2	176,7	477,6	0,439	69,8	45,7	38,5	84,20
0,500	1	1	117,6	176,7	753,8	0,420	79,5	44,8	35,1	125,60
1	0,099	1	147,0	119,9	753,8	0,394	48,6	21,2	18,3	170,70
1	-1	-0,368	147,0	50,6	477,6	0,381	29,6	16,2	12,0	169,50
0,500	-1	-1	117,6	50,6	349,9	0,400	42,4	19,4	14,4	120,90
0,017	0,099	-1	89,2	119,9	349,9	0,427	50,9	36,2	28,3	88,40
-0,483	1	-1	59,8	176,7	349,9	0,472	94,4	70,2	52,1	48,60
-1	1	1	29,4	176,7	753,8	0,581	556,7	93,6	72,8	29,04
-1	0,099	-0,368	29,4	119,9	477,6	0,572	411,6	89,4	63,4	25,20
-0,483	-1	-1	59,8	50,6	349,9	0,482	87,3	25,2	20,5	67,05
0,017	-1	1	89,2	50,6	753,8	0,455	80,3	23,7	16,0	116,80
0,500	0,099	-0,368	117,6	119,9	477,6	0,417	59,2	29,7	23,8	130,90
1	1	-1	147,0	176,7	349,9	0,362	27,9	31,2	24,5	166,30

В результате регрессионного анализа, выполненного в [59], методом пошагового исключения статистически незначимых коэффициентов регрессии из общей модели следующего вида:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{111}X_1^3, \quad (2.86)$$

где Y – измеряемые параметры;

X – нормированные на отрезке ± 1 варьируемые факторы (см. табл. 2.12);

B – коэффициенты регрессии.

Были получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимости свойств ПФМ от режимов изготовления:

$$\Pi = 0,451 - 0,076X_1 - 0,003X_2 + 0,013X_3 + 0,032X_1^2 - 0,008X_3^2 - 0,021X_1^3; \quad (2.87)$$

$$k = 11,7 + \exp(4,3229 - 0,9114X_1 + 0,1029X_2 + 0,3396X_3 + 0,4075X_1^2 - 0,2456X_2^2 - 0,4633X_3^2); \quad (2.88)$$

$$d_{\text{макс}} = 16,2 + \exp(3,0849 - 1,2320X_1 + 0,9720X_2 + 0,2002X_3 + 0,4506X_1X_2 + 0,1918X_2X_3 - 0,4900X_2^2); \quad (2.89)$$

$$d_{\text{п.ср}} = 10,9 + \exp(2,9150 - 1,0120X_1 + 0,8788X_2 + 0,0556X_3 + 0,3486X_1X_2 - 0,3852X_2^2); \quad (2.90)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = 96,2 + 70X_1 - 5,9X_2 + 5,7X_3. \quad (2.91)$$

На рис. 2.26 приведена структура и внешний вид поверхности двухслойного ПФМ, полученного с использованием фракций (минус 80+40) и (минус 400+315) мкм при различных давлениях

прессования. Рассмотренный способ позволяет получать двухслойные ПФМ с тонкими проницаемыми слоями, толщина которых составляет около половины среднего размера частиц порошка подложки. Кроме того, при изготовлении ПФМ по предложенному способу не происходит «зализывания» пор: увеличение давления прессования приводит только к увеличению плотности упаковки мелкодисперсных частиц, что объясняется присутствием парафина, с одной стороны, выполняющим роль смазки, а с другой – препятствующим закрытию пор как наполнитель.

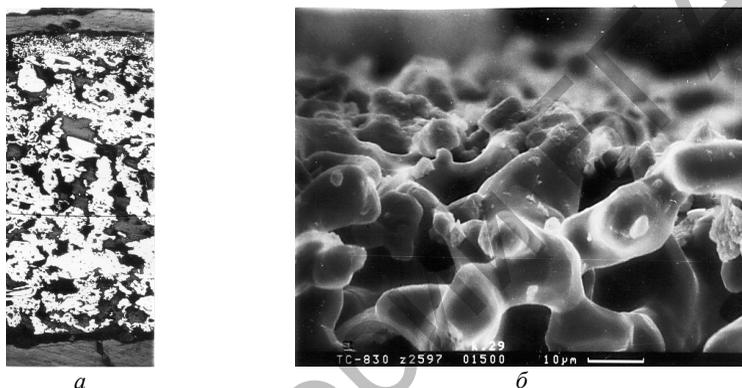


Рис. 2.26. Структура (а) и внешний вид (б) поверхности двухслойного ПФМ

Для сравнения свойств ПФМ, изготовленного по разработанному методу, с ПФМ, изготовленным известным методом совместного прессования порошков разных фракций, были дополнительно изготовлены экспериментальные образцы в виде диска диаметром 30 мм и толщиной 3 мм, состоящие из двух слоев: верхний слой толщиной 1 мм был образован фракцией (минус 80+40) мкм, нижний – фракцией (минус 1000+630) мкм. Сравнительные результаты исследования свойств приведены в табл. 2.13.

Анализ данных, приведенных в табл. 2.13, показывает, что производительность, характеризуемая коэффициентом проницаемости, разработанных двухслойных ПФМ более чем в 1,6 раза выше по сравнению с материалами, изготовленными по традиционной технологии. Разработанная технология защищена патентом Республики Беларусь [60].

Результаты исследования свойств ПФМ

Свойства ПФМ, изготовленных по традиционному методу			Свойства ПФМ, изготовленных по разработанному методу		
k , $\text{м}^2, \times 10^{13}$	$d_{\text{п. ср.}}$, мкм	$d_{\text{п. макс.}}$, мкм	k , $\text{м}^2, \times 10^{13}$	$d_{\text{п. ср.}}$, мкм	$d_{\text{п. макс.}}$, мкм
16,0	12,0	14,6	26,1	12,0	19,8
42,3	15,0	18,3	74,0	15,0	18,8
69,2	20,0	24,5	124,6	20,0	25,1

Описанный способ имеет два ограничения: во-первых, он не может быть применен, когда температуры спекания используемых порошков сильно различаются, во-вторых, максимальная величина коэффициента проницаемости ограничена размером частиц, из которых изготавливается подложка.

Для расширения технологических возможностей способа с целью преодоления второго из указанных ограничений в работах [61, 62] были проведены исследования процесса получения двухслойных ПФМ, у которых подложка формировалась из дискретных волокон. При этом был решен вопрос и с преодолением первого ограничения, поскольку температуры спекания мелкодисперсного порошка и используемых для изготовления подложки волокон сильно различаются. В качестве исходных материалов при прессовании подложки из металлических волокон формообразующим элементом с нанесенным с помощью связующего слоем мелкодисперсного порошка использовали электролитический порошок меди марки ПМС-1 в состоянии поставки и дискретные волокна диаметром 0,1...0,4 и длиной 3...5 мм, полученные из отходов электротехнических производств (внешний вид исходных волокон приведен на рис. 2.27); в качестве связующего для нанесения на медные волокна с целью активации процесса их спекания порошковых медных частиц (марки ПМС-1) использовали поливиниловый спирт. Как и в предыдущем случае, на предварительно разогретый до температуры 65...75°C формообразующий элемент (пуансон) наносили парафин из расчета 0,014 г/см², который, расплавляясь, равномерно покрывал его поверхность. На парафин, в свою очередь, наносили слой мелкодисперсного порошка меди.



Рис. 2.27. Внешний вид медных волокон

Пуансон устанавливали в матрицу (по расположению он является нижним пуансоном) и на сформированный на нем слой (из мелкодисперсного порошка меди) насыпали слой медного волокна, покрытого с помощью связующего медными частицами. После этого устанавливали верхний пуансон. Сформированные таким образом слои прессовали при давлении 100 МПа и спекали в среде аргона в течение 1,5 ч при температуре 1000 °С с предварительной выдержкой в течение 0,5 ч при температуре 400 °С.

Эксперименты показали, что предложенная технология позволяет изготавливать путем совместного однократного прессования и спекания двухслойные порошково-волоконные пористые материалы (ПВПМ) с высоким комплексом свойств. Мелкодисперсные частицы, нанесенные на волокна, активируют процесс их спекания, позволяя получить ПВПМ с удовлетворительной прочностью. При этом было установлено, что при осуществлении процесса нанесения мелкодисперсных частиц меди на волокно необходимо соблюдать определенные соотношения между объемами поливинилового спирта (V_1) и волоконными частицами (V_2), массами медного порошка (m_1) и волокна (m_2): $V_1 / V_2 = 0,009 \dots 0,014$; $m_1 / m_2 = 0,06 \dots 0,1$.

При несоблюдении первого диапазона поливиниловый спирт не покрывает все волокна и часть порошка осыпалась (при $V_1 < 0,009$) или часть волокон склеивалась между собой, образуя комки и ухудшая свойства полученных материалов (при $V > 0,014$). При несоблюдении второго диапазона медный порошок неравномерно покрывал волокна (при $m_1 < 0,06$) или образовывались излишки

порошка, которые неравномерно распределялись по объему при прессовании, ухудшая качество ПВПМ (при $m_1 > 0,1$).

Структура полученного по описанной технологии ПВПМ, приведенная на рис. 2.28, свидетельствует о том, что толщина фильтрующего слоя не превышает 0,4 мм.

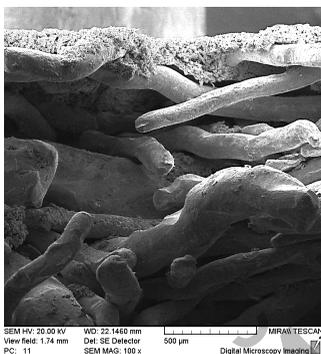


Рис. 2.28. Структура ПВПМ, изготовленного при соотношениях $V_1 / V_2 = 0,01$; $m_1 / m_2 = 0,1$

Рис. 2.29, на котором приведен внешний вид поверхности материала со стороны порошкового слоя, показывает, что на поверхности этого слоя отсутствуют следы деформации, характерные для прессования в жесткой матрице, и «зализывание» пор, что объясняется использованием парафина в качестве связующего для нанесения медного порошка на поверхность пуансона.

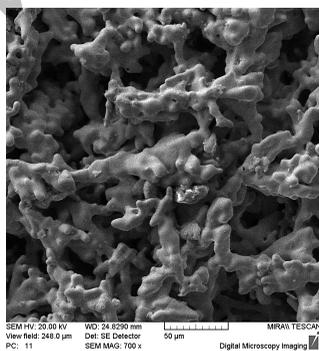


Рис. 2.29. Внешний вид поверхности ПВПМ со стороны фильтрующего слоя

В табл. 2.14 приведены характеристики разработанных и известных двухслойных материалов, сравнение которых показывает существенное (более чем в 1,6 раз) повышение проницаемости у ПВПМ.

Таблица 2.14

Характеристики экспериментальных образцов

Исходный материал		V_1 / V_2	m_1 / m_2	Коэффициент проницаемости, $k, \text{м}^2, \times 10^{13}$	Максимальная величина пор, $d_{\text{п. макс.}}$, мкм
подложки	фильтрующего слоя				
Волокно	Порошок	0,010	0,10	10,6	15,9
Волокно	Порошок	0,014	0,10	9,3	14,2
Волокно	Порошок	0,010	0,08	12,1	17,4
Порошок ПМС-1 в состоянии поставки	Порошок меди с размером частиц (минус 1000+630) мкм	–	–	5,8	16,2

Предложенная технология защищена патентом Республики Беларусь [63].

Преодоление первого из указанных выше ограничений при реализации разработанного способа получения двухслойных ПФМ, основанного на нанесении на формообразующий элемент с помощью связующего слоя мелкодисперсного порошка, может быть обеспечено при изготовлении обоих слоев из порошка одной фракции путем использования при изготовлении подложки порообразователя. Из [64, 65] известно, что одним из распространенных способов создания ПФМ с высокой пористостью и проницаемостью является введение в шихту различных порообразователей. Предложенный в работе [66] способ, включающий перевод порообразователя в раствор, смешивание его с металлическим порошком, сушку, измельчение полученной смеси на гранулы, рассев, прессование и спекание и обеспечивающий наиболее равномерное распределение по объему пористого материала структурных и гидродинамических характеристик, при нанесении перед прессованием на один из пуансонов мелкодисперсного порошка, из которого изготавливаются

гранулы, может быть использован для получения двухслойных ПФМ. На рис. 2.30 приведена структура полученного таким способом из порошка никеля марки ПНЭ-1 в состоянии поставки двухслойного материала, характеризуемого повышенным (в 1,72 раза), по сравнению с традиционным двухслойным ПФМ, коэффициентом проницаемости при одинаковой максимальной величине пор.

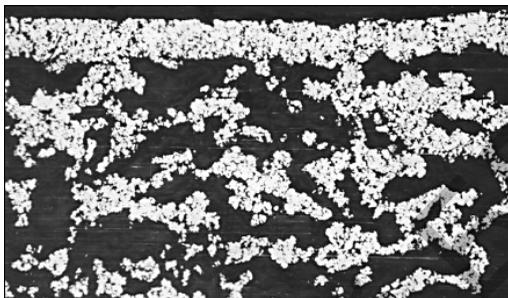


Рис. 2.30. Структура двухслойного материала из порошка никеля марки ПНЭ-1

Аналогичные результаты были получены и при изготовлении этим методом двухслойных ПФМ из сферических порошков оловянно-фосфористой бронзы марки БрОФ 10-1, гранулирование которых порообразователем обеспечивает получение подложек с регулируемым в широком диапазоне комплексом свойств [67, 68]; фотографии структур подложек приведены на рис. 2.31.

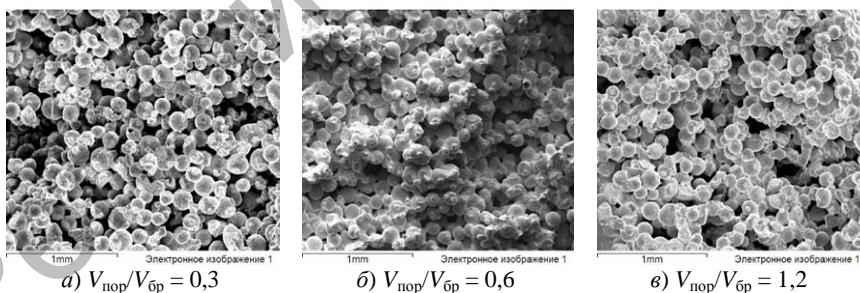


Рис. 2.31. Микроструктура образцов ПФМ, изготовленных из порошка оловянно-фосфористой бронзы фракции от (минус 315+200) мкм с различным содержанием порообразователя (карбамида) при давлении прессования 90 МПа

В работе [69] на примере ильменита обоснована возможность реализации этой же идеи для создания ПФМ на основе керамических порошков. В работе также раскрыт один из вариантов решения определенных технологических проблем: порошок ильменита в состоянии поставки не прессуется, а осуществить спекание свободной насыпкой проблематично. Для улучшения формовости при прессовании и активности при спекании исходный порошок ильменита был механически активирован путем размола в шаровом атриторе А4, затем осуществлена грануляция с использованием порообразователя, прессование двухслойной заготовки методом нанесения слоя мелкодисперсного порошка на один из формообразующих элементов при давлении 110 МПа и спекание в атмосфере воздуха при температуре 1000 °С. Полученные образцы имели субмикронные размеры пор, обладали сквозной пористостью и удовлетворительной проницаемостью. Структура материала приведена на рис. 2.32.

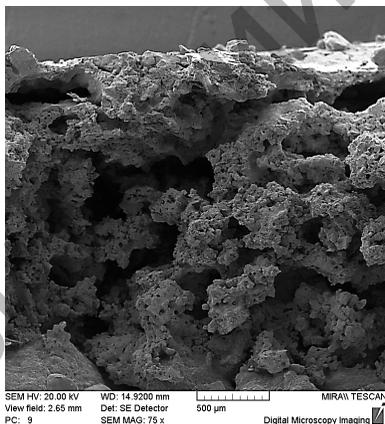


Рис. 2.32. Фотография излома экспериментального образца двухслойного ПФМ, изготовленного на основе ильменита

Разработанный метод формирования двухслойных порошковых материалов с минимальной толщиной мелкодисперсного слоя был реализован также при развитии работ в области создания градиентных пористых структур с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – это процесс перемещения волны химической реакции по смеси реагентов с образованием твердых конечных продуктов, проводимый с целью синтеза веществ материалов. СВС представляет собой режим протекания сильной экзотермической реакции (реакции горения), в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи.

На рис. 2.33 показано, как по смеси распространяется волна горения.

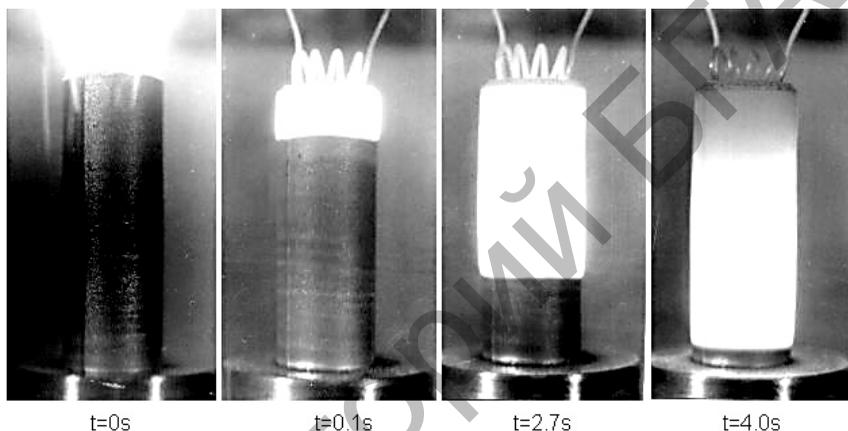


Рис. 2.33. Распространение волны горения по образцу при СВС

Особенность этого горения – отсутствие пламени, то есть газообразных продуктов горения. Исходные реагенты, промежуточные и конечные продукты реакции находятся в конденсированном (твердом или жидком) состоянии. Но не этот факт вызвал особый интерес исследователей. Самое интересное, что продукты горения представляли собой высококачественные тугоплавкие соединения. Для синтеза этих соединений традиционным печным методом требуются часы, а волна горения справляется с этой задачей за секунды. При этом не требуется ни сложного оборудования, ни больших энергозатрат. Чистота продукта ограничивается лишь чистотой исходных реагентов. В работах [70, 71] обоснован способ получения двухслойных материалов с толщиной мелкодисперсного слоя 1 мм,

при котором условия спекания одного слоя (сформованного из мелкодисперсного порошка никеля) обеспечиваются процессом СВС, протекающим в другом слое (изготовленного из крупнодисперсного порошка титана). Уменьшение толщины мелкодисперсного слоя до 0,3 мкм позволило получить пористые структуры со сквозной проницаемостью с повышенным на 47...60 % коэффициентом проницаемости при заданном размере пор [72, 73]. На рис. 2.34 приведена структура изготовленного двухслойного материала. Данный способ получения ПФМ с градиентной структурой защищен патентом Республики Беларусь [74].

