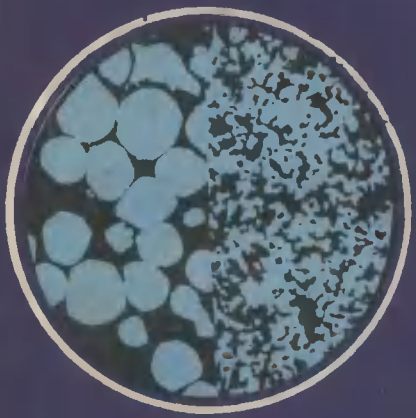
С. В. Белов



ПОРИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ в машиностроении

С. В. Белов

ПОРИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1976

6П3.3
Б 44
УДК 669—492.2

Рецензент **Б. А. Пермяков**

Белов С. В.

Б 44 Пористые металлы в машиностроении. М., «Машиностроение», 1976.

184 с. с ил.

В книге рассмотрены способы получения, характеристики структуры, гидравлические, механические, физические, химические и технологические свойства проницаемых пористых металлов, применяемых в машиностроении, энергомашиностроении, химической, авиационной, нефтяной и других отраслях промышленности. Основное внимание уделено свойствам пористых фильтрующих элементов для тонкой очистки жидкостей и газов и свойствам пористых конструкционных материалов современных машин, работающих в широком диапазоне изменения эксплуатационных параметров.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, инженеров-конструкторов, занимающихся проектированием систем с пористыми элементами конструкций.

Б $\frac{31203\text{-}058}{038(01)\text{-}76}$ 58-76 6П3.3

© Издательство «Машиностроение», 1976 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Глава I. **Виды пористых сред и способы получения изделий из пористых металлов** 5
1. Виды пористых сред 5
2. Форма и размеры частиц порошков 6
3. Состояние поверхности частиц и пор 11
4. Способы прессования пористых изделий 14
5. Спекание 19
Глава II. **Характеристики структуры пористых металлов** 23
1. Пористость 23
2. Проницаемость 30
3. Форма и коэффициент извилистости пор 32
4. Размеры пор 35
5. Вязкостный и инерционный коэффициенты 62
Глава III. **Основные сведения из теории фильтрации в пористых средах** 69
1. Режимы течения жидкостей в пористой среде . . . 70
2. Определяющие параметры пористой среды 75
3. Виды критериальных зависимостей, применяемых при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористых пород 79
Глава IV. **Гидравлическое сопротивление пористых металлов** . . . 84
1. Гидравлическое сопротивление пористых металлов из сферических частиц 84
2. Гидравлическое сопротивление пористых металлов из частиц произвольной формы 94
3. Пределы применимости закона ламинарной фильтрации в пористых металлах 98
4. Гидравлическое сопротивление пористых металлов при изменении температуры 106
5. Особенности течения некоторых реальных жидкостей в капиллярных каналах и пористых металлах . . . 108
Глава V. **Технологические и эксплуатационные свойства пористых металлов** 118
1. Механические свойства 118
2. Физические свойства 131
3. Химические свойства 139
4. Технологические свойства 147
Глава IV. **Применение пористых металлов в машиностроении и других отраслях промышленности** 150
1. Пористые фильтрующие элемеиты, их виды и свойства 151
2. Расчет параметров фильтрующих элементов из пористых металлов 167
3. Пористое охлаждение и расчет гидравлического сопротивления пористых элементов 170
4. Другие области применения проницаемых пористых металлов 173
Список литературы 177

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проницаемые пористые металлы все шире применяются в машиностроении, энергомашиностроении, авиационной, химической, нефтяной, пищевой, металлургической и других отраслях промышленности. Они используются как фильтрующие элементы в фильтрах тонкой очистки жидкостей и газов от примесей, как конструкционные материалы при создании камер сгорания и лопаток турбин с пористым охлаждением, как ионизаторы в ионных двигателях и т. п.

Пористые металлы (бронза, сталь, титан, вольфрам и т. д.) отличаются по технологическим приемам изготовления, свойствам и видам исходного материала.

Поровое пространство имеет сложное строение и его свойства определяются совокупностью таких характеристик, как пористость, форма и размеры пор, коэффициент гидравлического сопротивления и т. п. Важное значение имеют механические, физические, химические и технологические свойства изделий из пористых металлов.

В зависимости от области применения пористых металлов каждое из указанных свойств может иметь определяющее или второстепенное значение. Так, при использовании пористых металлов в качестве фильтрующих элементов фильтров тонкой очистки первостепенное значение имеют размеры пор и гидравлическое сопротивление пористого металла.

Применение пористых металлов в качестве конструкционных материалов для организации пористого охлаждения делает одной из важных характеристик равномерность распределения проницаемости по поверхности пористого элемента конструкции.

Использование пористых металлов в системах, где для успешного протекания процессов требуется развитая поверхность контакта между твердой стенкой и жидкостью или газом, предъявляет высокие требования по точности определения удельной поверхности пор.

Во всех случаях практического использования пористых металлов большое значение имеет стабильность свойств пористых металлов в процессе эксплуатации. Поскольку ряд свойств (гидравлическое сопротивление, размеры пор, состояние поверхности пор и др.) могут изменяться с течением времени при экс-

плуатации, то необходимо знать закономерности изменения этих свойств.