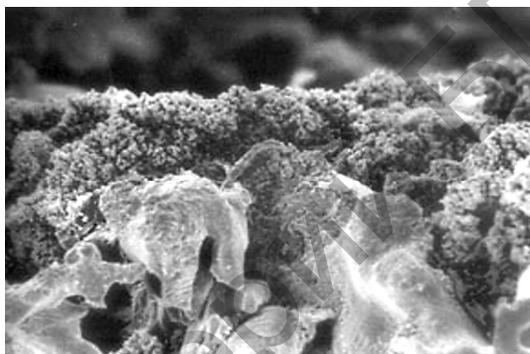


Рис. 2.34. Структура двухслойного ПФМ, изготовленного методом синтез-спекания

Один из методов, позволяющих получать двухслойные ПФМ, заключается в нанесении на пористую порошковую подложку методом ионно-плазменного напыления в вакууме тонких проницаемых покрытий [75, 76]. Однако существенная зависимость размеров пор получаемого тонкого проницаемого слоя от размеров пор подложки и столбчатый характер покрытия (рис. 2.35) не способствуют получению структур с комплексом свойств, который следовало бы ожидать от данного способа.

Для решения этой проблемы в работах [77–79] авторами исследован новый процесс создания двухслойных ПФМ, основанный на ионно-плазменном напылении в вакууме порошковой подложки с введенными в поверхностные поры порошковыми частицами удаляемого впоследствии агента.

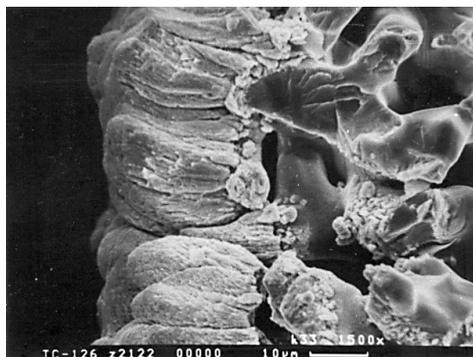


Рис. 2.35. Структура ПФМ, полученного методом ионно-плазменного напыления в вакууме без использования удаляемого агента

Исследование структуры пористых материалов осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Mira-3 фирмы Tescan (Чехия) (рис. 2.36), характеристики определяли по стандартным методикам (средний размер пор по ГОСТ 26849–86, коэффициент проницаемости по ГОСТ 25283–93, пористость по ГОСТ 18898–73).



Рис. 2.36. Сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения Mira-3 фирмы Tescan (Чехия)

Первоначально из порошка оловянно-фосфористой бронзы с размерами частиц (минус 630+400) мкм методом спекания свободной насыпкой изготавливали пористую подложку, затем с одной стороны подложки ее поверхностные поры заполняли удаляемым агентом – порошком NaCl с гранулометрическим составом (минус 40+20) мкм. Для обеспечения более качественного сцепления частиц удаляемого агента между собой и с материалом основы в качестве связующего использовали 5%-й раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в воде. Соотношение КМЦ в смеси NaCl–КМЦ составляло 4 % (объемных). Затем со стороны удаляемого агента методом ионно-плазменного напыления в вакууме на установке для нанесения вакуумных покрытий ННВ-6.6-И1 наносили медное покрытие толщиной 35 мкм, после чего NaCl удаляли и определяли средний размер пор и коэффициент проницаемости полученного образца. Внешний вид установки для нанесения вакуумных функциональных покрытий ННВ-6.6-И1 представлен на рис. 2.37.

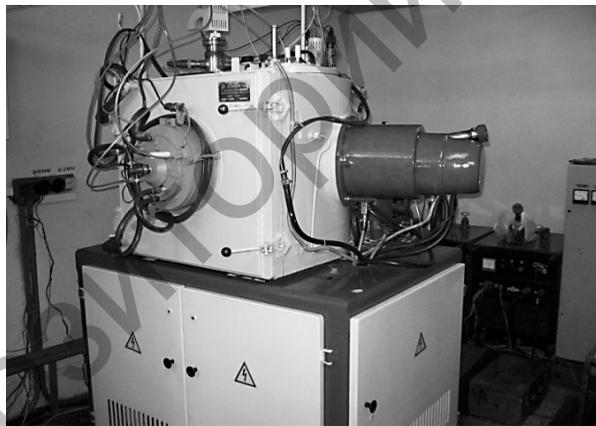


Рис. 2.37. Вакуумная установка ННВ-6,6-И1 для нанесения композиционных функциональных покрытий

Выбор материалов удаляемого агента и связующего обусловлен тем, что обрабатываемый ионно-плазменными потоками в вакууме объект должен проявлять стабильность (устойчивость к разложению, отсутствие газовой выделения и т. п.) при температурах до 200 °С, что было подтверждено исследованием поведения композиции

NaCl–KMЦ при различных температурах на воздухе. Пористая структура NaCl–KMЦ представлена на рис. 2.38.

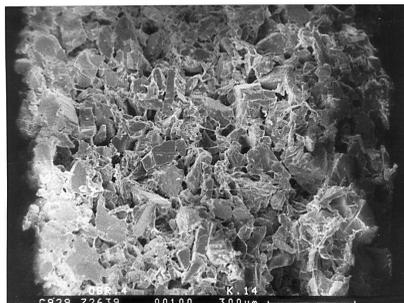


Рис. 2.38. Пористая структура NaCl–KMЦ

Основным требованием к композиции NaCl–KMЦ является наличие сквозной пористости в ее структуре и, соответственно, на поверхности, в противном случае получение эффективных двухслойных ПФМ по разрабатываемому способу будет проблематичным. Анализ структуры полученной композиции подтверждает наличие сквозной пористости (рис. 2.38). Кроме того, для подтверждения возможности использования выбранного удаляемого агента при получении методом ионно-плазменного напыления в вакууме тонкого проницаемого слоя из композиции NaCl–KMЦ путем формирования методом свободной засыпки в форму, была изготовлена подложка, на которую методом ионно-плазменного напыления был нанесен тонкий слой меди, и исследованы хрупкие изломы полученного образца (рис. 2.39–2.41).

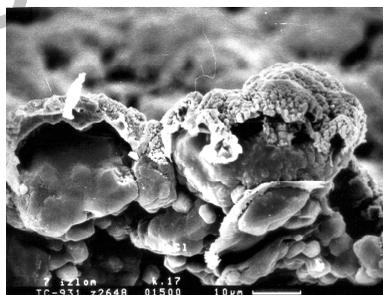


Рис. 2.39. Конфигурация покрытия на удаляемом агенте

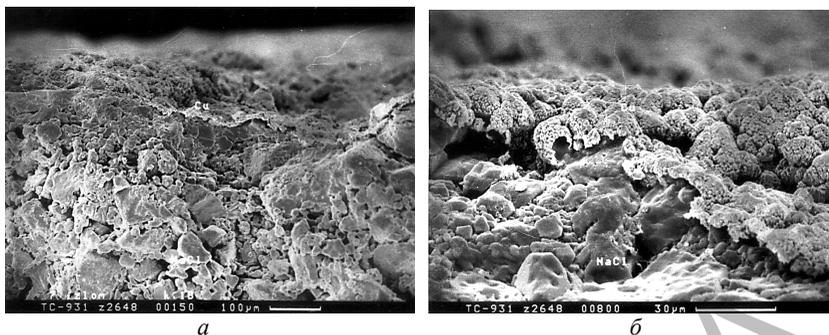


Рис. 2.40. Вид медного покрытия на композиции NaCl–КМЦ при различных увеличениях: а) $\times 150$; б) $\times 800$

Рис. 2.39 показывает конфигурацию покрытия отдельных частиц удаляемого агента напыляемым материалом (медью), который повторяет их форму, рис. 2.40 при различных увеличениях иллюстрирует наличие тонкого непрерывного напыленного слоя меди на поверхность подложки, рис. 2.41 подтверждает наличие открытых пор на поверхности подложки.

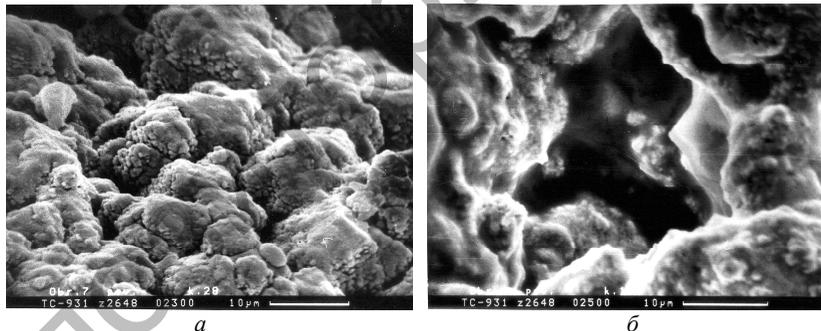


Рис. 2.41. Поровые каналы на поверхности подложки, изготовленной из композиции NaCl–КМЦ, после нанесения слоя меди при различных увеличениях: а) $\times 2300$; б) $\times 2500$

Анализ фотографий хрупких изломов, полученных по предложенному способу, экспериментальных образцов двухслойных ПФМ и их поверхности со стороны нанесенного слоя (рис. 2.42–2.47) позволяет установить, что:

а) предложенный метод позволяет получить на поверхности пористой подложки тонкое непрерывное покрытие (рис. 2.42);

б) создание тонкого слоя на поверхности пористой подложки обеспечивается, в первую очередь, использованием удаляемого агента: фотографии поверхности образца в месте трещинообразования при изломе (рис. 2.43) и излома в местах, где в процессе напыления находился удаляемый агент (рис. 2.44), свидетельствуют, что после удаления агента напыленный на его поверхность слой остается самостоятельной единицей в структуре двухслойного ПФМ, достаточно прочно связанной с пористой подложкой;

в) нанесенное на подложку покрытие имеет открытую пористость (рис. 2.45);

г) частицы напыленного слоя имеют хороший контакт с частицами подложки (рис. 2.46) и между собой (рис. 2.47).

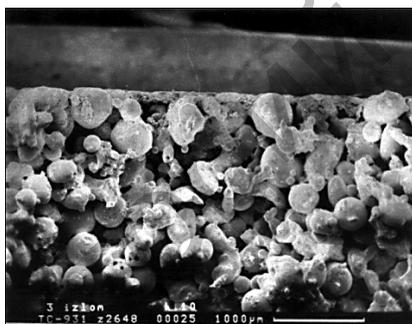


Рис. 2.42. Структура двухслойного ПФМ

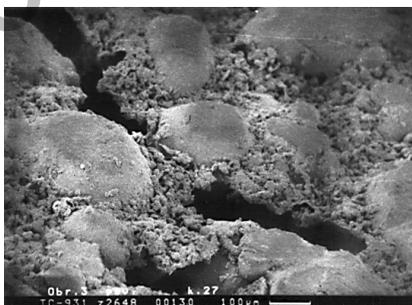


Рис. 2.43. Трещинообразование в месте излома экспериментального образца

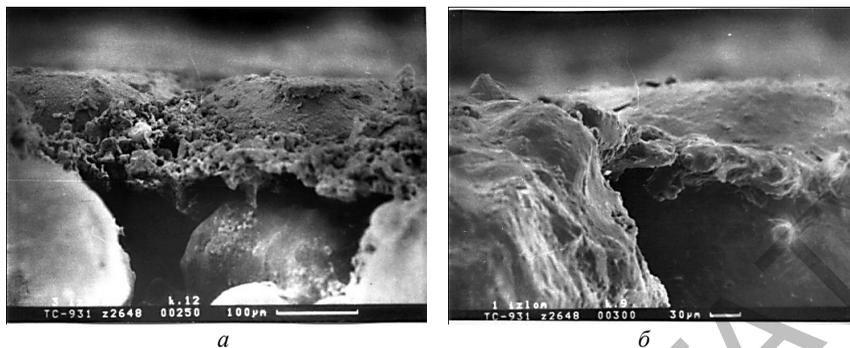


Рис. 2.44. Фрактограмма хрупкого излома экспериментального образца в области удаляемого агента при различных увеличениях: а) $\times 250$; б) $\times 300$

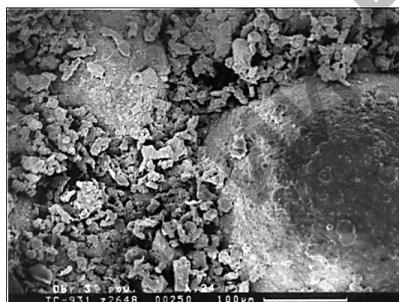


Рис. 2.45. Поверхность экспериментального образца со стороны нанесения тонкого проницаемого слоя

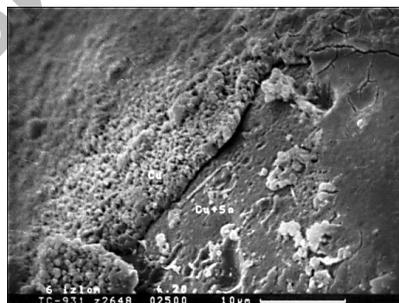


Рис. 2.46. Граница раздела между напыленным слоем и частицей подложки в месте хрупкого излома

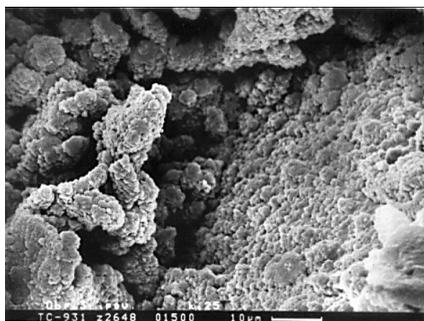


Рис. 2.47. Внешний вид покрытия на частице подложки (справа) и на удаляемом агенте (слева)

Свойства изготовленных экспериментальных образцов двухслойных ПФМ и также свойства образцов-аналогов приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Свойства двухслойных экспериментальных образцов и образцов-аналогов

Характеристики ПФМ	Технология получения ПФМ					
	Ионно-плазменное напыление в вакууме с использованием удаляемого агента		Формование порошков различных фракций		Ионно-плазменное напыление в вакууме без использования удаляемых агентов	
	Размер частиц удаляемого агента, мкм		Размер частиц мелкодисперсного слоя, мкм		Размер частиц порошка подложки, мкм	
	(минус 40+20)		(минус 200 + 160)	(минус 160 + 125)	(минус 630 +400)	(минус 400 +315)
	Размер частиц порошка подложки, мкм		Размер частиц порошка подложки, мкм			
	(минус 630 +400)		(минус 400 +315)	(минус 630 +400)	(минус 400 +315)	
Пористость, П, %	42	41	40	38	43	41
$d_{п. макс.}$, мкм	63	49	60	42	220	140
$d_{п. ср.}$, мкм	38	27	38	27	170	120
$k, м^2, \times 10^{13}$	364	350	197	172	1400	900

Анализ экспериментальных данных, представленных в табл. 2.15, позволяет констатировать, что ионно-плазменное напыление в вакууме с использованием удаляемых агентов позволяет получать двухслойные ПФМ с повышенным комплексом свойств: коэффициент проницаемости при заданном среднем размере пор у таких материалов может достигать значений в 1,85...2,00 раза больших по сравнению с двухслойными ПФМ, полученными методом формования порошков разных фракций.

Описанный способ защищен патентом Республики Беларусь [80].

Литература к главе 2

1. Кусин, Р. А. Теория и практика создания эффективных порошковых фильтрующих материалов путем необратимого деформирования пористых тел и дисперсных систем / Р. А. Кусин // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе : материалы III Междунар. симпозиума, Минск, 21–22 октября 2008 г. / ГНУ ИПМ. – Минск, 2008. – С. 158–169.

2. Витязь, П. А. Теоретический анализ закономерностей изменения размеров пор спеченных фильтрующих материалов в процессе деформирования / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск : Вышэйшая школа, 1980. – Вып. 4. – С. 64–67.

3. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – 2 изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1969. – 420 с.

4. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел / Р. Дж. Грин // Сборник переводов «Механика». – Киев, 1973. – № 4. – С. 109–120.

5. Витязь, П. А. Изменение свойств спеченных проницаемых материалов при анизотропном деформировании / П. А. Витязь [и др.] // Проблемы порошковой металлургии : материалы Всесоюз. конф., посвящ. 200-летию со дня рождения основателя порошковой металлургии П. Г. Соболевского / Редкол.: А. К. Григорьев, А. М. Вербловский. – Л. : Наука, 1982. – С. 72–74.

6. Витязь, П. А. Условие пластичности анизотропных высокопористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – 1984. – № 9 (261). – С. 1–5.

7. Vityaz, P. A. Condition of plasticity for anisotropic high-porosity P/M materials / P. A. Vityaz [et al.] // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1984. – Vol. 23, № 9. – P. 657.

8. Витязь, П. А. Изменение свойств анизотропных высокопористых материалов при деформации / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – Киев, 1985. – № 1. – С. 18–21.

9. Vityaz, P. A. Effect of deformation on the properties of anisotropic high-porosity P/M materials / P. A. Vityaz [et al.] // Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1985. – Vol. 24, № 1. – P. 17.

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

11. Витязь, П. А. Модель регулярности структуры пористых порошковых материалов / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин // Доклады Академии Наук Беларуси. – Т. 40, № 6. – 1996. – С.110–115.

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

13. Коровин, Н. В. Исследование структуры пористых никелевых электродов, изготовленных металлокерамическим способом / Н. В. Коровин, М. Е. Магдасиева, В. К. Соляков. – Порошковая металлургия. – Киев, 1966. – № 5. – С. 32–40.

14. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – М. : Наука, 1984. – 520 с.

15. Лурье, А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 940 с.

16. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.

17. Витязь, П. А. Разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния пористых порошковых систем при прессовании фильтрующих материалов с применением конечных разностей / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – 2003. – № 26. – С. 74–81.

18. Zayats, G. Modeling of Plastic Deformation of Porous Powder Materials / G. Zayats, R. Kusun, V. Kapceovich // Mathematical Modeling and Analysis. – 2003. – Vol. 8, № 4. – P. 351–360.

19. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.] – М. : Металлургия, 1993. – 240 с.

20. Капцевич, В. М. Исследование и разработка процесса регулирования порораспределения в проницаемых материалах : дис... канд. техн. наук / В. М. Капцевич ; Белорусский политехнический институт. – Минск, 1980.

21. Витязь, П. А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. – Минск : Вышэйшая школа, 1987. – 164 с.

22. Morgan, V. T. Filter Elements by powder Metallurgy / V. T. Morgan // Symposium on Powder Metallurgy. – London, 1954. – P. 81–89.

23. Hoffman, G. Eigenschaften und Anwendung Gesinterten, Korrosionslestandiger Filterwerkstoffe / G. Hoffman, L. Kapoor // Chemie-Ingenieur-Technik. – 1976. – № 5. – S. 410–416.

24. Прогнозирование свойств и оценка эффективности спеченных проницаемых материалов / П. А. Витязь [и др.] // Исследование и разработка теоретических проблем в области порошковой металлургии и защитных покрытий : материалы Всесоюзн. конф. – Минск : Бел. НИИНТИ. – 1984. – Т. 1. – С. 107–110.

25. Эффективность спеченных проницаемых материалов различного назначения / П. А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск : Вышэйшая школа, 1984. – Вып. 8. – С. 66–67.

26. Витязь, П. А. Эффективные пористые порошковые материалы и их применение в машиностроении / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег // Объединенные нации. Экономическая комиссия для Европы. – Минск : Препринт, 1985. – 11 с.

27. Брок, Т. Мембранная фильтрация / Т. Брок. – М. : Мир, 1987. – 464 с.

28. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов : информационный справочник / Отв. ред. И. М. Федорченко. – Киев : Наук. думка, 1978. – 184 с.

29. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения : справочник / И. М. Федорченко [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1985. – 624 с.

30. Витязь, П. А. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.]. – М. : Металлургия, 1993. – 240 с.

31. Роман, О. В. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы / О. В. Роман, И. П. Габриелов. – Минск : Беларусь, 1988. – 175 с.

32. Григорьев, А. К. Порошковая металлургия и применение композиционных материалов: опыт внедрения / А. К. Григорьев, Б. П. Грохольский. – Ленинград : Лениздат, 1982. – 143 с.