Разнообразие областей применения проницаемых пористых металлов и различия в параметрах и свойствах жидкостей или газов, протекающих через поровое пространство, выдвигают задачу всестороннего исследования свойств пористых металлов. Решение этой задачи сопряжено с рядом трудностей из-за большого числа видов пористых металлов и многообразия их характеристик.

Изучению свойств пористых металлов, их технологических и эксплуатационных характеристик уделено внимание в исследованиях, результаты которых опубликованы в отечественной и зарубежной периодической печати. В ряде работ [3, 9, 11, 28, 29, 60, 70, 71, 81, 86, 116] рассмотрены вопросы теории течения жидкостей и газов в пористой среде или вопросы производства пористых металлов без достаточно глубокого изучения характеристик структуры порового пространства, гидравлических, технологических и эксплуатационных свойств пористых металлов.

Практически все данные по свойствам пористых металлов содержатся в различных периодических изданиях, что значительно затрудняет их использование. Предлагаемое издание ставит целью обобщить результаты исследований по свойствам проницаемых пористых металлов и способам их получения. В книге подробно рассмотрены такие характеристики проницаемых пористых металлов, как пористость, проницаемость, средний и максимальный размеры пор, распределение пор по размерам, вязкостный и инерционный коэффициенты, состояние поверхности частиц и пор. При изучении свойств пористых металлов рассмотрено влияние технологических режимов изготовления и свойств исходной шихты на характеристики изделий из пористых металлов.

Учитывая, что практическое использование проницаемых пористых металлов всегда предусматривает фильтрацию жидкостей или газов через поровое пространство, большое внимание уделено изучению гидравлических характеристик пористых металлов, а также влиянию на эти характеристики условий эксплуатации: температуры и давления фильтруемой среды, свойств и степени загрязненности жидкости.

Глава I

ВИДЫ ПОРИСТЫХ СРЕД И СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

1. ВИДЫ ПОРИСТЫХ СРЕД

Различают пористые среды нескольких видов в зависимости от типа пор, формы и размеров частиц, из которых получена пористая среда.

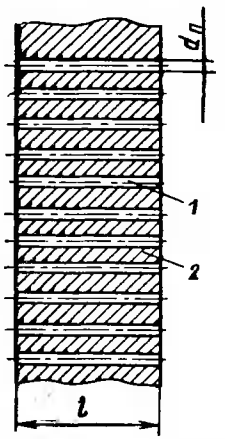
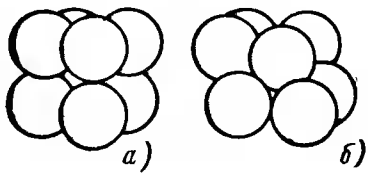


Рис. 1. Идеальная пористая среда: *1* — пора диаметром $d_п$ и длиной l; *2* — непроницаемый материал

Рис. 2. Фиктивная пористая среда: *а* — наименее плотная укладка сфер, пористость 0,476; *б* — наиболее плотная укладка сфер, пористость 0,259



Идеальной пористой средой (рис. 1) называют сплошную пластину, пронизанную в направлении фильтрации системой цилиндрических каналов одного диаметра, длина которых равна толщине пластины. Идеальную пористую среду иногда используют как модель реальной пористой среды. Однако как по строению пор, так и по характеру течения жидкости в порах идеальная пористая среда не подобна реальной пористой среде.

Фиктивная пористая среда (рис. 2) представляет собой пористый насадок, образованный сферическими частицами одного диаметра. В практике фиктивная пористая среда встречается лишь в специально подготовленных условиях. Основные параметры фиктивной пористой среды определяются из геометрических соображений и подробно изложены в работе [70]. Фиктивная пористая среда представляет собой упрощенную модель реальных пористых сред и позволяет в первом приближении оценить строение пор и характер течения жидкости в порах. Например, изучая строение пор фиктивной пористой среды, можно ут-

верждать, что при фильтрации через реальные поры жидкость последовательно проходит многочисленные сужения и расширения, причем все поры сообщаются друг с другом; путь частицы жидкости при фильтрации всегда больше толщины образца вследствие извилистости пор и т. п.

Реальная пористая среда имеет ряд разновидностей и отличается разнообразием размеров и видов пор. Все реальные пористые среды можно разбить на несколько групп:

насадки, образованные из сферических частиц разного размера;

насадки, образованные из несферических частиц разного размера;

пористые материалы из сферических частиц разного размера (пористая бронза, пористая медь и т. п.);

пористые материалы из частиц произвольной формы разного размера (пористая сталь, пористый нихром и т. п.);

пористые материалы, изготовленные из пакета сеток.

Изучение свойств пористых материалов и их гидравлического сопротивления показывает, что на характеристики пористых изделий существенно влияет форма, состояние поверхности и распределение частиц исходного порошка по размерам, а также способ прессования и режимы спекания пористых изделий. Поэтому прежде чем приступить к изучению характеристик пористых металлов, целесообразно рассмотреть кратко технологические особенности способов получения пористых изделий из металлических порошков.

Технологические процессы изготовления пористых изделий и свойства исходных порошков описаны в работах [9, 81 и 113], поэтому остановимся лишь на особенностях технологических процессов, оказывающих наибольшее влияние на свойства и гидравлическое сопротивление пористых изделий.

2. ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ

Форма частиц является важной характеристикой порошков. Она оказывает большое влияние как на технологические свойства порошков (прессуемость, насыпной вес и т. п.), так и на эксплуатационные характеристики пористых материалов (проницаемость, размер пор, прочность и т. п.). Как будет показано ниже, от формы частиц существенно зависит гидравлическое сопротивление пористого материала.

По форме частиц металлические порошки можно условно разделить на группы: сферические, каплеобразные и отчасти сферические, губчатые, дендритные, тарельчатые, осколочные (полученные дроблением и размолом в шаровых и вибрационных мельницах), волокнистые и лепестковидные (полученные плющением). Характерные формы некоторых порошков показаны на рис. 3.

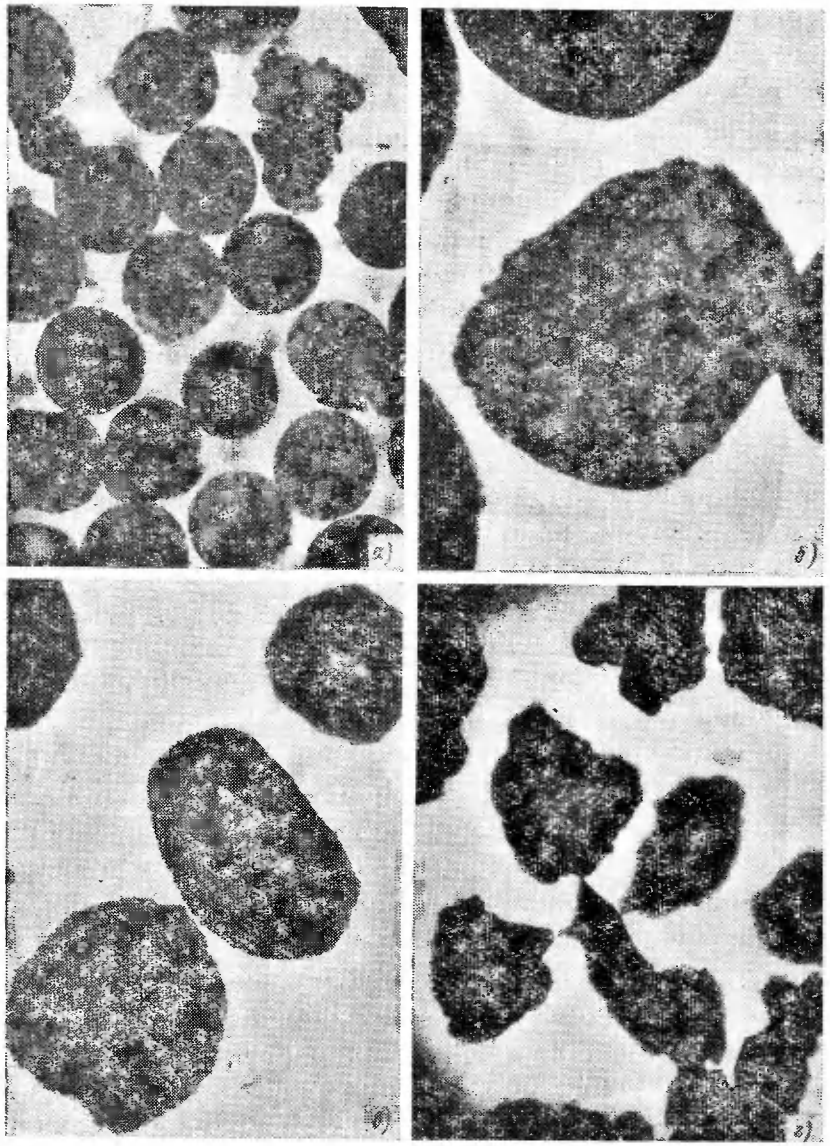


Рис. 3. Формы частиц металлических порошков:
а — сферические частицы бронзы, увеличение × 100; *б* — округлые частицы нержавеющей стали, увеличение × 200; *в* — губчатые частицы меди, увеличение × 70; *г* — тарельчатые частицы железа, увеличение ×70

Основные способы и закономерности получения сферических и несферических порошков описаны в работах [81 и 113], поэтому отметим лишь, что форма частиц порошка определяется

главным образом свойствами материала и способом получения порошка. Зависимость формы частиц от способа получения порошка и свойств материала показана в табл. 1.

Таблица 1

Форма частиц в зависимости от материала и способа получения порошка

Форма частиц	Материал	Способ получения порошка
Сферическая	Бронза Железо Никель Медь Серебро Нержавеющая сталь Сплавы никеля	Распыление
	Медь	Плазменное распыление
Каплеобразная и округлая	Железо Никель	Разложение карбонилов Восстановление газами в автоклавах, разложение карбонилов
Губчатая	Железо	Восстановление газами и углеродом
	Медь	Восстановление газами
	Вольфрам Молибден Тантал, ниобий Титан, цирконий Хром	Металлотермия
	Нержавеющая сталь Сплавы никеля	Совместное восстановление окислов
Дендритная	Никель Медь Серебро Хром	Электролиз
Тарельчатая	Железо Нержавеющая сталь Сплавы никеля	Вихревой размол

Данные табл. 1 несколько условны, так как в практике получения порошков хорошо известно, что изменяя режимы получения порошков, можно добиться значительного изменения формы

частиц (например, при распылении жидких металлов могут получаться частицы сферической и несферической формы). Поэтому всегда целесообразно для определения формы частиц провести исследования на оптическом или электронном микроскопах и установить форму частиц порошка по микрофотографиям.