33. Скороход, В. В. Исследование механизма спекания высокопористых материалов в присутствии улетучивающегося порообразователя / В. В. Скороход, С. М. Солонин, Л. И. Чернышев // Порошковая металлургия. – 1974. – № 11. – С. 31–36.

34. Гутман, Ф. Л. Влияние порообразующих добавок на характеристики проницаемых материалов из спеченных порошков никеля

с бидисперсной структурой / Ф. Л. Гутман, В. А. Васьяковский // Порошковая металлургия. – 1979. – № 7. – С. 104–166.

35. Косторнов, А. Г. Особенности уплотнения смесей металлических порошков с порообразователем / А. Г. Косторнов [и др.] // Порошковая металлургия. – 1983. – № 6. – С. 10–14.

36. Капцевич, В. М. Регулирование свойств пористых порошковых материалов, полученных путем прессования с порообразователем / В. М. Капцевич [и др.] // Методы и оборудование для прессования порошков: тезисы докладов Респ. науч.-технич. конф. – Рига : Риж. политехн. ин-т., 1988. – С. 20–21.

37. Бокань, Г. А. Повышение свойств пористых материалов на основе порошков коррозионностойких сталей применением порообразователей / Г. А. Бокань [и др.] // Создание и применение высокоэффективных и наукоемких ресурсосберегающих технологий и комплексов : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 октября 2001 / МГТУ. – Могилев, 2001. – С. 19–20.

38. Бокань, Г. А. Влияние порообразователя на фильтрующие свойства порошковых материалов из латуни / Г. А. Бокань [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2004 г. / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2004. – С. 152–153.

39. Влияние совместного размола и смешивания порообразователя с металлическим порошком на структуру пористого материала / Н. Лунин [и др.] // Порошковая металлургия. – 1983. – № 4. – С. 15–18.

40. Щеколдин, С. И. Исследование структурообразования при формовании и спекании никельорганических шихт и разработка высокопористой основы оксидноникелевого электрода химических источников тока : автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. / С. И. Щеколдин. – Киев, 1992. – 19 с.

41. Порошок никелевый. Технические условия : ГОСТ 9722–97. – Взамен ГОСТ 9722–79, введ. 1.01.98. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 15 с.

42. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей : справочное издание / В. З. Бродский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982 – 752 с.

43. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 248 с.

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

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

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

47. Сорокина, А. Н. Исследование процесса получения двухслойных пористых порошковых материалов методом прессования / А. Н. Сорокина, И. В. Валькович // Новые материалы и технологии порошковой металлургии : тез. Межд. симпозиума, Минск, 19–20 марта 1997 г. – Минск, 1997. – С. 106–107.

48. 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.

49. Капцевич, В. М. Улучшение эффективности порошковых проницаемых материалов при совместном прессовании порошков разных фракций / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Р. А. Кусин // Современные технологии, материалы, машины и оборудование : материалы междунар. научно-технич. конф., Могилев, 16–17 мая 2002 г. / МГТУ. – Могилев, 2002. – С. 68–69.

50. 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, 2005 г. / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2005. – 100 с.

51. Капцевич, В. И. Влияние зоны перекрытия на проницаемость двухслойных фильтрующих материалов / В. И. Капцевич [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы

докладов 9-й междунар. науч.-технич. конф., Минск, 29–30 сентября 2010 г. / ГНУ ИПМ. – Минск, 2010. – С. 61–62.

52. Капцевич, В. М. Влияние зоны перекрытия слоев на свойства многослойных порошковых фильтрующих материалов / В. М. Капцевич [и др.] // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 2003 г. / МГТУ. – Могилев, 2003. – С. 159–161.

53. Капцевич, В. М. Новые фильтрующие материалы и перспективы их применения / В. М. Капцевич [и др.]. – БГАТУ, 2008. – 232 с.

54. Кусин, Р. А. Теория и практика создания эффективных порошковых фильтрующих материалов путем необратимого деформирования пористых тел и дисперсных систем // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе : материалы докладов Международного симпозиума 21–22 октября 2008 г. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси, Минск, 2008 г. – Минск : ГНУ ИПМ, 2008. – С. 158–169.

55. Реут, О. П. Повышение проницаемости двухслойных порошковых фильтрующих материалов, получаемых путем прессования / О. П. Реут [и др.] // Порошковая металлургия: достижения и проблемы : сб. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 сентября 2005 г. / БНТУ ; редкол. А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2005. – С. 125–127.

56. Кусин, Р. А. Оптимизация процесса получения двухслойных порошковых фильтрующих материалов при прессовании формообразующим элементом с нанесенным слоем мелкодисперсного порошка. Сообщение 1. Выбор связующего / Р. А. Кусин [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2005. – Вып. 28. – С. 228–231.

57. Кусин, Р. А. Оптимизация процесса получения двухслойных порошковых фильтрующих материалов при прессовании формообразующим элементом с нанесенным слоем мелкодисперсного порошка. Сообщение 2. Исследование и оптимизация процесса / Р. А. Кусин [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 223–228.

58. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 752 с.

59. Ильющенко, А. Ф. Исследование процесса получения тонких проницаемых слоев при создании двухслойных порошковых

фильтрующих материалов методом ионно-плазменного напыления. Сообщение 1. Обоснование выбора удаляемого агента и апробация технологии. // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр., посвящ. 80-летию со дня рождения О. В. Романа / ГНУ «Институт порошковой металлургии»; А. Ф. Ильющенко [и др.]; сост. П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2005. – Вып. 28. С. 232–237.

60. Способ получения двухслойных пористых порошковых фильтров : пат. 9898 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 22F 3/11, В 22F 7/02 / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин, И. Н. Черняк, Д. И. Жегздринь ; заявитель ГНУ «Институт порошковой металлургии». – № а 20041036 ; заявл. 2004.11.15 ; опубл. 2007.10.30 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – Минск, 2007.

61. Powder and fiber material with gradient structure / A. Ph. Ilyuchenko, V. M. Kaptsevich, R. A. Kusin, I. N. Cherniak, A. L. Ilyukevich // Euro PM 2011, Barcelona, 9–12 okt. – V. 2. – 246 s.

62. Ильющенко, А. Ф. Разработка процесса получения порошково-волокнутого фильтрующего материала на основе отходов медных волокон / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : тезисы докладов IX Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 20–21 октября 2011 г. / ГНУ НИЦПР НАНБ ; редкол.: А. И. Свириденок (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2011. – С. 6–7.

63. Республика Беларусь. Способ получения двухслойного пористого композиционного изделия : пат. 14004 Респ. Беларусь, МПК В 22F 7/02 / А. Л. Рак, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин, И. Н. Черняк, А. Р. Кусин, Д. И. Жегздринь, О. М. Боровик ; заявитель: Ин-т порошковой металлургии. – № а 20091281 ; заявл. 02.09.2009 ; опубл. 28.02.2011 // Офиц. бюл. / Национальный центр интеллектуал. собственности. – 2011.

64. Капцевич, В. М. Регулирование свойств пористых порошковых материалов, полученных путем прессования с порообразователем / В. М. Капцевич [и др.] // Методы и оборудование для прессования порошков : тезисы докладов Республиканской науч.-технич. конф. – Рига : Риж. политехн. ин-т, 1988. – С. 20–21.

65. Бокань, Г. А. Влияние порообразователя на свойства порошковых материалов из порошка коррозионностойкой стали / Г. А. Бокань [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 1999. – Вып. 22. – С. 112–115.

66. Капцевич, В. М. Повышение равномерности порораспределения фильтрующих материалов с бипористой структурой гранулированием порообразователем металлических порошков / В. М. Капцевич [и др.] // Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы докладов 8-й Междунар. науч.-технич. конф. «Новые материалы и технологии», Минск, 27–28 мая, 2008 г. – Минск : ГНПО ПМ, 2008. – С. 25–26.

67. Кусин, Р. А. Исследование процесса получения порошковых фильтрующих материалов из гранулированного порообразователем сферического порошка методом изостатического прессования / Р. А. Кусин [и др.] // Конструкции из композиционных материалов : межотраслевой науч.-технич. журнал. – М., 2006. – Вып. 4. – С. 79–82.

68. Кусин, Р. А. Порошковые фильтрующие материалы, полученные из гранулированного порообразователем сферического порошка оловянно-фосфористой бронзы путем формования с приложением давления» / Р. А. Кусин [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 167–169.

69. Кусин, Р. А. Исследование возможности создания проницаемых материалов с градиентной структурой на основе механически активированных субмикронных порошков / Р. А. Кусин [и др.] // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 9-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 29–30 сентября 2010 г. – Минск : ГНУ ИПМ, 2010. – С 75–76.

70. Vityaz, P. Composite Porous Permeable Material with Anisotropy Structure Produced by synthesis-sintering Technigue / P. Vityaz [et al.] // Proceeding of European Couference on Powder metallurgy PM 2004, Vienna, 17–21 October 2004. – P. 185–188.

71. Способ получения двухслойных пористых порошковых изделий : пат. № 9895 Респ. Беларусь, МПК В 22F 7/02, В 22F 3/11 П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. В. Беляев, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин, Г. А. Бокань ; заявитель ГНУ «Институт порошковой металлургии». – № а 20040260 ; заявл. 29.03.2004 ; опубл. 30.10.2007 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2007.

72. Ilyuschenko, A. Ph. Powder filtering material with a gradient structure manufactured by the synthesis-sintering method / A. Ph. Ilyuschenko [et al.] // EURO PM2007 Congress & Exhibition. – 2007. – P. 359–361.

73. Ильющенко, А. Ф. Использование СВС для изготовления проницаемых порошковых изделий с градиентной структурой / Ильющенко А. Ф. [и др.] // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : материалы Международного симпозиума, Минск 22–25 марта 2011 г. : в 2 ч. ; материалы Международного симпозиума, провод. в рамках 13-й Межд. выставки «Порошковая металлургия – 2011», 9-й межд. выставки «Сварка и резка – 2011», Международ. специализ. салона «Защита от коррозии. Покрытия – 2011», Минск, 22–25 марта 2011 г. – Минск : ГНУ ИПМ, 2011. – Ч. 1. –С. 301–304.

74. Способ получения двухслойного пористого порошкового изделия : пат. № 14840 Респ. Беларусь, МПК В 22F 7/02, В 22F 3/11, В 22F 3/23 / А. Ф. Ильющенко, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин, И. Н. Черняк, Д. И. Жегздринь, А. И. Лецко, А. Р. Кусин; заявитель ГНУ «Институт порошковой металлургии». – № а 20091712 ; заявл. 03.12.2009 ; опубл. 30.10.2011 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011.

75. Капцевич, В. М. Вакуумно-плазменная обработка пористых металлов из титановых порошков. / В. М. Капцевич [и др.] // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин : тематический сборник. – Новополоцк : Полоцкий гос. ун-т, 1999. – С. 250–252.

76. Ильющенко, А. Ф. Использование ионно-плазменного напыления в вакууме для получения двухслойных фильтрующих материалов на основе металлических порошков / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25–26 октября 2001 г. – Могилев, МГТУ, 2001. – С. 43–44.

77. Ильющенко, А. Ф. Исследование процесса получения тонких проницаемых слоев при создании двухслойных порошковых фильтрующих материалов методом ионно-плазменного напыления. Сообщение 1. Обоснование выбора удаляемого агента и апробация технологии / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия :

респ. межвед. сб. науч. тр., посвящ. 80-летию со дня рождения О. В. Романа / ГНУ «Институт порошковой металлургии»; сост. П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2005. – Вып. 28. – С. 232–237.

78. Ilyushchanka, A. Ph. Investigation of the production process of two-layer powder permeable materials by ions-plasma sputtering method / A. Ph. Ilyushchanka [et al.] // Proceedings XIV International scientific congress / summer session «Machines. Technologies. Materials 2017» 13–16.09.2017, Varna, Bulgaria / Scientific Tehn. Union of Mech. Engineering, Cofia, Bulgaria, 2017. – Year I. – ISSUE 4(4). – V. 4. – P. 269–272.

79. Ilyushchanka, A. Ph. Investigation of the production process of two-layer powder permeable materials by ions-plasma sputtering method / A. Ph. Ilyushchanka [et al.] // International Scientific Journal for science, technics and innovations for the industry «Machines. Technologies. Materials» / Published by Scientific tehn. Union of Mech. Engineering «INDUSTRY 4.0», Cofia, Bulgaria, 2017. – Year XI. – ISSUE 9. – P. 435–438.

80. Способ получения двухслойного пористого порошкового материала : пат. № 10832 Респ. Беларусь, МПК В 22F 7/02, С 22С 1/08 / А. Ф. Ильющенко, М. А. Андреев, Р. А. Кусин, И. Н. Черняк, Д. Б. Рыкунов, В. М. Капцевич ; заявитель ГНУ «Институт порошковой металлургии». – № а 20051161 ; заявл. 30.11.2005 ; опубл. 30.06.2008 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2008.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ПФМ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

3.1. Распределение газовых потоков

К современным ПФМ предъявляются весьма жесткие требования по всему комплексу свойств, к которому относятся тонкость фильтрования, проницаемость, гидравлическое сопротивление, коррозионная стойкость, низко- и высокотемпературная прочность и пластичность, возможность многократной регенерации. Фильтрующие материалы, полученные методами порошковой металлургии, в достаточной мере отвечают этому комплексу свойств: подбором гранулометрического состава исходных порошков и технологии изготовления достигается высокая тонкость фильтрования. Изделия из таких материалов обладают высокой прочностью и пластичностью, что позволяет им выдерживать высокие нагрузки в статических и динамических условиях работы (гидравлические и пневматические удары во время запуска и остановки систем). Известны области применения изделий из ПФМ, где они успешно работают при давлении 25 МПа и выше. Они устойчивы к резким температурным колебаниям (тепловым ударам), а своей технологичностью в изготовлении (обрабатывание на металлорежущих станках, склеивание, сварка, пайка и др.) они превосходят все известные в настоящее время проницаемые материалы.

Исходя из накопленного опыта, в качестве одной из наиболее перспективных областей применения можно выделить равномерное распределение газового потока в жидкости: аэрацию воздушного потока с целью насыщения кислородом воздуха культуральной жидкости при выращивании аэробных микроорганизмов в биореакторах, диспергацию потока озоносодержащей воздушной смеси для обеззараживания среды обитания рыб (в том числе и мальков) в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) и равномерное распределение 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 [1–7].

Непрерывным условием культивирования аэробных микроорганизмов является аэрация ферментационной среды, то есть процесс насыщения последней кислородом воздуха. Микроорганизмы, растущие аэробно, зависят от содержания только растворенного в ферментационной среде кислорода. Наиболее распространенным методом, обеспечивающим эффективное растворение в жидкой среде кислорода, считается метод продувания через ферментационный раствор атмосферного воздуха. При прочих равных условиях интенсивность растворения кислорода определяется свойствами аэратора, непосредственно распределяющего поток воздуха в культуральной жидкости. Наиболее предпочтительными, по сравнению с другими, являются порошковые аэраторы.

Ниже приведены результаты лабораторных исследований и апробации в производственных условиях использования аэраторов на основе порошков титана при культивировании дрожжевых микроорганизмов *Debaryomyces hansenii var hansenii* (*D.f.v.*); культуральная среда подготавливалась на основе молочной сыворотки. Установлено, что пористый порошковый аэратор на основе порошка титана обладает скоростью насыщения в 1,6 раза большей по сравнению со штатным (перфорированным). Сравнение в процессе культивирования дрожжевых микроорганизмов *D.f.v.* при диспергации воздуха через штатные и порошковые диспергаторы на лабораторном ферментере (рис. 3.1) также показало преимущество последних: увеличение биомассы составило около 25 % при одинаковом расходе воздуха (1 л/мин на 1 л объема культуральной жидкости) [1, 3, 4].

Исследования в производственных условиях проводили на ОАО «Бобруйский завод биотехнологий» в аппарате чистой культуры (производственном ферментере для подготовки посевного материала *D.f.v.*, предназначенного для переработки молочной сыворотки в рабочем аппарате с целью получения белковой кормовой добавки).

Чертеж устройства для насыщения культуральной жидкости кислородом воздуха представлен на рис. 3.2, смонтированное устройство – на рис. 3.3. Испытания показали, что устройство для насыщения культуральной среды обеспечило завершение процесса культивирования через 12 ч, против 14 ч при работе штатного (перфорированного) диспергатора [1, 3].

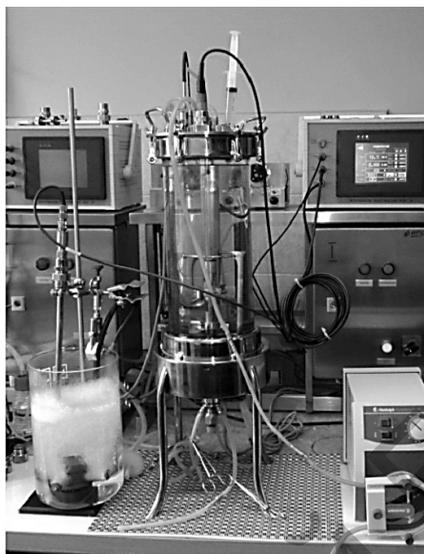


Рис. 3.1. Процесс диспергирования воздуха через экспериментальный образец

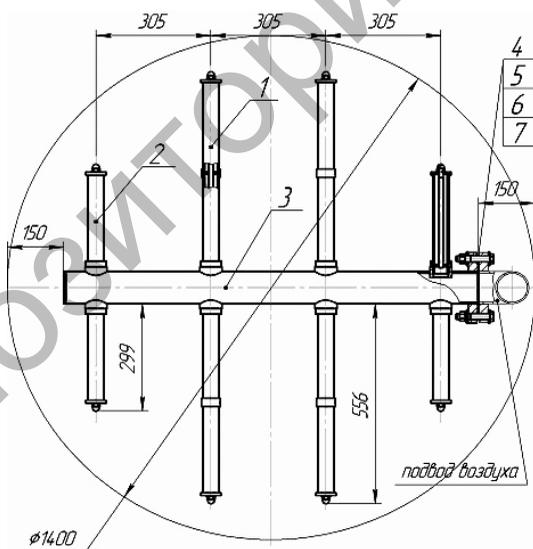


Рис. 3.2. Конструкция устройства для насыщения культуральной среды кислородом воздуха

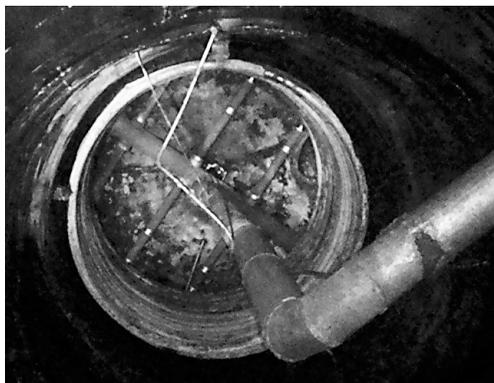


Рис. 3.3. Устройство для насыщения культуральной среды кислородом воздуха

Одной из основных задач УЗВ является поддержание оптимального качества воды, как первичной подготовки воды, так и при ее регенерации в процессе рециркуляции играет роль операция обеззараживания. К числу наиболее распространенных методов обеззараживания относится озонирование. Для обеззараживания воды достаточно 0,5...4,0 мг/л (чем более мутная вода, тем больше нужно расходовать озона).