Кроме формы частиц, на характеристики пористого материала существенно влияет гранулометрический состав порошка Экспериментальные исследования показывают, что уменьшение дисперсности размера частиц в порошках всегда приводит к увеличению стабильности характеристик пористых материалов, поэтому при подготовке порошков необходимо всегда стремиться к уменьшению отношения $d_{ч\,max}/d_{ч\,min}$ ($d_{ч\,max}$, $d_{ч\,min}$ — соответственно максимальный и минимальный размеры частиц).

Основными методами определения дисперсности порошков являются ситовой анализ, седиментация, микроскопический анализ и некоторые другие методы, подробно описанные в работе [113]. Остановимся кратко на основных характеристиках этих методов.

Простейшим методом исследования дисперсности порошков и разделения по фракциям является ситовой анализ, проводимый на стандартном наборе сит в специальном вибровстряхивателе. Каждое установленное ниже сито имеет меньший размер ячеек, чем расположенное выше. Масса навески для ситового анализа 100 г, длительность рассева 15—20 мин, после чего находят массу частиц на сите и определяют массовое распределение частиц по размерам. В соответствии с ГОСТ 3584—73 установлены следующие размеры сторон ячеек сит в свету: 800, 500, 450, 315, 250, 180, 160, 125, 100, 80, 63, 56 и 40 мкм. Таким образом, если частица имеет размер 73 мкм, то она пройдет сито с размером стороны ячейки 80 мкм и задержится следующим ситом со стороной ячейки 63 мкм. Все частицы, оказавшиеся на сетке со стороной ячейки 64 мкм, условно обозначаются фракцией $-80 \div +63$ мкм.

Основной недостаток ситового анализа — невозможность измерения зернистости частиц менее 40 мкм, хотя в практике исследовательских работ уже нашли применение и микросита с размерами сторон ячеек в 30, 20, 10 и 5 мкм.

Фракционный состав тонкодисперсных порошков определяют с помощью седиментации — метода, основанного на определении скорости оседания частиц в вязких средах.

Разделение тонкодисперсных порошков по фракциям может производиться в специальных сепараторах, за счет величины лобового сопротивления частиц в вихревом воздушном потоке.

Кроме указанных выше методов разделения порошков по фракциям может применяться метод микроскопического анализа, основанный на измерении размеров частиц под микроскопом. Этот метод дает хорошие результаты для порошков из сферических и округлых частиц.

Определить размеры частиц в трех измерениях под микроскопом можно непосредственно путем наведения микроскопа на верхнюю и нижнюю границы поверхности частицы. Такой метод применим для частиц с размером более 2—3 мкм и имеющих цилиндрическую или изометрическую форму, для которых измерение толщины не нужно, так как она совпадает с шириной частицы.

Наибольшую трудность представляет измерение толщины пластинчатых частиц, обычно расположенных своими широкими сторонами перпендикулярно к оси микроскопа. Определение размеров частиц под микроскопом весьма трудоемкая задача; поэтому на практике обычно ограничиваются определением среднего размера проекции частицы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, предпочтительно максимального и минимального протяжения, находят среднее арифметическое этих измерений и принимают его за размер частицы.

Для всех методов разделения порошков на фракции характерно то, что всегда фракция содержит частицы в определенном интервале размеров. Распределение частиц по размерам в пределах каждой фракции можно установить методом микроскопического анализа.

По результатам измерения обычно строят дифференциальные (рис. 4) или интегральные (рис. 5) кривые распределения

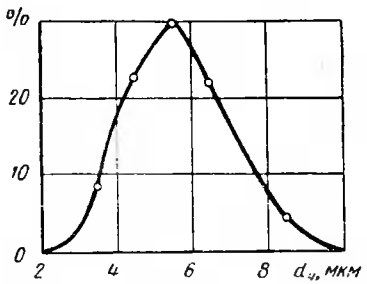


Рис 4. Дифференциальная кривая распределения частиц по размерам

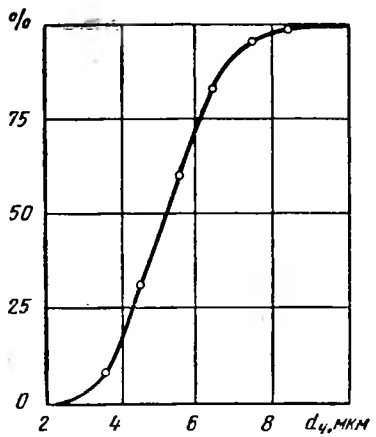


Рис. 5. Интегральная кривая распределения частиц по размерам

частиц по размерам в данной фракции порошка в виде зависимости относительного весового распределения частиц по размерам от размера частиц порошка. Распределение частиц по размерам наиболее полно характеризует состав фракции порошка, однако в практике для сравнения порошков часто пользуются понятием среднего размера частиц фракции (или эффективного диаметра частиц).