Порошковые титановые диспергаторы, изготовленные из ПФМ с двухслойной структурой, были установлены взамен импортных производства компании Aqua-Sander (Германия) на УЗВ, принадлежащей ООО «Фирма «Ремона» (г. Могилев, Республика Беларусь) (рис. 3.4, а, б).

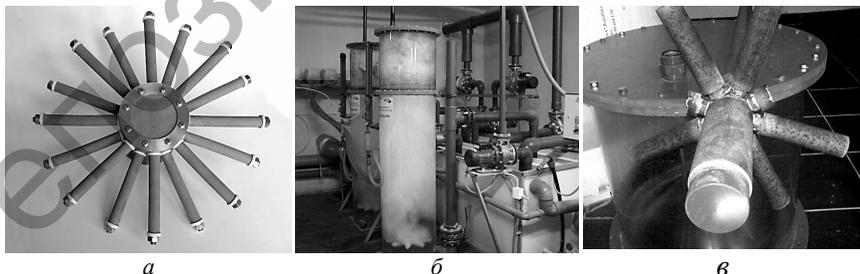


Рис. 3.4. Внешний вид (а) и процесс эксплуатации (б) диспергатора на основе пористых порошковых титановых элементов и внешний вид импортного диспергатора после 1,5 лет эксплуатации (в)

После двух лет эксплуатации в УЗВ ООО «Фирма «Ремона» показатели диспергаторов не изменились, тогда как аналогичные изделия импортного производства пришли в негодность в результате саморазрушения по истечении полутора лет эксплуатации [7, 8].

Успешно была апробирована и конструкция газожидкостного реактора (ГЖР) для насыщения воды кислородом из озоносодержащей воздушной смеси с титановым порошковым диспергатором (рис. 3.5), целью которой является интенсификация процесса каталитического обезжелезивания питьевой воды [3, 10, 11].

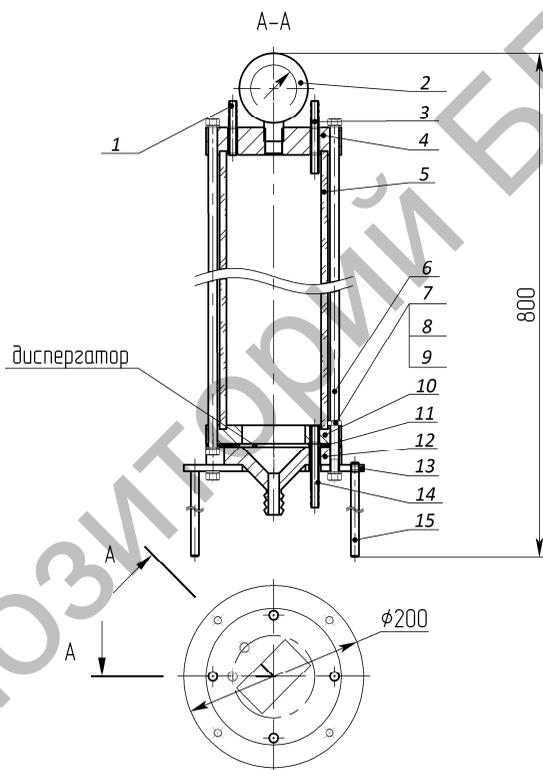


Рис. 3.5. Оснастка для исследования насыщения воды кислородом:
 1 – корпус; 2 – ножка; 3 – основание; 4 – плита основания;
 5 – прокладка; 6 – фланец верхний; 7 – фланец нижний; 8 – шпилька;
 9 – штуцер верхний длинный; 10 – штуцер верхний короткий;
 11 – штуцер нижний; 12, 13, 15 – шайба, гайка, болт; 14 – манометр

Разработка отечественных установок для обезжелезивания в первую очередь важна в тех местах, где отсутствуют централизованные станции по обезжелезиванию, поскольку подземные воды Беларуси, являющиеся основным источником питьевой и технологической воды для большинства регионов республики, характеризуются содержанием железа, превышающим действующие нормативы (0,3 мг/л) [12]. Удаление из воды железа, без преувеличения, одна из самых необходимых задач в водоочистке. Предлагаемые зарубежными изготовителями установки дорогостоящи, на их приобретение и обслуживание затрачиваются значительные валютные средства республики. На основе разработанного ГЖР был изготовлен блок подготовки озоносодержащей воздушной смеси (рис. 3.6), предназначенный для проведения научных испытаний в составе установки для обезжелезивания воды. Авторы [13, 14] обосновали, что предложенная ими конструкция установки для обезжелезивания воды по сравнению с известным аналогом обеспечит повышение эффективности процесса и увеличение срока службы устройства.

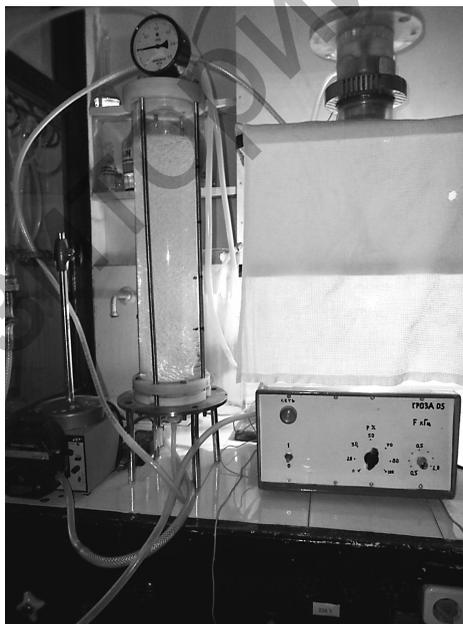
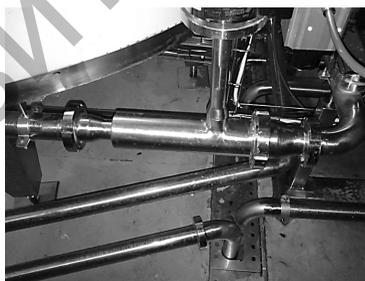


Рис. 3.6. Блок подготовки озоносодержащей смеси

Тепловая обработка – одна из основных и необходимых технологических операций переработки молока и молочных продуктов. В оборудовании, разработанном ООО «Молтехстроймонтаж» и успешно эксплуатирующемся на ОАО «Кобринский маслодельно-сыродельный завод», ОАО «Борисовский молочный комбинат» и Вилейском филиале «Молодечненский молочный комбинат», используются закрытые аппараты с теплообменной рубашкой, в которых нагрев проточного через рубашку теплоносителя (воды) осуществляется путем смешения с паром, что обеспечивает быстроту процесса и, соответственно, сокращает время полного технологического цикла (рис. 3.7). При этом порошок титановый диспергатор обеспечивает равномерное распределение потока пара по объему теплоносителя, одновременно осуществляя очистку пара от твердых включений [1, 2].



a



б

Рис. 3.7. Емкости для тепловой обработки технологических сред, используемые на ОАО «Кобринский маслодельно-сыродельный завод» (а), и узел нагрева теплоносителя, подаваемого в тепловую рубашку аппарата, предназначенного для пастеризации молочных смесей на ОАО «Борисовский молочный комбинат» (б)

Узел нагрева с порошковым диспергатором при относительно небольших размерах и простом конструктивном исполнении обеспечивает нагрев емкости с рабочей загрузкой жидкой среды массой 1 т до 95 °С в течение 45 мин; пар подается под давлением 4...5 атм при температуре 140...160 °С.

3.2. Очистка технических масел

Работа современных сельскохозяйственных машин и механизмов немислима без использования смазочных материалов. В процессе работы смазочные материалы снижают потери на трение, уменьшают износ деталей, отводят тепло из зон трения, защищают детали от коррозии, удаляют с трущихся поверхностей продукты износа и другие загрязнения.

Однако в процессе работы под воздействием высоких температур и давлений, при контактировании с металлическими поверхностями, водой, топливом и воздухом в смазочных материалах происходит процесс непрерывного накопления загрязнений, приводящий к постепенному ухудшению и потере ими необходимых эксплуатационных свойств. Очевидно, что своевременная очистка смазочных материалов повышает надежность и долговечность сельскохозяйственной техники, снижает материальные затраты на приобретение дополнительных нефтепродуктов. Кроме того, современные методы очистки позволяют восстанавливать необходимые эксплуатационные свойства отработанных масел, тем самым вторично вовлекать их в эксплуатацию.

Одним из основных методов очистки является метод фильтрации, основанный на использовании широкой номенклатуры фильтрующих материалов. В работах [15, 16] показано, что ПФМ из порошков бронзы, несмотря на острую конкуренцию со стороны более дешевых бумажных фильтров, могут успешно применяться для очистки технических масел. Для этого была исследована работоспособность бронзовых фильтроэлементов тарельчатой формы в сравнении с серийными сетчатыми и бумажными фильтроэлементами, применяемыми для очистки масла в гидросистеме тракторов ЮМЗ-6. Порошковые фильтроэлементы имели тонкость очистки

25...30, 40, 50 и 70 мкм и состояли из набора колец (40 шт.) толщиной 2,5 мм тарельчатой формы с наружным диаметром 61 мм, диаметром отверстия 24 мм и высотой 5 мм. Бумажные фильтроэлементы (2 шт.) типа «Реготмас» (с двойной гофрированной фильтрующей поверхностью) 601Т-1-06 ТУ 112-04-86 имели тонкость очистки 25–30 и 40 мкм. Сетчатые фильтроэлементы 60-080 ГОСТ 12242–78 (состояли из 18 колец тарельчатой формы) имели тонкость очистки 80 мкм.

Проведенные сравнительные испытания показали следующее. Все типы фильтроэлементов имеют удовлетворительную работоспособность в гидросистеме тракторов ЮМЗ-6 при различной тонкости очистки. Наибольшей грязеемкостью обладают бумажные фильтроэлементы. В табл. 3.1 приведены результаты исследований интенсивности забивания различных типов фильтроэлементов (грязеемкости) до срабатывания предохранительного клапана (0,28 МПа) в зависимости от количества загрязнителя, вносимого в гидросистему. Загрязнение проводилось путем введения через каждые 3 мин в отверстие крышки корпуса гидробака порций кварцевого песка весом 20 и 40 г, тщательно перемешанного с маслом М10-В2 ГОСТ 8581–78.

Таблица 3.1

Зависимость перепада давления
на фильтроэлементе от количества загрязнителя

Номер эксперимента	Кол-во загрязнителя в масле, г	Перепад давления на фильтроэлементе							
		Сетчатый, тонкость очистки, мкм	Порошковый, тонкость очистки, мкм					Бумажный, тонкость очистки, мкм	
			80	70	50	40	25...30	25...30	40
1	0	0,02	0,060	0,060	0,080	0,12	0,10	0,060	
2	20			0,063	0,080				
3	20	0,022	0,070	0,072	0,090	0,13	0,105	0,060	
4	20			0,080	010				
5	20	0,024	0,085	0,085	012	0,14	0,11	0,065	

Номер эксперимента	Кол-во загрязнителя в масле, г	Перепад давления на фильтроэлементе							
		Сетчатый, тонкость очистки, мкм	Порошковый, тонкость очистки, мкм					Бумажный, тонкость очистки, мкм	
			80	70	50	40	25...30	25...30	40
6	20			0,085	014				
7	20	0,030	0,11	0,105	017	0,155	0,11	0,070	
8	20			0,12	019				
9	20	0,28	0,16	0,14	023	0,175	0,115	0,072	
10	20			0,16	028				
11	20		0,28	0,19		0,20	0,115	0,075	
12	20			0,25					
13	20			0,28		0,23	0,117	0,080	
14	40					0,28	0,15	0,085	
15	40						0,175	0,087	
16	40						0,21	0,10	
17	40						0,24	0,115	
18	40						0,28	0,13	
19	40							0,155	
20	40							0,185	
21	40							0,25	
22	40							0,28	

Анализ приведенных в табл. 3.1 данных показывает, что количество кварцевого песка, необходимого для загрязнения, составляет для бумажных фильтроэлементов с тонкостью очистки 40 мкм – 600 г, с тонкостью очистки 25...30 мкм – 440 г; для сетчатых при тонкости очистки 80 мкм – 160 г и для порошковых при тонкости очистки 25...30, 40, 50 и 70 мкм соответственно 280, 180, 240 и 200 г. То есть, бумажные фильтроэлементы обладают в 2...3 раза

большой грязеемкостью по сравнению с порошковыми и сетчатыми, что объясняется более развитой (за счет гофр) поверхностью фильтрации. В свою очередь порошковые фильтроэлементы имеют в 1,1...1,75 раза большую грязеемкость по сравнению с сетчатыми за счет установки большего количества (в 2 раза) первых в корпус фильтра. Однако, несмотря на то что бумажные фильтроэлементы имеют наибольшую грязеемкость, они являются изделиями одноразового использования, в то время как сетчатые и порошковые можно регенерировать. В табл. 3.2 приведены данные по восстановлению работоспособности различных типов фильтроэлементов после их разового загрязнения до срабатывания предохранительного клапана. Восстановление работоспособности фильтроэлементов проводилось очисткой их от грязи при помощи капроновой щетки в дизельном топливе с последующей (при необходимости) обратной продувкой воздухом.

Таблица 3.2

Значения перепада давления на чистых, загрязненных и регенерированных фильтроэлементах

Состояние Фильтроэлемента	Перепад давления на фильтроэлементе, МПа				
	Порошковый, тонкость очистки, мкм				Сетчатый, тонкость очистки 80 мкм
	70	50	40	25...30	
Масло и фильтро- элемент чистые	0,06	0,06	0,08	0,12	0,02
После загрязнения	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
После промывки в солярке	0,06				0,02
После промывки в солярке и продувки воздухом		0,08	0,08	0,12	

Как видно из табл. 3.2, как сетчатые, так и порошковые фильтроэлементы практически полностью восстанавливают свою полную работоспособность после их разового засорения кварцевым порошком. Причем чем выше их тонкость очистки, тем необходимое становится обратная продувка воздухом.

Аналогичные данные были получены на Борисовском заводе «Автогидроусилитель» при проведении сравнительных испытаний тех же порошковых фильтроэлементов с тонкостью очистки 50 мкм, набранных из десяти тарельчатых колец, с серийными сетчатыми, применяемыми для очистки масла марки «Р» (заменитель турбинного 22 и индустриального М20А) в системе насоса гидроусилителя руля автомобиля КамАЗ. В результате испытаний было установлено, что, во-первых, порошковые фильтроэлементы обеспечивают качественную очистку масла; во-вторых, грязеемкость порошкового элемента практически соизмерима с грязеемкостью серийного фильтроэлемента (в среднем соответственно 65,8 и 62,8 г); в-третьих, гидравлическое сопротивление порошковых фильтроэлементов в 2,0...2,5 раза выше.

Более высокое гидравлическое сопротивление порошковых фильтроэлементов не позволило осуществить их внедрение в гидравлических системах тракторов ЮМЗ и автомобилей КамАЗ. Способствовали этому и тяжелые условия работы машин, особенно полевые условия. Однако проведенные испытания позволили разработать и внедрить в производство ряд изделий, предназначенных для очистки масла в стационарных агрегатах, особенно на тех производствах, где имеет место высокая культура обслуживания машин и механизмов. В большинстве случаев разработанные фильтроэлементы устанавливались взамен импортных на действующем оборудовании. В табл. 3.3 приведены данные, подтверждающие возможность успешного применения порошковых фильтроэлементов для очистки масла.

Таблица 3.3

Данные об эксплуатации порошковых фильтроэлементов для очистки масла

Предприятие-потребитель	Тип оборудования, в котором установлены фильтроэлементы	Характеристика фильтроэлементов				Условия и результаты эксплуатации
		Форма, размеры, мм	Кол-во на агрегат, шт.	Фильтрующие характеристики		
				тонкость очистки, мкм	производительность	
Осиповичская компрессорная станция подземного газохранилища Управления магистральных газопроводов	Система смазки агрегата типа 10Г МА 1/28-75	Труба, D92×415	2	25	8·10 м ³ /ч при ΔP = 0,03 МПа	Рабочая среда – масло МС-20. Ресурс работы – 9363 ч. Произведено 18 регенераций обратным потоком масла
Могилевское ПО «Стром-автолиния»	Гидросистема зубошлифовального станка Обкатного типа ZSTZ-10	Набор 40 колец тарельчатой формы, D52×D24×2,5	1	10	–	Рабочая среда – масло ИНСи-40. Ресурс работы – 1 год. Произведено 20 регенераций промывкой в солярке и обратной продувкой воздухом
Несвижская компрессорная станция	Система смазки в агрегате типа Н 12Г	Труба, D40×D 34×300	58	40	480 л/мин при ΔP = 0,05 МПа	Рабочая среда – масло ТП-22. Ресурс работы до регенерации – 1400 ч

ПФМ из порошков оловянно-фосфористой бронзы являются также перспективным материалом для механической очистки моторного масла при обкатке двигателей.

Известно, что двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – один из наиболее сложных и дорогостоящих агрегатов тракторов, комбайнов и другой сельскохозяйственной техники. В процессе эксплуатации он вырабатывает свой моторесурс, поэтому его подвергают капитальному ремонту на мотороремонтных предприятиях с целью продления срока службы, что создает экономию энергетических ресурсов и денежных средств. В процессе такого ремонта производят замену или восстановление изношенных деталей и обкатку двигателя.

Обкатка ДВС является завершающей операцией, во многом определяющая его дальнейший послеремонтный ресурс. В процессе обкатки двигателя интенсивность износа выше, чем при нормальных условиях его эксплуатации. На рис. 3.8 приведена зависимость концентрации загрязнений в моторном масле от времени работы двигателя, в течение которого происходит полная приработка сопряжений. Полная приработка сопряжений происходит за период технологической (стендовой) и начальной эксплуатационной обкатки [17]. Как видно из рис. 3.9, в период технологической обкатки рост концентрации загрязнений происходит наиболее интенсивно. Это связано с тем, что за время технологической обкатки в моторное масло двигателя поступает наибольшее количество продуктов износа, а также эксплуатационные и ремонтно-технологические загрязнения. На этом этапе в масло также попадают загрязнения из воздуха и генерируются продукты неполного сгорания топлива.

После обкатки отработанное моторное масло утилизируется либо используется на другие нужды. Следует отметить, что по многим параметрам отработанное масло еще имеет достаточный запас эксплуатационных свойств, но в то же время содержание механических примесей в нем в 1,5...2 раза превышает предельное значение [17].