Средний размер частиц фракции порошка может быть найден по одной из формул:

среднеарифметический размер частиц

$$d_{ч\,ср} = \int_0^\infty d_ч f(d)\,dd \approx \frac{\sum_1^n d_i N_i}{\sum_1^n N_i}; \qquad (1)$$

среднеквадратичный (средний по поверхности) размер частиц

$$d_{ч\,ср} = \left[\int_0^\infty d_ч^2 f(d)\,dd\right]^{1/2} \approx \left[\frac{\sum_1^n d_i^2 N_i}{\sum_1^n N_i}\right]^{1/2}; \qquad (2)$$

среднекубический (средний по объему или по весу) размер частиц

$$d_{ч\,ср} = \left[\int_0^\infty d_ч^3 f(d)\,dd\right]^{1/3} \approx \left[\frac{\sum_1^n d_i^3 N_i}{\sum_1^n N_i}\right]^{1/3}, \qquad (3)$$

где $f(d)$ — функция плотности распределения или дифференциальная кривая распределения частиц по размерам; N_i — число частиц в i-м интервале; d_i — размер частицы, соответствующий середине i-го интервала.

Определенные по различным формулам средние размеры частиц могут заметно отличаться один от другого. На практике обычно пользуются для сравнения фракций порошков понятием среднеарифметического размера частиц.

3. СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ И ПОР

Частицы порошков отличаются не только формой, но и состоянием поверхности. Состояние поверхности частиц во многом определяется технологическими приемами получения частиц и свойствами исходного материала. Показанные на рис. 3 микрофотографии частиц различной формы позволяют оценить качественно состояние поверхности частиц. Так, сферические частицы, как правило, имеют гладкую поверхность с округлыми выступами или приливами в виде сферических частиц значительно меньшего размера. Частицы произвольной формы, как, например, тарельчатые или лепестковые, имеют на поверхности большое число выступов и впадин различной формы. Поверхность таких частиц в значительной степени шероховатая и практически не содержит гладких участков.

Состояние поверхности частиц определяет не только формовочные свойства порошков, но и существенно влияет на структуру порового пространства. Чем сложнее форма частиц и больше неровностей на поверхности частиц, тем искривленнее и неоднороднее будут поры спеченного пористого металла. Структура порового пространства зависит не только от формы неровностей, но и от количества неровностей на единицу площади поверхности частиц, а при небольшом отклонении в размерах частиц (например, в пределах одной стандартной фракции) — от количества неровностей, приходящихся на одну частицу.

Для изучения состояния поверхности частиц порошков различной формы в исследованиях были взяты порошки бронзы, стали 50ХГ, меди и железа различного фракционного состава. Состояние поверхности изучалось по микрофотографиям частиц, полученным при увеличениях от 70 до 400 раз. В качестве критериев оценки состояния поверхности частиц приняты: высота неровностей на поверхности частиц (δ) и количество неровностей, приходящихся на одну частицу.

Результаты исследований, приведенные в табл. 2, показывают, что высота неровностей на поверхности частиц любой формы составляет от 5 до 25 мкм, причем большинство частиц имеют неровности высотой от 15 до 20 мкм. Количество неровностей, приходящихся на одну частицу, существенно зависит от формы частиц. Если частица сферической формы содержит в среднем около одной неровности на своей поверхности, то частица тарельчатой или лепестковой формы — до 5—6 неровностей.

В табл. 2 приведены также некоторые характеристики пористых образцов, изготовленных из исследованных частиц, которые позволяют оценить относительную шероховатость поверхности пор, а также установить зависимость относительной шероховатости поверхности пор от пористости образцов. За относительную шероховатость принято отношение высоты неровностей на поверхности частиц к среднему размеру пор пористых образцов, т. е. отношение $\delta/d_{\text{п ср}}$.

Результаты исследований показывают, что относительная шероховатость пор может достигать очень больших значений. В некоторых случаях она равна или больше единицы. Применительно к пористым материалам возможность получения такой относительной шероховатости свидетельствует о том, что выступы на поверхности частиц либо деформируются при формовании пористой среды, либо попадают в пространство с размером бóльшим, чем средний размер пор.

Рост относительной шероховатости поверхности пор должен всегда приводить к усложнению структуры порового канала, а следовательно, и к усложнению траектории частицы жидкости при ее движении в порах.

Исследования показали, что уменьшение пористости образцов всегда сопровождается увеличением относительной шероховатости поверхности пор, что позволяет считать структуру порового пространства образцов меньшей пористости (до определенного предела уменьшения пористости) более сложной по сравнению со структурой образцов высокой пористости.