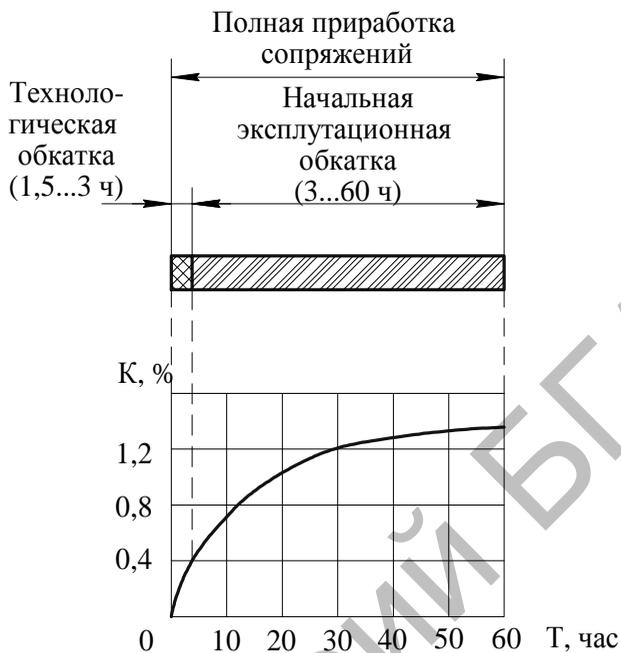


Рис. 3.8. Зависимость концентрации загрязнений в моторном масле от времени обкатки двигателя

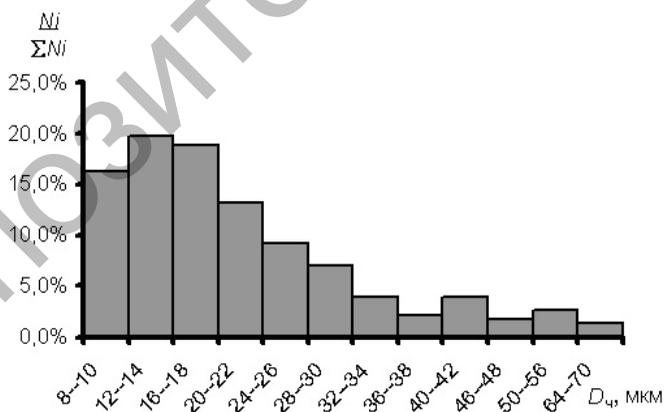


Рис. 3.9. Распределение частиц загрязнений по размерам при обкатке двигателей

Для очистки моторного масла предложено использовать установку [18] (рис. 3.10) с многократно регенерируемыми фильтрующими элементами [19].

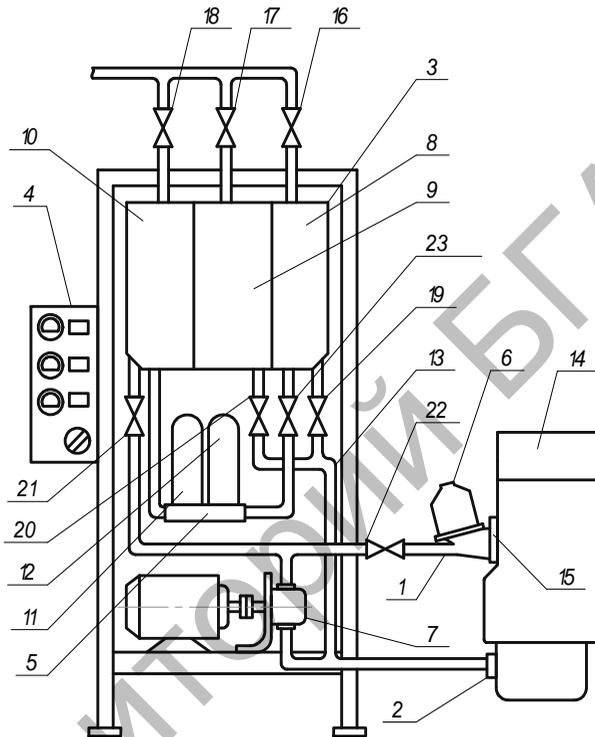


Рис. 3.10. Установка для очистки масла: 1 – патрубок входной; 2 – патрубок выходной; 3 – бак; 4 – щит управления; 5 – блок очистки; 6 – центрифуга; 7 – гидронасос; 8 – емкость окончательной очистки; 9 – емкость резервная; 10 – емкость предварительной очистки; 11 – фильтр грубой очистки; 12 – фильтр тонкой очистки; 13 – патрубок соединительный; 14 – двигатель; 15 – плита распределительная; 16–23 – краны

Установка работает следующим образом. Предварительно очищенное масло, используемое ранее при обкатке, выходит из емкости 8 и заполняет масляный картер двигателя, а из емкости 9 доливается чистое масло до требуемого уровня. Насосом 7 производится предпусковая прокачка масла при закрытом 21 и открытом 22

кранах. Затем при закрытом кране 22 производится обкатка двигателя по заданной программе. После окончания обкатки включается гидронасос 7, который направляет отработанное масло, находящееся в картере двигателя, через патрубок в центрифугу 6 с реактивным приводом, закрепленную на двигателе 14. Масло через распределительную плиту 15, минуя двигатель, сливается в картер, а затем опять многократно пропускается через центрифугу. Далее, закрыв кран 22 и открыв кран 21, очищенное центрифугой масло с помощью гидронасоса 7 подают из картера двигателя в емкость 10. При избыточном давлении воздуха масло из емкости 10 направляется к фильтрам грубой 11 и тонкой 12 очистки, откуда оно поступает в емкость 8 для последующего повторного использования.

Такая конструкция установки позволяет при обкатке ДВС расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло, полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации отработанного масла.

Данную установку можно использовать также для профилактической очистки свежих масел, в которых количество загрязнений выше допустимых пределов. Она может использоваться и на предприятиях по ремонту и техническому сервису машинно-тракторного парка, а также непосредственно в хозяйствах.

На рис. 3.11 представлено несколько вариантов исполнения фильтроэлементов для очистки масла. Разработанные фильтроэлементы обеспечивают тонкость очистки от 5 до 70 мкм.



Рис. 3.11. Фильтроэлементы для очистки масла

Наиболее предпочтительным на настоящий момент представляется использование изделий из ПФМ на основе порошков оловянно-фосфористой бронзы для очистки моторного масла при капитальном ремонте дизельных двигателей, а также на стационарных установках для очистки моторного масла перед заливкой в соответствующие системы сельскохозяйственной техники.

Возможно использование фильтроэлементов из ПФМ для очистки моторного масла путем непосредственной установки в сельскохозяйственных машинах, но при этом возникают дополнительные трудности с обслуживанием техники, связанные с необходимостью регенерации фильтроэлементов, в противном случае использование относительно дорогостоящего материала становится нецелесообразным.

Отработанное моторное масло может быть с высокой степенью чистоты очищено с использованием устройства для тангенциальной фильтрации.

Схема конструкции приведена на рис. 3.12, внешний вид устройства тангенциальной фильтрации отработанного моторного масла на рис. 3.13.

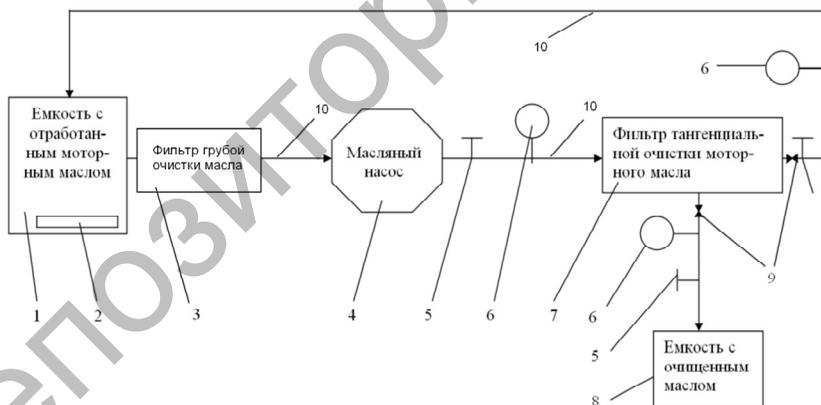


Рис. 3.12. Схема конструкции устройства для тангенциальной очистки отработанного моторного масла:

- 1 - емкость с загрязненным маслом; 2 - нагреватель;
- 3 - фильтр грубой очистки масла; 4 - масляный насос;
- 5 - регулятор давления; 6 - манометры; 7 - фильтр тангенциальной очистки;
- 8 - емкость с очищенным маслом; 9 - краны; 10 - трубопровод

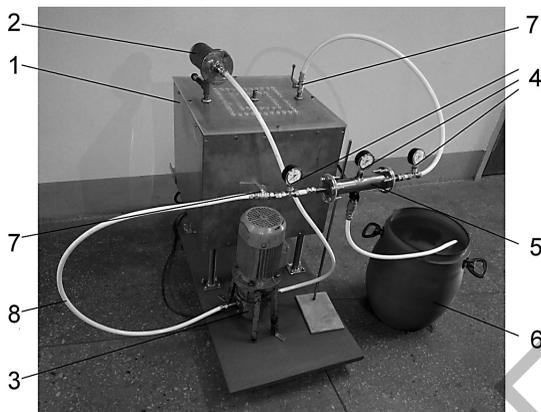


Рис. 3.13. Внешний вид устройства для тангенциальной очистки отработанного моторного масла

Устройство работает следующим образом: отработанное масло из емкости 1 с загрязненным маслом с подогревом, масляным насосом 3, обеспечивающим циркуляцию масла в системе подается на фильтр грубой очистки 2, а затем на фильтр тангенциальной очистки 5 с фильтроэлементом на основе композиционного порошкового фильтрующего материала. Очищенное масло поступает по трубопроводу 8 в емкость для очищенного масла (фильтрата) 6. Для регулирования давления масла в устройстве установлены шаровые краны 7. Для контроля давления масла в системе предусмотрены манометры 4. Соединение комплектующих узлов головного образца устройства для тангенциальной очистки отработанного моторного масла производили с применением многослойной металлопластиковой трубы. Рабочей средой в экспериментах являлось отработанное моторное масло. Устройство успешно прошло натурные испытания в лабораторных условиях.

3.3. Очистка воздуха, воды и водяного пара

Фильтроэлементы из ПФМ могут успешно применяться для предварительной (грубой) и тонкой очистки воздуха, стерилизации воздуха, в качестве функциональных частей влаго-маслоотделителей

и для тонкой очистки водяного пара [20]. Тонкость очистки и проницаемость фильтрующего элемента определяются в основном фракционным составом исходного порошка, формой его частиц и технологией изготовления; граница между грубой и тонкой очисткой воздуха относительно условна. Разработанные ПФМ обеспечивают широкий диапазон изменения тонкости очистки – от 0,3 до ~200 мкм. На рис. 3.14 и 3.15 приведены фотографии изделий, а на рис. 3.16 – характерная структура одного из применяемых материалов для очистки воздуха (сферического порошка оловянно-фосфористой бронзы).



Рис. 3.14. Трубчатые фильтроэлементы для очистки воздуха



Рис. 3.15. Крупногабаритный элемент для очистки воздуха

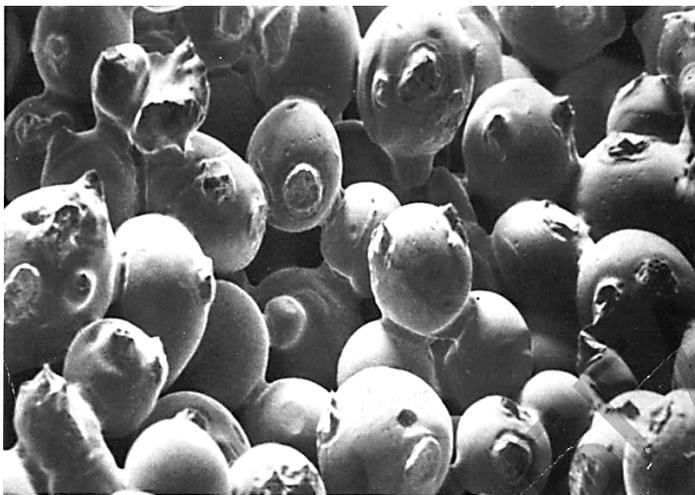


Рис. 3.16. Структура ПФМ из сферического порошка оловянно-фосфористой бронзы

Наличие в сжатом воздухе, поступающем от компрессорной станции к потребителям, продуктов коррозии и износа трубопроводов, арматуры и компрессора, а также масла и влаги, приводит к нарушениям условий эксплуатации пневмосистем и пневмооборудования, к которым в первую очередь относятся замерзание воды в воздуховодах в зимнее время, потери воздуха при продувании пневмосетей, ухудшение работы пневмоинструмента, невозможность осуществления некоторых технологических процессов (покраска, сушка обдувом, струйно-абразивная обработка, пневмотранспорт дисперсных материалов и т. п.) [21].

На рис. 3.17 приведены соответственно конструкция и внешний вид влаго-маслоотделителя с фильтроэлементами из порошков оловянно-фосфористой бронзы, при этом наиболее эффективно работает ПФМ с двухслойной структурой, представленной на рис. 3.18. Такая структура, как показала практика, обеспечивает, во-первых, повышенную проницаемость материала, во-вторых, облегчает процесс коагуляции капель. Как правило, производительность влаго-маслоотделителей с аналогичной конструкцией составляет от 100 до 2000 м³/ч.

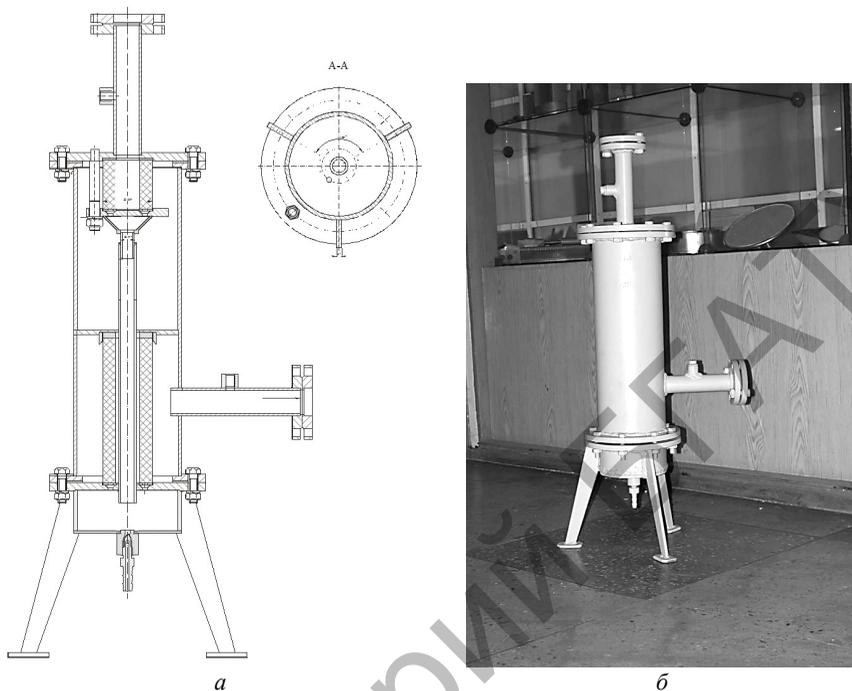


Рис. 3.17. Влажно-маслоотделитель:
а) схема; *б)* внешний вид



Рис. 3.18. Двухслойная структура ПФМ из сферического порошка оловянно-фосфористой бронзы

Более высокая тонкость очистки требуется при получении стерильного (очищенного от посторонней микрофлоры) воздуха, используемого, например, на консервных предприятиях в линиях асептического консервирования и для насыщения кислородом воздуха культуральных сред при микробиологическом синтезе различных продуктов [22, 23]. ПФМ на основе металлических порошков в состоянии обеспечить необходимую очистку, при этом предпочтительнее использовать титановые фильтроэлементы [24, 25]. Особым достоинством ПФМ является его возможность многократно стерилизоваться перегретым паром.

Порошковая металлургия в республике позволяет сегодня создавать на основе ПФМ из порошков титана устройства для стерилизации воздуха производительностью от нескольких литров до $500 \text{ м}^3/\text{ч}$. На рис. 3.19 представлен внешний вид устройства для стерильной очистки воздуха производительностью $5 \text{ м}^3/\text{ч}$, а на рис. 3.20 – один из типоразмеров титановых фильтроэлементов и его структура, обеспечивающая его повышенную производительность за счет своей многослойности (рис. 3.21).



Рис. 3.19. Внешний вид устройства для стерилизации воздуха производительностью $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с двумя ступенями предварительной очистки

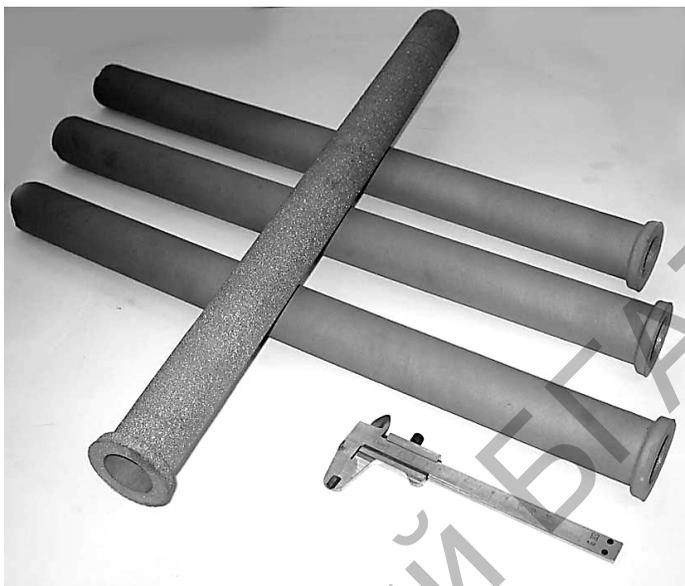


Рис. 3.20. внешний вид титанового фильтроэлемента для стерилизации воздуха

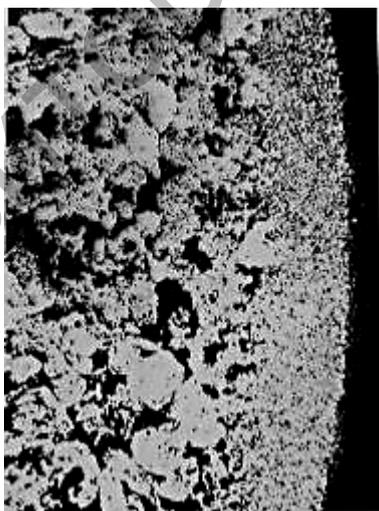


Рис. 3.21. Структура титанового фильтроэлемента для стерилизации воздуха

Стерильный воздух на современном производстве должен подаваться по стерильным коммуникациям и в стерильные рабочие аппараты и другие объекты. Как правило, стерильность оборудования обеспечивается перегретым паром, который, если не принять соответствующие меры, несет в себе продукты коррозии котлов, трубопроводов и других элементов производственного оборудования, что приводит к преждевременному выходу из строя фильтров для стерилизации воздуха (поскольку они вынужденно обеспечивают очистку пара от содержащихся в нем механических включений) и повышенному износу уплотнителей вентиляей, так как те же механические частицы приводят к их преждевременному износу. Кроме того, невозможно полностью устранить вероятность негерметичного перекрытия вентилями трубопроводов из-за попадания на уплотнения содержащихся в паре загрязнений, что приводит к инфицированию осуществляемого в дальнейшем технологического процесса. Устранить такую вероятность позволяют титановые фильтроэлементы, устанавливаемые в фильтрах для очистки пара.

Грубая и, до известных пределов (~7 мкм), тонкая очистка технической воды может быть эффективно осуществлена теми же фильтрующими элементами из оловянно-фосфористой бронзы и с теми же ограничениями, что и очистка воздуха.

Большой интерес представляют ПФМ для очистки питьевой воды. Безопасность жизнедеятельности в сельскохозяйственном производстве напрямую связана с качеством питьевой воды, потребляемой занятым в этом производстве человеком. Действительность сегодня такова, что даже водопроводную питьевую воду, передаваемую централизованными системами снабжения, желательно дочищать с помощью бытовых фильтров. Наиболее остро проблема очистки питьевой воды стоит на периферии, то есть именно в тех местах, где сосредоточено сельскохозяйственное производство. Очевидно, это связано с тем, что в крупных городах существует более жесткая и оперативная система контроля качества питьевой воды и используются современное оборудование и методы ее очистки.

В результате исследований установлено, что однослойный ПФМ из порошков мелкодисперсного титана марки ПТМ обеспечивает высокую тонкость очистки (0,5...1 мкм), а фильтр на его основе, внешний вид которого приведен на рис. 3.22, – высокую расходную характеристику (рис. 3.23) [26].

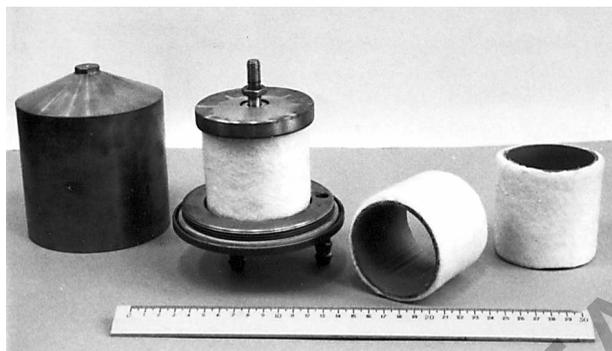


Рис. 3.22. Внешний вид фильтра для очистки питьевой воды

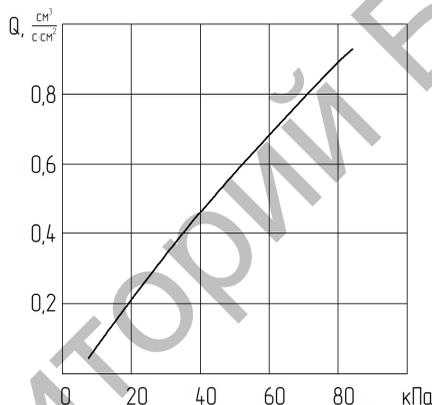


Рис. 3.23. Расходная характеристика

Предварительные экспериментальные исследования по изучению противопаразитарной барьерной функции этого материала показали эффективность очистки воды с концентрацией искусственного загрязнения паразитными патогенами (цисты лямблий, яйца гельминтов), приближенной к естественной до 97,8 %. Важность полученных результатов объясняется тем, что питьевая вода является одним из факторов распространения лямблиоза [27]. Лямблии обладают высокой проникающей способностью и более высокой по сравнению с бактериями и вирусами устойчивостью к действию дезинфектантов. Их невозможно полностью удалить путем

хлорирования и озонирования [28, 29]. Клинические заболевания проявляются в кишечных расстройствах, они могут стимулировать острый или хронический аппендицит, холецистит, нервно-аллергический зуд, астматический бронхит, крапивницу. Проблема очистки воды от лямблий остро стоит во многих районах Беларуси. Яйца гельминтов распространены в воде повсеместно.

В настоящее время работы по изучению противопаразитарной барьерной функции бытового фильтра для очистки питьевой воды все еще продолжаются, однако он уже прошел испытания на Бродницком крахмальном заводе (д. Бродница Ивановского района Брестской области), где был установлен в аппарате для получения газированной воды с целью обезжелезивания последней. Фильтр обеспечил снижение содержания железа в воде с $6 \dots 8$ до $0,1$ мг/л, то есть до уровня, ниже нормативного [30]. При этом ресурс работы до регенерации составил 3000 л.

На рис. 3.24 приведен внешний вид фильтра питьевой воды производительностью $3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Данный фильтр имеет две особенности: во-первых, фильтроэлемент в нем выполнен двухслойным, что позволило повысить пропускную способность при одинаковой тонкости очистки на 60 %; во-вторых, в дне корпуса установлен шаровой кран, позволяющий отбирать воду для технических нужд без фильтрации, что удлинит срок службы фильтроэлементов до регенерации.

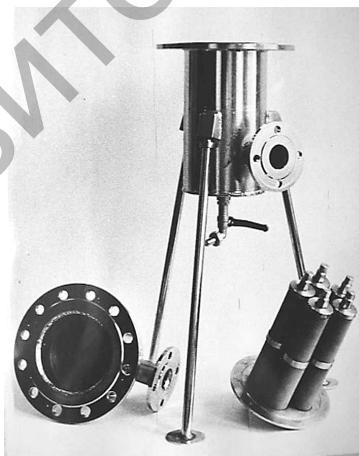


Рис. 3.24. Фильтр для очистки питьевой воды производительностью $3 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рис. 3.25 приведены во времени абсолютные объемы питьевой воды, взятые из системы водообеспечения г. Минска и профильтрованной через однослойный и двухслойный ПФМ. Данные свидетельствуют о превосходстве в ресурсе работы двухслойного материала, и это при том, что его площадь в процессе эксперимента была примерно в 2 раза меньше, чем у однослойного.

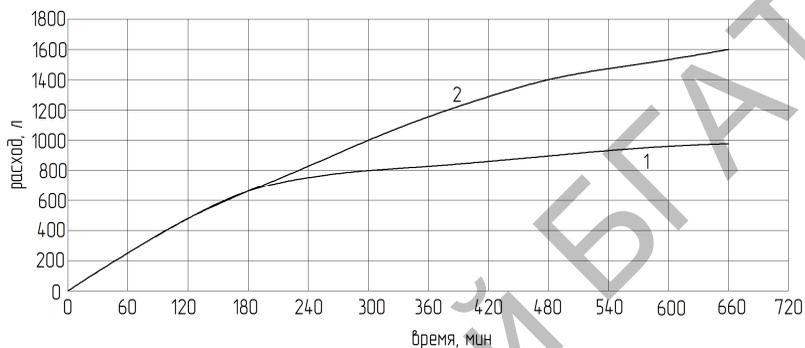


Рис. 3.25. Зависимость объема воды, прошедшей через однослойный (1) и двухслойный (2) ПФМ от времени

3.4. Глушение шума

Для производственных машин, двигателей и установок, использующих атмосферный воздух в качестве рабочего тела, – вентиляторов, воздуходувок, пневмоинструмента, пневмораспределителей, управляющих механизмов прессов и других, существенным и часто наиболее интенсивным является шум, излучаемый ими в атмосферу через устройства забора и выброса воздуха и отработанных газов.

Наиболее эффективным средством борьбы с этими шумами является установка глушителей шума в воздуховоды, по которым транспортируются зашумленные потоки. Глушители шума должны, с одной стороны, преграждать путь шуму, с другой – не препятствовать перемещению рабочей среды по воздуховоду. Хорошо зарекомендовали себя в этом качестве глушители из ПФМ. Внешний вид изделий представлен на рис. 3.26, схема применения в пневмораспределителе – на рис. 3.27.

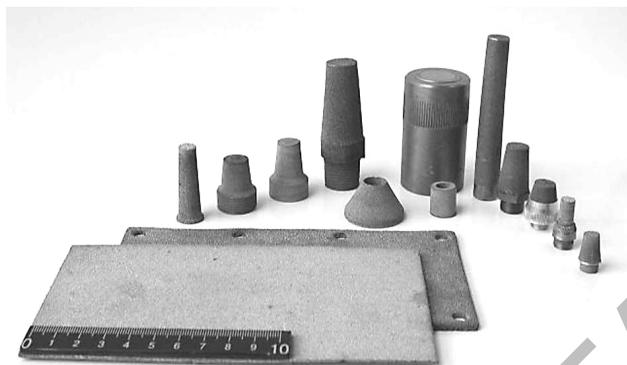


Рис. 3.26. Внешний вид глушителей шума

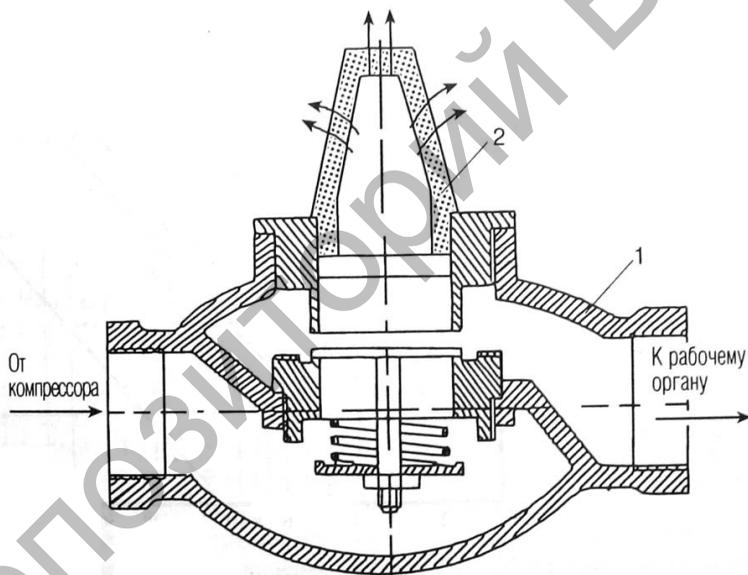


Рис. 3.27. Схема пневмораспределителя:

1 – корпус; 2 – глушитель

Эффективность установки ΔL глушителей из ПФМ на выхлоп пульсирующего источника шума может быть определена по формуле [31]

$$\Delta L = \frac{p_0^2}{p_1^2} 20 \lg \frac{d_1^2}{d_0^2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f}{d} \frac{V}{S_1} \frac{R_{\text{пр}}}{\rho c} \right)^2}, \quad (3.1)$$

где p_0 и p_1 – звуковые давления соответственно в выходном источнике и на внешней поверхности глушителя, Па;

d_1 – диаметр эквивалентной сферы (для сферического глушителя $d_1 = d_{\text{вн}}$), м;

d_0 – диаметр отверстия, излучающего звук, м;

f – расчетная частота звука, Гц;

ρ , c – плотность (Дж/м³) и скорость звука (м/с) в воздушной среде соответственно;

V – объем внутренней полости глушителя, м³;

S_1 – площадь внутренней поверхности глушителя, м²;

$R_{\text{пр}}$ – сопротивление продуванию пористых стенок глушителя, Па.

3.5. Огнепреграждение

Использование ПФМ в качестве огнепреградителей основано на возможности гашения пламени при прохождении узких капилляров [32]. При этом гашение пламени в канале, заполненном горючей смесью, происходит лишь при некоторой минимальной величине диаметра канала, определяемой химическим составом и давлением горючей смеси [33, 34]. Согласно теории пределов распространения пламени, гашение его в узких каналах обусловлено тепловыми потерями из зоны реакции к стенкам канала [34]. Пламегасящая способность огнепреградителя зависит в основном от диаметра гасящих каналов и слабо зависит от его длины.

Пламегасительную способность огнепреградителя на практике можно оценить через безразмерный параметр Пекле Pe :

$$Pe_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{п}} \delta_{\text{кр}} c_p P_{\text{кр}}}{RT_0 \lambda_0}, \quad (3.2)$$

где $Pe_{\text{кр}}$ – значение критерия Пекле на пределе гашения пламени;

$U_{\text{п}}$ – нормальная скорость распространения пламени, м/с;

$\delta_{кр}$ – критический диаметр каналов для гашения пламени, м;
 c_p – теплоемкость горючей смеси, Дж/К;
 $p_{кр}$ – критическое давление, Па;
 R – газовая постоянная, Дж/моль·К;
 T_0 – температура исходной смеси, К;
 λ_0 – теплопроводность исходной смеси, Вт/м·К.

Результаты большого числа исследований, в которых при значительных изменениях условий гашения соблюдалось постоянство давления при подходе пламени к насадке, показали, что величина критерия Пекле, примерно равная 65, является постоянной: если найденное по формуле значение меньше 65, огнепреградитель задержит распространение пламени [34]. При этом значение запаса надежности η огнепреградителя, которое находят из отношения $Pe_{кр}$ к вычисленному значению Pe , должно составлять не менее 2:

$$\eta = \frac{Pe_{кр}}{Pe} = \frac{65}{Pe} \geq 2,0. \quad (3.3)$$

На рис. 3.28 показаны варианты исполнения порошковых огнепреградителей, а на рис. 3.29 – схематично показана установка огнепреградителя из ПФМ в затворе ЗСС–2–60.



Рис. 3.28. Внешний вид огнепреградителей

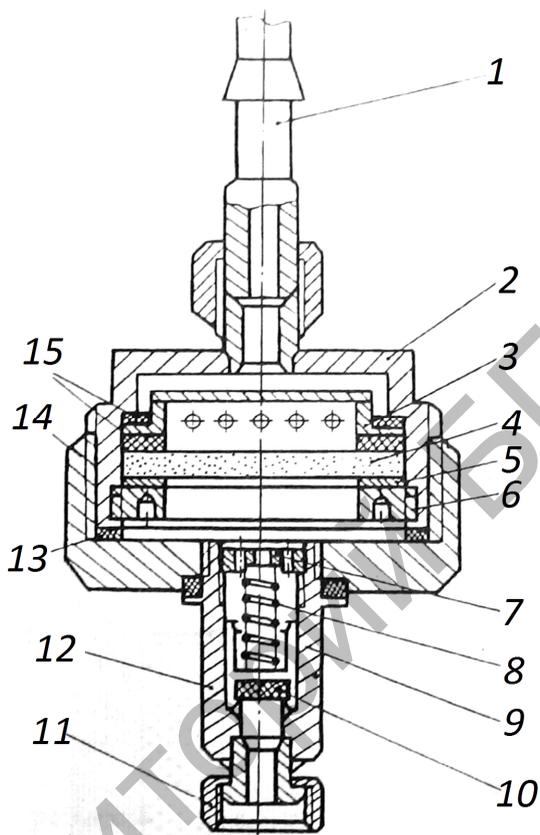


Рис. 3.29. Схема затвора ЗСС-2-60:

- 1 – корпус; 2 – диск для отражения ударной волны;
 3 – пористый диск из ПФМ; 4 – гайка; 5 – кольцо; 6, 8, 12 – уплотнение;
 7 – прижим; 9 – золотник; 10 – накидная гайка; 11 – обратный клапан;
 13 – пружина; 14 – прокладка; 15 – ниппель

3.6. Отделение дрожжевых клеток в процессе непрерывного сбраживания

Наиболее масштабная биотехнологическая отрасль Республики Беларусь – спиртовая промышленность (более 30 действующих предприятий) – нуждается в обновлении технологических процессов

производства этанола. Прежде всего это касается технологии сбраживания суслу периодическим методом, которая остается практически неизменной более ста лет. Периодический процесс сбраживания суслу имеет ряд недостатков: низкая производительность бродильных аппаратов; большие затраты времени и тепловой энергии на межцикловые операции по подготовке аппарата к работе; нестабильные условия жизнедеятельности и физиологическое состояние популяции дрожжей, изменяющиеся в процессе брожения от начального периода с избытком субстрата до времени его полного исчерпания; сложность борьбы с инфекцией, особенно в начальный период брожения, когда субстрат в избытке, а концентрация дрожжей невысокая; сложность автоматизации процесса. Сбраживание суслу в непрерывно-циклическом режиме в громоздкой батарее из восьми бродильных аппаратов не позволяет избавиться от указанных выше недостатков. Современный радикальный путь решения проблемы – непрерывное сбраживание суслу в бродильном аппарате, оснащённом циркуляционным контуром с микрофильтрационным модулем, обеспечивающим возврат клеток дрожжей – продуцентов этанола в бродильный аппарат с одновременным отбором водно-спиртового раствора [35].

Это позволит поддерживать в аппарате высокую концентрацию дрожжей при непрерывном потоке суслу и обеспечит существенное увеличение его производительности. Стабильно высокая концентрация дрожжей должна также обеспечить более полное сбраживание сахаров суслу и ограничить развитие инфекции в бродильном аппарате. Отсутствие или незначительное содержание в отводимом из модуля водно-спиртовом растворе биомассы дрожжей позволит снизить расход пара при последующем выделении этанола и затраты на чистку ректификационных колонн. Поэтому разработка фильтрующего материала на основе металлических порошков, отличающегося существенными преимуществами по сравнению с другими материалами, для непрерывного сбраживания суслу в производстве этанола является актуальной. Существенным преимуществом по сравнению с другими видами материалов имеют фильтрующие материалы на основе металлических порошков.

Исследование эффективности функционирования экспериментальных образцов фильтрующих элементов, предназначенных для выделения дрожжей из сбраживаемого суслу с отделением

водно-спиртового раствора, проводили на лабораторном стенде, представленной на рис. 3.30.

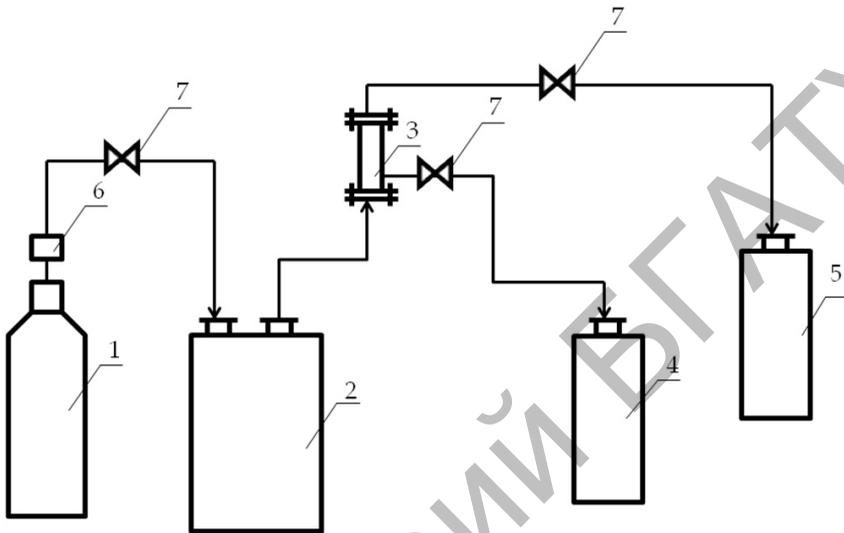


Рис. 3.30. Лабораторный стенд для исследования эффективности функционирования фильтрующих элементов:

- 1 – источник давления; 2 – емкость с суслом;
- 3 – экспериментальный образец фильтрующего материала;
- 4 – приемник фильтрата; 5 – приемник концентрата; 6 – редуктор;
- 7 – вентили для регулирования расходов фильтрата, концентрата и сусла

В качестве производственной среды для определения пропускной способности фильтрующих элементов была использована суспензия дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* с концентрацией 20 г/л (по биомассе 75%-й влажности). Суспензия дрожжей из емкости с суслом пережимом сжатым азотом подавалась на фильтрующий элемент, где разделялась на два потока – концентрат и фильтрат. Концентрат подавался в приемник 5 и затем возвращался в емкость 2. Эффективность отделения дрожжевых клеток экспериментальным фильтрующим элементом контролировали микроскопированием проб фильтрата в препарате «раздавленная капля».

Результаты эффективности функционирования фильтрующих элементов, предназначенных для выделения дрожжей из сброженного суслу с отделением водно-спиртового раствора, представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Сравнительная эффективность функционирования фильтрующих элементов в суспензии (20 г/л спиртообразующих дрожжей)

Материал экспериментальных образцов	Средний размер пор элемента, мкм	Удельная пропускная способность, л/м ² ·ч	Эффективность разделения дрожжевой суспензии, %
Порошок титана марки ТПП-5	40,0	1550	10
Порошок коррозионно-стойкой стали ПХ18Н15	15,0	1400	30
Двухслойный порошок титана марки ТПП-8 и ТПП-5	8,0	1050	100
Двухслойный порошок титана марки ПТМ и ТПП-8	6,0	920	100

После каждого цикла фильтрования фильтрующий элемент подвергали регенерации промывкой водой под давлением 0,1...0,2 МПа в обратном направлении с расходом промывной воды 0,08...0,10 м³ на один квадратный метр фильтрующей поверхности. Эксперименты показали, что такая регенерация восстанавливает пропускную способность фильтрующего элемента.

Стопроцентное разделение дрожжевой суспензии получено на экспериментальных двухслойных фильтрующих элементах из порошка титана марки ТПП-8 и ПТМ с размерами средних пор 8 и 6 мкм и пористостью 35 и 32 % соответственно. Максимальный объем фильтрата 0,20 м³/м² до регенерации прошел через

двухслойный фильтрующий элемент из порошка титана марки ПТМ и ТПП-8.