При использовании данных табл. 2 необходимо учитывать, что не во всех случаях состояние поверхности частиц в полной мере характеризует состояние поверхности пор, так как при прессовании и особенно при спекании поверхность частиц может

Таблица 2

Количество и высота неровностей на поверхности частиц и относительная шероховатость поверхности пор

Материал частиц	Форма частиц	Размер частиц, мкм	Увеличение	Высота неровностей δ, мкм	Число неровностей на одну частицу	Пористость	Средний размер пор, мкм	Относительная шероховатость $\delta/d_{\text{пср}}$
Бронза	Сферическая	—160÷+125	100	17,2	0,9	0,38	57,0	0,302
			200	8,5	0,915	0,38	57,0	0,15
Сталь 50ХГ	Сферическая	—100÷+63	400	5,57	1,11	0,20	13,5	0,413
			200	5,57	1,11	0,30	23,6	0,235
Сталь 50ХГ	80% сферические +20% несферические	—200÷+100	100	19,6	1,25	0,20	13,5	1,45
			200	19,6	1,25	0,30	30,0	0,654
Сталь 50ХГ	20% сферические +80% несферические	—315÷+200	70	21,6	2,21	0,20	18,0	1,2
			70	21,6	2,21	0,30	41,0	0,527
			200	10,4	4,0	0,20	18,0	0,578
			200	10,4	4,0	0,30	41,0	0,254
Сталь 50ХГ	10% сферические +90% несферические	—500÷+315	70	25,0	6,0	0,20	28,5	0,88
			200	21,5	5,0	0,30	65,2	0,33
Сталь 50ХГ	Лепестковая	—63÷+35	200	4,42	4,71	0,20	2,0	2,21
			400	4,42	6,16	0,35	6,0	0,736
Сталь 50ХГ	Лепестковая	—500÷+315	200	15,7	4,65	0,20	16,3	0,964
			200	15,7	4,65	0,35	50,0	0,314
Медь	Округлая	—500÷+315	200	4,14	10,0	0,48	155,0	0,026
Железо	Тарельчатая	—250÷+150	70	14,9	6,66	0,25	12,5	1,20
			200	16,4	6,00	0,50	0,50	0,328

существенно измениться. Тем не менее определенная связь между состоянием поверхности частиц и структурой, а также поверхностью пор всегда существует.

4. СПОСОБЫ ПРЕССОВАНИЯ ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для получения пористых изделий необходимой формы, заданных свойств и размеров обычно применяют прессование различных порошков. Наибольшее применение получили следующие способы: прессование в пресс-формах, гидростатическое прессование, мундштучное прессование и прокат металлических порошков.

Основные требования, которые учитываются при выборе способа прессования, сводятся к возможности получения изделий заданных форм и размеров, а также требуемого распределения пористости и проницаемости по объему и площади фильтрации пористого изделия. Практически во всех случаях требуется равномерное распределение пористости и проницаемости по объему изделия, однако возможны и случаи, требующие неравномерного распределения пористости и проницаемости по объему пористого тела.

Прессование в пресс-формах. На рис. 6 показана пресс-форма для изготовления фильтрующих элементов способом одностороннего прессования, а на рис. 7 — для изготовления пористых изделий способом двухстороннего прессования. Основные операции при изготовлении пористых изделий прессованием: засыпка и разравнивание порошка по поверхности нижнего пуансона, прессование, извлечение готового изделия из пресс-формы.

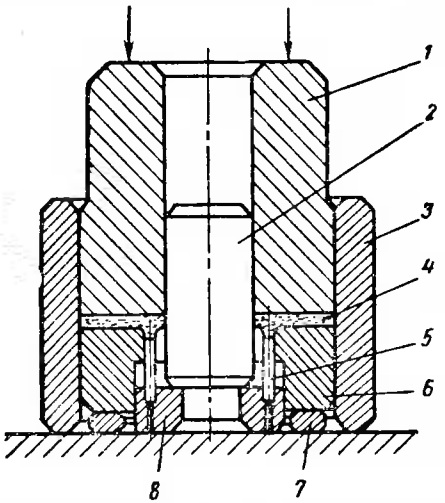


Рис. 6. Пресс-форма для изготовления пористых изделий способом одностороннего прессования:
1 — верхний пуансон; *2* — стержень; *3* — матрица; *4* — порошок; *5* — штифт; *6* — нижний пуансон; *7* — кольцо; *8* — вилка

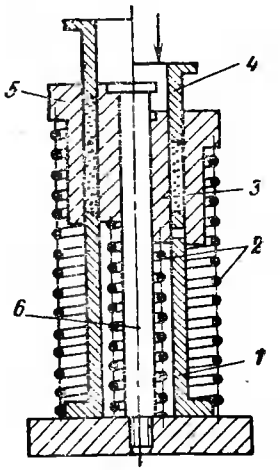


Рис. 7. Пресс-форма для изготовления пористых изделий способом двухстороннего прессования:
1 — нижний пуансон; *2* — пружина; *3* — втулка; *4* — верхний пуансон; *5* — матрица; *6* — стержень

Хорошую формуемость (способность порошков сохранять форму после извлечения из пресс-формы) имеют порошки из несферических частиц пластичных металлов и сплавов (железо, никель, медь и их сплавы). Несферические порошки хрупких металлов и их сплавов имеют плохую формуемость и прессуются с применением наполнителей (например, парафина и др.).

Уплотнение порошков в процессе прессования вызывает увеличение их контактной поверхности. При этом в зависимости от удельного давления прессования, фракционного состава металлического порошка, формы прессуемого изделия, количества и качества наполнителя частицы порошка укладываются по определенной схеме, что предопределяет основные свойства пористого изделия (равномерность проницаемости по поверхности фильтрации, распределение пор по размерам и т. п.).