В табл. 3.5 приведены результаты натурных испытаний микрофильтрационного модуля, внешний вид и конструкция которого приведены на рис. 3.31 и 3.32.



Рис. 3.31. Внешний вид микрофильтрационного модуля, предназначенного для выделения дрожжей из сброживаемого сусла с отделением водно-спиртового раствора

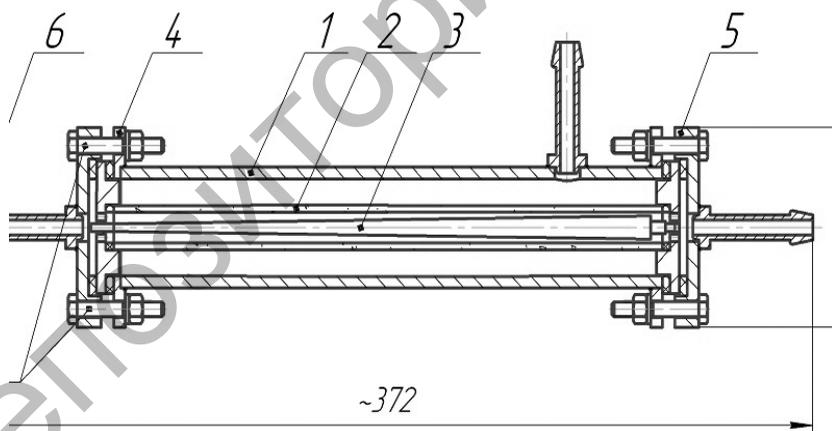


Рис. 3.32. Чертеж микрофильтрационного модуля, предназначенного для выделения дрожжей из сброживаемого сусла с отделением водно-спиртового раствора:

- 1 – корпус; 2 – фильтрующий элемент; 3 – стержень; 4 – фланец корпуса;
5 – фланец соединительный; 6 – штуцер; 7 – крепежные изделия

Таблица 3.5

Результаты исследования эффективности отделения микрофильтрационным модулем клеток дрожжей от водно-спиртового раствора

Наименование образца	Удельная пропускная способность, л/м ² ·ч	Эффективность разделения дрожжевой суспензии, %	Максимальный объем фильтрата до регенерации элемента, м ³ /м ²
Головной образец микрофильтрационного модуля	920	100	0,20

Как показали натурные испытания, разработанный микрофильтрационный модуль обеспечивает стопроцентное отделение клеток дрожжей от водно-спиртового раствора и возврат их в бродильный аппарат. Экспериментальный образец материала обладает термостойкостью и позволяет осуществлять многократную паровую обработку.

Литература к главе 3

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.] // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе = Porous permeable materials: technologies and products thereof : материалы 6-го Междунар. симп., Минск, 19–20 окт. 2017 г. / НАН 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.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы статьи Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7–8 июня 2017 г. – Минск, БГАТУ, 2017. – С. 91–96.

3. Черняк, И. Н. Применение порошковых фильтрующих материалов для диспергации газовых потоков в агропромышленном комплексе / И. Н. Черняк [и др.] // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017 г. – Минск, БГАТУ, 2017. – С. 232–235.

4. Ильющенко, А. Ф. Применение порошковых диспергаторов для культивирования посевного материала в процессе переработки молочной сыворотки микробным методом / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы доклада XII междунар. науч.-технич. конф., Минск, 25–27 мая 2016 г. – Минск : Беларуская навука. – С. 51–53.

5. Применение порошковых фильтрующих материалов на производствах АПК / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. на 25-й Междунар. специализир. выст. «Белагро – 2015», Минск, 4 июня 2015 г. / М-во с. х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», УО «Белорус. Гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: Н. А. Лабушев [и др.]. – Минск, Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2015. – С. 97–101.

6. Ильющенко, А. Ф. Применение порошковых фильтрующих материалов в процессах и оборудовании пищевых производств / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов X Междунар. научн.-техн. конф., Могилев, 23–24 апреля 2015 г. / УО «Могилевский государственный университет продовольствия»; редкол.: А. В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев : МГУП, 2015. – С. 215.

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

8. Использование порошковых фильтрующих материалов для обеззараживания среды обитания рыб в установках замкнутого водоснабжения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации : материалы конф., посвященной 60-летию создания БГАТУ и памяти Суслова, Минск, 4–6 июня 2014 г. : в 2 ч. / Под общ. ред. И. Н. Шило, Н. А. Лабушева. – Минск, БГАТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 204–210.

9. Состояние природной среды Беларуси : экологический бюллетень, 2009 / Под общ. ред. В. Ф. Логинова. – Минск : Минприроды, 2010. – 394 с.

10. Ильющенко, А. Ф. Исследование процесса диспергирования озоновоздушной смеси в водной среде пористыми элементами / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе» = Porous permeable materials: technologies and products thereof : материалы 6-го Междунар. симп., Минск, 19–20 окт. 2017 г. / НАН Беларуси [и др.] : редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 151–158.

11. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник : в 2 кн. / В. Г. Айнштейн [и др.]; под ред. В. Г. Айнштейна. – М. : Люкс; Высшая школа, 2003. – Кн. 1. – 912 с.

12. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль

качества : СанПиН 10-124 РБ 99. – Введ. 26.11.06. – Минск : Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2006. – 112 с.

13. Андрушевич, А. А. Установка напорного типа для каталитического обезжелезивания питьевой воды / А. А. Андрушевич // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Международ. науч.-практ. конф., Минск, 9 июня 2016 г. / М-во с.-х. и прод. Респ. Беларусь, РО «Белагросервис», УО «Белорус. гос. аграрный техн. ун-т»: – Минск, БГАТУ, 2016. – С. 199–202.

14. Установка для обезжелезивания воды : пат. 11495 Респ. Беларусь, МПК С 02F 1/64, В 01D 39/00 / А. Ф. Ильющенко, И. Н. Черняк, А. Р. Кусин, Д. И. Жегздринь, Р. А. Кусин, И. В. Закревский, Н. Н. Якимович ; заявитель ГНУ «Институт порошковой металлургии», УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», ГНУ «Институт физико-органической химии НАН Беларуси». – № u 20160298 ; заявл. 29.09.2016 ; опубл. 30.10.2017 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – № 5. – 2017 – С. 176.

15. Капцевич, В. М. Очистка технических масел с помощью порошковых фильтрующих материалов / В. М. Капцевич [и др.] // Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства : сб. научн. трудов Международной науч.-практ. конф. – Горки : БГСХА, 2001. – Ч. 2. – С. 103–108

16. Шелег, В. К. Опыт эксплуатации фильтрующих порошковых материалов. 1. Очистка технических масел / В. К. Шелег, Р. А. Кусин // Материалы, технологии, инструменты. – Гомель : Инфотрибо, 1996. – № 4. – С. 44–46.

17. Храмов, Н. В. Обкатка и испытание автотракторных двигателей / Н. В. Храмов [и др.]. – Москва, 1991. – 142 с.

18. Установка для очистки масел: пат. 953 Респ. Беларусь, МПК 7 В 01D 29/00 / Н.Н. Наркевич, А.А. Витязь, Н.И. Бохан, В.М. Капцевич, Р.А. Кусин, Г.А. Бокань; заявители: Белор. гос. агр. техн. ун-т, Ин-т порошк. металлургии, Березовск. моторорем. завод. – № 20020396; заявл. 18.12.02 ; опубл. 30.09.03 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2003. – № 3. – С. 246–247.

19. Композиционный фильтр : пат. 2700 Респ. Беларусь, МПК 7 В 01D 27/00 / В. М. Капцевич, Н. И. Бохан, Г. А. Азаров, Д. И. Кривальцевич, Е. А. Маршина, Н. Н. Наркевич, А. А. Витязь, Н. К. Лисай,

А. Р. Кусин, Р. А. Кусин, С. В. Денисевич ; заявители Белор. гос. агр. техн. ун-т, Березовск. моторорем. завод. – № 20060136; заявл. 01.03.06 ; опубл. 30.04.06 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2006. – № 2. – С. 153–154.

20. Витязь, П. А. Пористые порошковые материалы: история создания, современное состояние и перспективы развития / П. А. Витязь // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы / Редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2010. – С. 251–320.

21. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой для фильтрации жидкостей и газов / Л. П. Пилинович, В. В. Мазюк, А. Л. Рак [и др.] ; под. ред. П. А. Витязя. – Минск : Тонпик, 2005. – 252 с.

22. Фильтрующие материалы для стерилизации воздуха / Г. В. Маршев, Н. Н. Нестерова, В. П. Филиппович [и др.] // Пищевая промышленность. – 1989. – № 12. – С. 47–49.

23. Фильтры для высокоэффективной тонкой очистки технологического воздуха при культивировании микроорганизмов / А. Н. Аршинов, Н. В. Садовой, А. А. Косяков [и др.] // Биотехнология. – 1997. – № 4. – С. 27–30.

24. Спеченные металлические элементы для стерильной фильтрации воздуха / И. А. Козакова [и др.] // Химико-фармацевтический журнал. – 1981. – Т. 15. – № 1. – С. 106–109.

25. Якимович, М. Н. Использование пористых порошковых материалов для стерилизации воздуха в процессах ферментации / М. Н. Якимович, Р. А. Кусин, В. К. Корнеева // Микробиология и биотехнология XXI столетия : материалы междунар. конф., Минск, 22–24 мая, 2002 г. – 2002. – С. 281.

26. Использование пористого порошкового материала для фильтрации питьевой воды / В. М. Капцевич, Г. А. Бокань, А. Р. Кусин [и др.] // Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства : материалы международной научно-практической конференции, Горки, 12–14 октября 2001 г. – Горки : БСХА, 2001. – Ч. 2. – С. 26–28.

27. Скрипова, Л. В. Вода – один из факторов распространения лямблиоза / Л. В. Скрипова // Вода. – 1999. № 2. – С. 4

28. Гончарук, В. В. Озонирование как метод подготовки питьевой воды: возможные побочные продукты и токсикологическая

оценка / В. В. Гончарук, Н. Г. Потапченко, В. Ф. Вакуленко // Химия и технология воды. – 1995. – Т. 17, № 1. – С. 3–33.

29. Костюченко, С. В. Обеззараживание при подготовке питьевой воды из поверхностных источников / С. В. Костюченко, С. В. Волков, А. В. Якименко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 2. – С. 9–12.

30. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством : ГОСТ 2874–82. – Введ. 01.01.85. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 10 с.

31. Белов, С. В. Пористые материалы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

32. Кусин, Р. А. Пористые порошковые огнепреградители / Р. А. Кусин [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. тез. докл. IV науч.-практ. конф., Минск, 6–8 июня, 2007 г. : в 3-х т. – 2007. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 230–232.

33. Андриевский, Р. А. Пористые металлокерамические материалы / Р. А. Андриевский. – М. : Metallurgia, 1964. – 187 с.

34. Стрижевский, И. И. Промышленные огнепреградители / И. И. Стрижевский, В. Ф. Заказнов. – М. : Химия, 1966. – 151 с.

35. Лембович, А. И. Концепция непрерывного сбраживания сула в производстве этанола из крахмалсодержащего сырья / А. И. Лембович [и др.] // Химия, технология органических веществ и биотехнология : труды БГТУБ. – 2014. – №4. – С. 174–178.

36. Ilyushchenko, A. F. Purification of alcohol containing mech with powder filtering materials / A. F. Ilyushchenko, V. M. Kaptsevich, N. N. Yakimovich, R. A. Kusun, I. N. Chernyak, N. S. Ruchay, A. I. Lembovich // Abstracts of the 1-st International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition (PPM 2013): Izmir, Turkey, 3–6 September 2013. – Çeşme Izmir, Turkey : 2013. – P. 158.

37. Ilyushchenko A.F., Kaptsevich V.M., Yakimovich N.N., Kusun R.A., Chernyak I.N., Ruchay N.S., Lembovich A.I. Purification of alcohol containing mech with powder filtering materials // The Processings of 1-st International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition (PPM 2013): Izmir, Turkey, 3–6 September 2013. Çeşme Izmir, Turkey : 2013. – P. 472–474.

38. Ilyushchenko, A. Ph. Powder Inert and Reactive Inoculators Obtained by Mechanical Activation Methods and SHS / A. Ph. Ilyushchenko, A. I. Letsko, I. N. Chernyak, M. N. Churik, I. N. Kazanovskaya //

EURO PM 2013 Congress & Exhibition Proceedings : materials of International Congress, Gothenborg, Sweden, 15th-18th September 2013. Shrewsbury : EPMA, 2013. – Vol. 2. – P. 269–272.

39. Ильющенко, А. Ф. Интенсификация спиртового брожения путем тангенциальной фильтрации порошковыми фильтрующими материалами / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия : республиканский сборник трудов.– Минск : Беларуская навука, 2013. – Вып. 36. – С. 203–205.

40. Ильющенко, А. Ф. Композиционный фильтрующий материал и модуль на его основе для непрерывного сбраживания суслу в производстве этанола / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы докладов, посвящ. 40-летию создания Института порошковой металлургии, Минск, 12–14 сентября 2012 г. – Минск : Беларуская навука, 2012. – С. 58–59.

4. РЕГЕНЕРАЦИЯ ПФМ

4.1. Классификация методов

Как уже отмечалось, основным назначением фильтров является очистка жидкостей и газов от посторонних примесей: жидкостей от твердых частиц, газовых пузырьков и включений, другой нерастворимой жидкости; газа от твердых или жидких частиц. Отличительной их особенностью является осуществление фазоразделения в результате процесса фильтрования. Применение таких фильтров позволяет повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность пневмо- и гидросистем различного назначения, обеспечить защиту окружающей среды, обеспечить требуемые условия протекания технологических процессов.

На сегодняшний день широко применяются бумажные, стеклянные, керамические, тканевые, войлочные, полимерные фильтрующие материалы, особое место среди которых по ряду достоинств занимают ПФМ, изготовленные из металлических порошков. Основным преимуществом ПФМ по сравнению с другими материалами является возможность многократной регенерации, что компенсирует их более высокую стоимость.

Сегодня из ПФМ могут изготавливаться изделия широкой номенклатуры: из порошков бронзы изготавливаются листы размером 1400×350 мм, трубы на их основе диаметром до 500 мм и длиной 1000 мм и более, диски диаметром от 52 до 305 мм и «чечевицы» на их основе, изделия в виде стаканов, таблеток, пробок и более сложной формы. Из порошков коррозионностойких сталей, никеля и титана изготавливаются диски диаметром до 200 мм, а также втулки и стаканчики диаметром до 80 мм.

ПФМ в процессе эксплуатации загрязняются оседающими на поверхности и в порах частицами, что с течением времени приводит к уменьшению их фильтрующей способности. Существует несколько основных способов регенерации фильтров (рис. 4.2).

Выбор способа регенерации определяется условиями работы фильтра, а также химической природой ПФМ и осаждаемого загрязнителя.



Рис. 4.1. Внешний вид ПФМ из металлических порошков



Рис. 4.2. Классификация основных методов регенерации ПФМ на металлической основе

Качество регенерации фильтрующих элементов можно оценивать по изменению ряда эксплуатационных показателей элемента: по приращению его массы, увеличению его начального гидравлического сопротивления, уменьшению ресурса работы до снижения

скорости фильтрования на заданную величину или до достижения максимально допустимого перепада давлений и т. д. В условиях фильтрования при постоянном давлении лучше всего оценивать регенерацию по изменению пропускной способности во времени. Эти показатели позволяют учитывать не только начальные после-регенерационные изменения фильтрующих свойств, связанные с остаточным загрязнением фильтрующей перегородки, но и интенсивность ее закупоривания после регенерации.

4.2. Механическая регенерация

Наиболее часто механическим методам регенерации подвергаются ПФМ, используемые для механической очистки жидкостей или газов от твердых частиц загрязнителя. В таких случаях эффективно механическое удаление (снятие) образовавшегося на поверхности слоя либо регенерация противодавлением. Во-втором случае, очищенную среду (жидкость или газ) пропускают через засоренный ПФМ в направлении, противоположном направлению фильтрации. Очистка должна производиться под давлением, превышающем давление фильтрации.

В большинстве случаев механическое удаление слоя задержанных частиц, которые в ряде случаев могут быть целевым продуктом для дальнейшего использования (как, например, при отделении белка от сыворотки), с поверхности фильтроэлементов обеспечивается с помощью скребков различной конструкции [1–3]. Так, в фильтре для использования при переработке пищевых продуктов [2] расположена, по крайней мере, одна скребковая пластинка, которая скребет внутреннюю поверхность фильтрующей стенки. В фильтре [3] скребки установлены между всеми фильтрующими дисками. Однако приведенные скребковые устройства относительно сложны в изготовлении и или приводят к излишнему расходу фильтруемой среды, или к потере производительности. Более предпочтительным представляется устройство, в котором скребки конструктивно выполнены в виде шнека. В работе [4] предложена конструкция фильтра для выделения белка из молочной сыворотки (рис. 4.3).

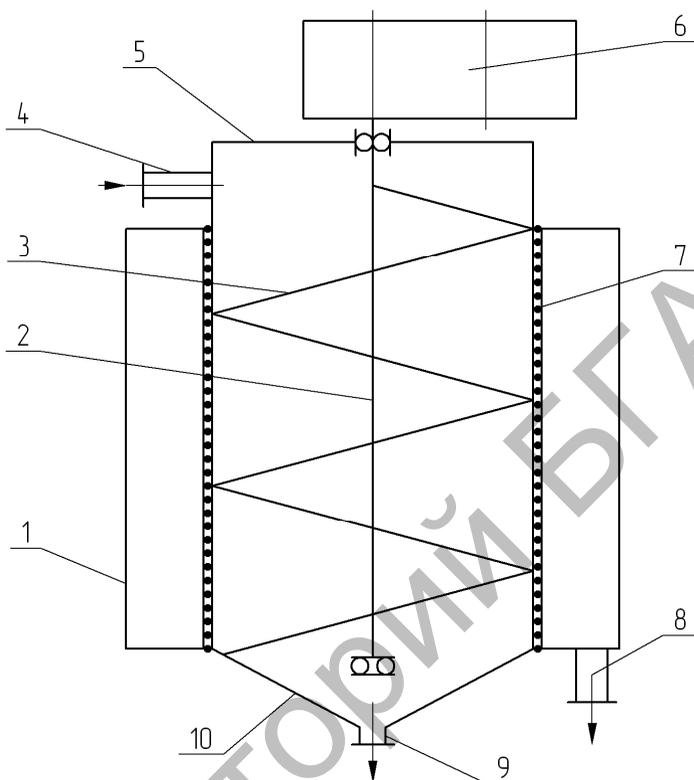


Рис. 4.3. Фильтр для выделения белка из молочной сыворотки:
 1 – корпус; 2 – вал; 3 – шнек; 4 – вводный патрубок; 5 – крышка;
 6 – привод; 7 – фильтрующий элемент; 8, 9 – выводные патрубки;
 10 – коническое дно

В компании «Стронг фильтр» разработан фильтр автоматический шнековый ФА-4, представленный на рис. 4.4. Данный фильтр применяется при фильтрации высоковязких и сильнозагрязненных сред. Фильтрующий элемент установлен неподвижно в вертикальном или горизонтальном корпусе. Во внутренней полости фильтрующего элемента расположен вращающийся шнек. Кромки шнека выполнены из упругого материала и плотно прилегают к рабочей поверхности фильтрующего элемента. Поток загрязненной среды поступает на внутреннюю поверхность фильтрующего элемента, примеси

и загрязнения удерживаются, а очищенная среда отводится из корпуса. В момент, когда перепад давления на фильтре достигает заданного значения, включается привод и шнек начинает вращаться. Кромки полотна шнека, вращаясь, снимают с рабочей поверхности слой осадка и перемещают его к камере выхода, вследствие чего фильтрующая способность щелевой решетки восстанавливается. Примеси и загрязнения накапливаются в камере выхода, уплотняются и периодически отводятся через штуцер выхода осадка.