Одним из недостатков прессования в пресс-формах является неравномерное распределение пористости в спрессованных изделиях. Это вызвано влиянием сил трения, возникающих между перемещающимися частицами порошка и стенками пресс-формы. Вследствие этого уменьшается осевое давление по высоте засыпки порошка, что приводит к неравномерному распределению пористости в спрессованных изделиях. Чтобы избежать неравномерного распределения пористости по объему изделия, применяют пресс-формы с высокой частотой обработки стенок, пресс-формы с двухсторонним прессованием, пресс-формы с плавающими стержнями или матрицами, а также специальные смазки, снижающие коэффициент трения порошка о стенки пресс-формы. Однако эти меры не позволяют полностью устранить основной недостаток изделий, получаемых прессованием — неравномерное распределение пористости изделия по высоте.

Прессование в пресс-формах не обеспечивает также надежного изготовления фильтрующих элементов типа втулки и более сложных форм, имеющих малую толщину и большой диаметр. Прессованием в пресс-формах обычно получают пористые изделия простых форм: диски, кольца, втулки и пластины ограниченных размеров.

Гидростатическое прессование — это всестороннее обжатие жидкостью металлического порошка, заключенного в эластичную оболочку. Так как в этом случае нет перемещения частиц порошка по отношению к стенкам матрицы и на каждый участок поверхности засыпки порошка действует равномерное усилие, то усадка при прессовании порошка происходит равномерно и пористые изделия имеют одинаковую плотность по высоте.

На рис. 8 показана пресс-форма для гидростатического прессования фильтрующих элементов в виде втулок, состоящая из

разъемной матрицы, стяжных и центрирующих колец, перфорированного стержня и резиновых оболочек и манжет.

Перед прессованием разъемную матрицу собирают в одно целое стяжными кольцами и поверх матрицы надевают резиновую оболочку *4*, предотвращающую попадание рабочей жидкости в порошок через разъем матрицы. Перфорированный стержень с резиновой оболочкой *6* вводят в матрицу и центрируют кольцом *1*. Сверху перфорированный стержень центрируют в момент засыпки порошка специальным приспособлением. Засыпку порошка ведут на вибростоле для обеспечения равномерности распределения порошка по высоте матрицы. По окончании засыпки порошка центрирующее приспособление снимают и устанавливают верхнее центрирующее кольцо. Выступающие концы резиновой оболочки натягивают на наружную резиновую оболочку и завязывают резиновой манжетой.

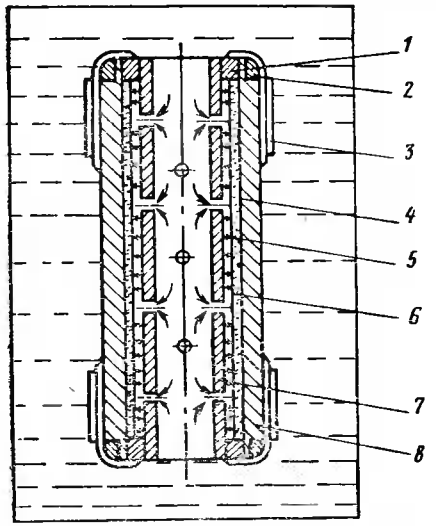


Рис. 8. Пресс-форма для гидростатического прессования втулок:
1 — кольцо; *2* — стяжное кольцо; *3* — резиновая манжета; *4* — резиновая оболочка; *5* — порошок; *6* — резиновая оболочка; *7* — стержень; 8 — матрица

Подготовленную таким образом пресс-форму закладывают в гидростат, куда под давлением до 1—30 тс/см² нагнетается рабочая жидкость. Прошедшая через отверстия перфорированного стержня рабочая жидкость давит на резиновую оболочку и обжимает порошок вокруг матрицы.

Пористые изделия, полученные гидростатическим прессованием, как правило, имеют равномерное распределение пористости по высоте изделия. В работе [118] на примере изготовления пористых втулок из стали 12Х18Н10 с наружным диаметром 40 мм, толщиной стенки 3 мм и переменной длиной от 45 до 135 мм, сравниваются свойства втулок, полученных двухсторонним и гидростатическим прессованием. Опытные данные показывают, что степень неравномерности плотности прессовок (при прессовании в пресс-формах) сильно возрастает с увеличением их высоты. Если принять, что неравномерность плотности по высоте не должна превышать 10%, то высота прессовок втулки 40×34 мм не должна быть больше 100 мм.

Исследование втулок тех же размеров, отпрессованных гидростатическим прессованием, показало, что во всех случаях втулки, изготовленные из сферического порошка, имеют неравномерность плотности не более 0,6%, а прессовки, изготовленные из несферических частиц, имеют несколько большую неравномерность плотности, однако не превышающую 1—2%.

Способ гидростатического прессования всегда требует меньших давлений прессования для получения изделий одинаковой пористости.

В работе [34] сравниваются свойства пористых брикетов из порошка стали, полученных методом обычного одно- и двухстороннего прессования в металлических пресс-формах при давлении до 12 тс/см² и гидростатическим прессованием в резиновых чехлах с приложением давлений до 30 тс/см². Опыты проводились на порошках нержавеющей стали 12Х18Н10 различной крупности с размером частиц <280, 7 и 5 мкм, полученных методом восстановления окислов легирующих элементов в смеси с железным порошком и гидридом кальция. Порошок крупностью частиц меньше 5 мкм получали дополнительным измельчением спрессованных брикетов электроискровым способом.