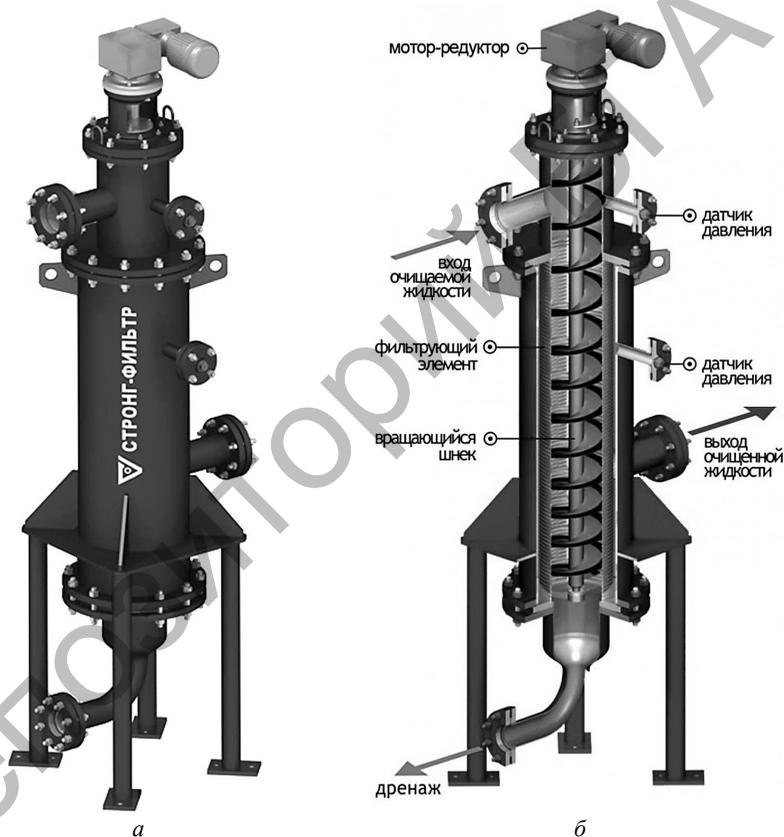


Рис. 4.4. Фильтр автоматический шнековый ФА-4:
а – внешний вид фильтра;
б – основные конструктивные элементы фильтра

Регенерация противотоком производится без демонтажа фильтрующих элементов. В большинстве случаев (в частности в непрерывных технологических потоках) устанавливаются параллельно два фильтра, один из которых работает, а другой в это время подвергается регенерации.

В зависимости от направления подачи промывочной жидкости промывка может быть прямоточной или противоточной. В основном применяют противоточную промывку, т. е. направление движения промывочной жидкости при регенерации противоположно направлению движения жидкости при фильтровании. Наряду с обычной гидродинамической противоточной регенерацией для интенсификации этого процесса применяют импульсную, пульсационную, вибрационную, вакуумную, центробежную, ультразвуковую регенерацию [5]. Основные способы противоточной регенерации фильтрующих элементов рассмотрены в работе [6].

Противоточная регенерация фильтрующих элементов подразделяется на две стадии [6]. Первая стадия имеет малую продолжительность (до 1,5 мин), однако за этот период удаляется до 80 % всех загрязнений, задержанных фильтрующими элементами. Последующая стадия регенерации, при которой удаляются частицы загрязнений из мелких капилляров, протекает довольно медленно и эффективность ее невелика, так как снижается перепад давления на фильтрующей перегородке.

В качестве примера на рис. 4.5 приведена схема способа регенерации фильтрующего элемента, описанного в работе [7]. Способ регенерации фильтрующего элемента осуществляется следующим образом. Фильтруемая жидкость поступает через узел подачи 1 по транспортирующему трубопроводу 2 в электронасос 4, работой которого руководит управляющий микроконтроллер 3, объединяя работу электронасоса 4, клапана сброса давления 5 и датчика давления на выходе 6 в единый контур. Далее фильтруемая жидкость поступает в первый фильтр (фильтр-накопитель) 7, снабженный обратным клапаном 8, затем во второй фильтр (фильтр тонкой очистки) 9.

Через автоматически заданный промежуток времени закрывается клапан 11 на выходе, срабатывает управляющий микроконтроллер 3, который одновременно открывает клапан сброса давления 5,

отключает электронасос 4 и останавливает таким образом фильтруемую жидкость. Газ (воздух, инертный газ), которым заполнено демпфирующее устройство 10, резко сжимается, на участке транспортирующего трубопровода 2, примыкающем к демпфирующему устройству 10. В отфильтрованной жидкости образуется обратный импульс, который выталкивает фильтруемую жидкость в направлении, обратном направлению фильтрации. В результате часть очищенной жидкости попадает во второй фильтр 9, унося осадок, образовавшийся на поверхности материала фильтрующего элемента, в первый фильтр 7, где происходит его накопление.

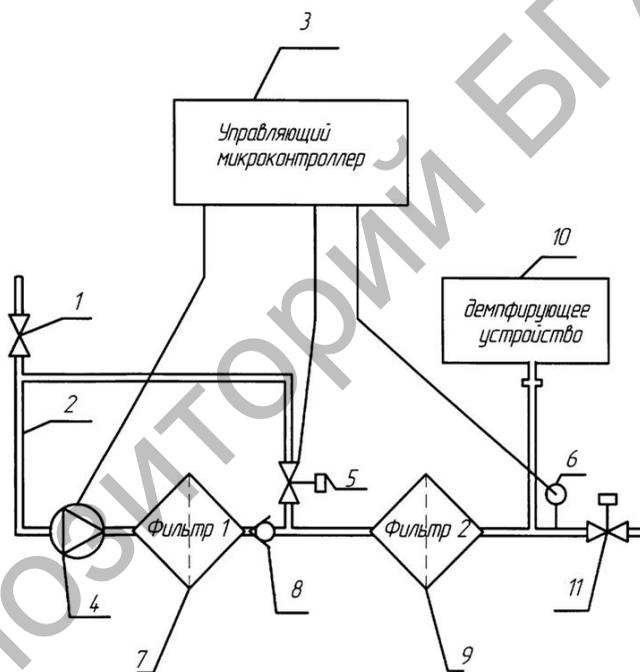


Рис. 4.5. Принципиальная технологическая схема способа регенерации фильтрующих элементов противотоком

В работе [8] показано, что в современных устройствах использование сжатого воздуха с обратной промывкой позволяет существенно увеличить межрегенерационный цикл работы фильтроэлементов.

К недостаткам известных методов регенерации противотоком относится относительно высокая продолжительность процесса. Повышение быстродействия и эффективности процесса за счет энергии взрыва, электрических импульсов или аккумулирования сжатого воздуха существенно усложняют и удорожают процесс, или делают его нецелесообразным. Анализ работы вакуумных фильтров [9] позволяет сделать вывод, что перспективным процессом регенерации фильтроэлементов противотоком является метод, основанный на предварительном вакуумировании камеры сброса загрязнений, перекрытии канала ввода очищаемой суспензии во входную полость фильтрующего устройства и резком открытии канала, соединяющего входную полость с камерой сброса загрязнений. Метод прост, не требует специального оборудования и обеспечивает высокое быстродействие процесса. На рис. 4.6 приведена принципиальная схема фильтрующего устройства с вакуумной регенерацией [10–12].

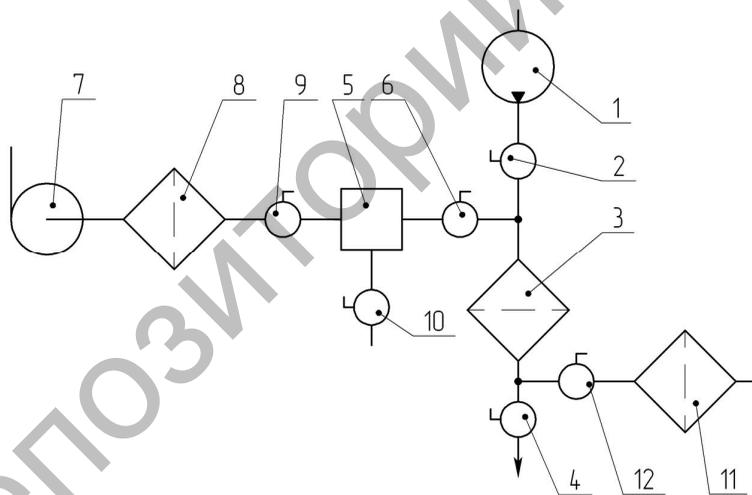


Рис. 4.6. принципиальная схема фильтрующего устройства с вакуумной регенерацией

Устройство работает следующим образом. При фильтрации исходной жидкости, подаваемой насосом 1, краны 2 и 4 находятся

в открытом положении, краны 6, 12 в закрытом. В это время вакуумный насос 7 включен и создает разрежение в емкости-накопителе 5, кран 9 открыт, кран 10 закрыт. Фильтр 8 предотвращает попадание частиц загрязнителя в насос 7. При достижении заданной степени разрежения кран 9 закрывают, вакуумный насос 7 выключают. При достижении на фильтре 3 критического перепада давления краны 2 и 4 закрывают, краны 6 и 12 открывают. Атмосфера очищенного фильтром 11 воздуха за счет разрежения в емкости-накопителе проходит через фильтр 3, осуществляя очистку фильтрующей поверхности установленного в нем фильтроэлемента, удаляя с его загрязненной стороны задержанный загрязнитель и унося его в емкость-накопитель. При этом для более полной очистки фильтроэлемента объем емкости-накопителя более чем в три раза превышает объем фильтра. По завершении процесса очистки (регенерации) краны 6 и 12 закрывают, краны 2 и 4 открывают и процесс фильтрации продолжается. По мере накопления в емкости-накопителе большого количества загрязнителя, загрязнитель удаляется открытием крана 10 при одновременно закрытых кранах 6 и 9.

К механическим методам регенерации ПФМ также относится ультразвуковая регенерация. Для этого фильтрующий элемент погружается в моющую жидкость, в которой возбуждаются ультразвуковые колебания. Возникающие в жидкости кавитационные явления, а также разнонаправленные потоки способствуют удалению загрязняющих частиц с поверхности ПФМ и из его пор. Очищаемые элементы располагают в ультразвуковой ванне так, чтобы направление очистки совпадало с линиями пучностей, то есть с направлением распространения изгибающих колебаний в диафрагме. В этом случае исключается явление «полосоватости», вызываемое наличием зон с различным уровнем кавитации, что позволяет добиться высокого качества очистки.

Ультразвуковая регенерация ПФМ в большинстве случаев производится вне фильтрующего устройства [13, 14] и является эффективным, экологически чистым и энергосберегающим методом очистки поверхностей. Высокая эффективность очистки ультразвуком основана на эффекте кавитации. Ультразвуковые волны создают в объеме жидкости области разряженного давления, в которых появляются кавитационные пузырьки. При смещении волны эти пузырьки резко сжимаются, высвобождая механическую энергию,

которая деструктивно воздействует на загрязнение. Кавитационный эффект во много раз усиливает воздействие моющих составов, используемых в процессе очистки.

Очистка происходит за счет совместного действия возникающих в жидкости под действием мощных ультразвуковых колебаний разных нелинейных эффектов (кавитация, акустические течения, звуковое давление, звукокапиллярный эффект), из которых кавитация играет решающую роль. Кавитационные пузырьки, пульсируя и схлопываясь вблизи загрязнений, разрушают их. Этот эффект известен как кавитационная эрозия.

Характерным представителем конструктивного исполнения, обеспечивающего применение ультразвуковых колебаний для регенерации фильтроэлементов в процессе очистки различных сред без разборки, является устройство, описанное в работе [15]. Один из вариантов конструкции приведен на рис. 4.7.

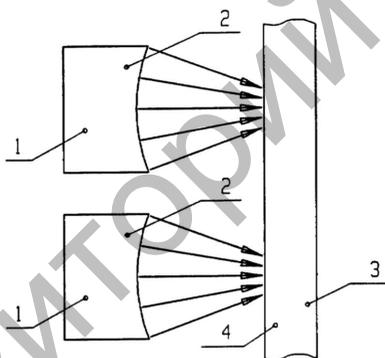


Рис. 4.7. Схема регенерации фильтроэлемента ультразвуком

Согласно рис. 4.7 генерирующая поверхность 2 ультразвукового генератора 1 имеет вогнутую конфигурацию. По отношению к фильтрующему элементу 3 всасывающего сушильного устройства генерирующая поверхность 2 установлена в таком положении, что лучи, исходящие от генерирующей поверхности 2, направлены на фильтрующую поверхность 4 фильтрующего элемента 3 так, что излучающий эффект лучей сфокусирован только на ограниченной площади фильтрующей поверхности 4. Согласно рисунку 4.7, две отдельные зоны фокусирования ультразвуковых лучей создаются

на фильтрующей поверхности 4. В общем случае ультразвуковые лучи, исходящие, по меньшей мере, от одного ультразвукового генератора, фокусируются в непосредственной близости от фильтрующей поверхности фильтрующего элемента, преимущественно на фильтрующей поверхности фильтрующего элемента для создания, по меньшей мере, одной зоны фокусирования ультразвукового луча.

4.3. Химическая регенерация

Регенерация химическими растворителями заключается в растворении частиц, застрявших в порах ПФМ, и производится в том случае, если обратная продувка малоэффективна. В качестве растворителей можно использовать кислоты, щелочи, ацетон, бензин, спирт и др. [5, 16–18].

Нередко при очистке питьевой воды в поровых каналах ПФМ в больших количествах происходит осаждение ржавчины, образующейся при окислении растворенного в воде железа. В таких случаях наиболее часто для регенерации фильтрующих элементов применяют специальные составы.

Главными недостатками регенерации фильтрующих элементов химическими растворителями являются частая необходимость демонтажа фильтра, длительность процесса растворения примесей, непосредственный контакт материала фильтра с агрессивными жидкостями.

4.4. Термическая регенерация

Термические методы регенерации связаны с нагревом. Регенерация ПФМ прокаливанием служит, главным образом, для удаления органических загрязнений. Ее применяют в том случае, если фильтрующий элемент обладает достаточной термической стойкостью [17, 19].

Термическая регенерация применяется относительно редко, что связано с необходимостью демонтажа фильтрующих устройств, применения специального термического оборудования и защитной среды, трудностью последующего удаления продуктов реакции термического разложения [16].

Литература к главе 4

1. Фильтр для очистки жидкости : пат. 2121864 РФ, МПК6 В 01 D 029/64, В 01 D 025/38 / В. Н. Банников, Ф. Э. Герценштейн, М. С. Муханов ; заявитель оренбургский научно-инженерный центр Уральского отделения РАН. – № 96114880 ; опубл. 20.11.1998. – 1998.

2. Фильтр для использования при переработке пищевых продуктов : пат. 2476068 РФ, МПК А 01 J 25/00, В 01 D 33/46 / Принц Артур, Кнапп Флориан. – № 20111298 ; заявл. 18.12.2009 ; опубл. 27.02.2013 // Офиу. бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собственности. – 2013. – № 6.

3. Фильтр для непрерывной фильтрации : пат. 2185223 РФ, МПК В 01 D 33/46 / С. Б. Зотов, А. Г. Титов, Г. П. Юрин, С. Н. Янпольский. – Заявл. 10.11.2000 ; опубл. 20.07.2002. – 2002.

4. Кравец, О. И. Повышение экологической безопасности молочных предприятий путем очистки сыворотки / О. И. Кравец, М. Н. Шинкарик // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : доклады Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14–15 апреля 2011 г. : / Белорус. гос. аграрн. технич. ун-т. – Минск, 2011. – Ч. 2. – С. 168–170.

5. Коваленко, В. П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В. П. Коваленко, А. А. Ильинский. – М. : Химия, 1982. – 272 с.

6. Берестюк, Г. И. Регенерация фильтров для разделения суспензий / Г. И. Берестюк. – М. : Химия, 1978. – 96 с.

7. Способ регенерации фильтрующего элемента : пат. 2329853 РФ, МПК В 0 D 29/66 / С. Е. Крыгин, Ю. А. Курьшин, А. В. Тарасов ; ООО НПП «Технофильтр». – № 20071050 ; заявл. 12.02.2007 ; опубл. 27.07.2008 // Офиц. бюл. / Федеральная служба по интеллектуал. собственности, патентам и товарным знакам. – 2007. – № 21.

8. Азаров, С. М. Оценка эффективности работы фильтрующих композиций при очистке воды оборотных систем / С. М. Азаров [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2009. – Вып. 32. – С. 114–120.

9. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник : в 2 кн. / В. Г. Айнштейн [и др.] ; под ред. В. Г. Айнштейна. – М. : Люкс; Высшая школа, 2003. – Кн. 1. – 912 с.

10. Применение вакуумных технологии для регенерации порошковых фильтрующих элементов / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 16–18 мая 2018 г. – Минск, 2018. – С. 105–107.

11. Ильющенко, А. Ф. Регенерация порошковых фильтрующих элементов в процессе фильтрации водной суспензии гидрогумата торфа / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2018», Минск, 7–8 июня 2018 г. // Белорус. гос. аграрн. технич. ун-т. – Минск, 2018. – С. 168–172.

12. Кусин, Р. А. Исследование межрегенерационного периода пористых порошковых материалов / Р. А. Кусин [и др.] // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе = Porous permeable materials: technologies and products thereof : материалы 6-ого Междунар. симп., Минск, 19–20 окт. 2017 г. / НАН Беларуси [и др.] : редкол. А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 181–188.

13. Шибряев, Б. Ф. Пористые проницаемые материалы. – М. : Металлургия, 1982. – 168 с.

14. Белов, С. В. Пористые проницаемые материалы / Белов С. В. [и др.]. – М. : Металлургия, 1987. – 335 с.

15. Способ устройства очистки фильтрующих элементов во всасывающих сушильных устройствах : пат. 2142318 РФ, МПК6 В 01 D 033/44 / Э. Бьярне ; заявитель Оутокумпу Минтек Ой. – № 95105894 ; опубл. 10.12.1999. – 1999.

16. Витязь, П. А. Фильтрующий материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капщевич, Р. А. Кусин. – Минск : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

17. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

18. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь [и др.]. – М. : Metallurgia, 1993. – 240 с.

19. Способ регенерации металлических пористых фильтров от полимерных загрязнений : а.с. 668695 СССР МПК: В 01 D 41/00 / П. А. Витязь [и др.] ; Науч.-исслед. ин-т порошковой металлургии Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института. – № 2532374 ; заявл. 30.08.77 ; опубл. 25.06.79. – 1979. – Бюл. № 23. – С. 16.

Репозиторий БГАТУ

Научное издание

Ильющенко Александр Федорович,
Кусин Руслан Анатольевич,
Закревский Игорь Владимирович и др.

**ПОРОШКОВЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ:
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ
И ПРИМЕНЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*
Редактор *Д. О. Бабакова*
Корректор *Д. О. Бабакова*
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 20.12.2018 г. Формат 60×84^{1/16}.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 8,54. Тираж 100 экз. Заказ 483.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.