Зависимости относительной плотности брикетов от давления прессования показывают, что при одинаковом давлении прессования наибольшая плотность достигается при гидростатическом прессовании. Для получения брикетов равной плотности гидростатическое давление должно быть в 1,5—2 раза меньше, чем при двухстороннем прессовании в стальной пресс-форме, и почти втрое меньше, чем при одностороннем прессовании.

Пористые изделия, полученные гидростатическим прессованием, имеют неровную поверхность и должны подвергаться механической обработке перед спеканием для получения заданных размеров.

Гидростатический способ прессования позволяет получать фильтрующие элементы в виде втулок, труб длиной до 1 м, фланцев и т. д.

Мундштучное прессование. Для получения пористых труб и стержней большой длины применяют мундштучное прессование, заключающееся в продавливании смеси порошка с пластификатором через мундштук. Изготовленные таким способом пористые изделия имеют равномерное распределение пористости и проницаемости. В отличие от гидростатического мундштучное прессование обеспечивает получение изделий с точно фиксированными размерами. Процесс мундштучного прессования технологичен.

На рис. 9 приведена схема мундштучного прессования пористых труб. Смесь порошка и пластификатора засыпают в полость пресс-формы и предварительно подпрессовывают под небольшим давлением на прессе (положение *I*). Затем центрирующую втулку *8* убирают и шихту выпрессовывают через мундштук.

Способом мундштучного прессования можно получать пористые трубы диаметром 50—100 мм и длиной до 500 мм.

Недостатком этого способа прессования является необходимость введения в порошковую шихту пластификатора, что осложняет процесс спекания и может ухудшить качество пористого изделия.

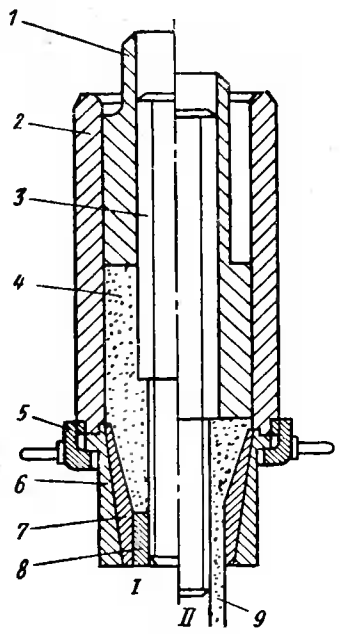
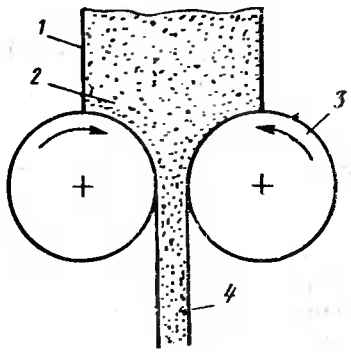


Рис. 9. Приспособление для мундштучного прессования труб (*I* — начало прессования; *II* — окончание прессования):
1 — пуансон; *2* — матрица; *3* — игла; *4* — шихта; *5* — установочная гайка; *6* — обойма; *7* — мундштук; *8* — центрирующая втулка; *9* — пористая труба

Рис. 10. Схема прокатки порошка:
1 — бункер; *2* — порошок; *3* — валки; *4* — пористая лента



Прокаткой металлических порошков получают пористые ленты различного назначения (рис. 10). В отличие от обычных прокатных станов валки станов для прокатки металлических порошков располагают в горизонтальной плоскости. Сверху на валки устанавливают бункер для создания столба порошка постоянной высоты. При вращении валков порошок, поступающий из бункера, увлекается в раствор между валками. По мере прохождения этой щели порошок уплотняется, и по выходе из очага деформации получается лента с той или иной пористостью, определяемой скоростью прокатки, раствором валков, количеством порошка, поступающего в зону деформации, характеристиками порошка и т. д.

Прокаткой металлических порошков можно получать пористые ленты различной толщины от 0,14 до 5,0 мм, шириной до 300—400 мм и пористостью до 0,70.

На Выксунском металлургическом заводе [121] освоено промышленное производство пористых лент из порошка нержавеющей стали и титана по технологии, предложенной Горьковским политехническим институтом им. Жданова.

5. СПЕКАНИЕ

Спекание — основная заключительная операция технологии изготовления пористых изделий — состоит в нагреве и выдержке спрессованных изделий при температуре спекания ($T_{сп}$), меньшей температуры плавления ($T_{пл}$) металла частиц. Обычно $T_{сп} = (0{,}7 \div 0{,}8) T_{пл}$. При спекании происходит окончательное формирование физико-механических свойств пористых изделий.

Спекание сопровождается целым рядом процессов (объемная и поверхностная диффузия, диффузия атомов через газовую фазу, крип, рекристаллизация), которые происходят при нагревании тел.

По современным представлениям механизм диффузии состоит в следующем: в кристаллической решетке в условиях термодинамического равновесия не все узлы замещены атомами, а имеются вакансии. Перемещение атомов в решетке может рассматриваться как последовательное замещение вакансий. Кроме вакансионного механизма диффузии рассматриваются как возможные, также и другие механизмы: прямой обмен атомов местами, перемещение атомов по междоузлиям, кольцевая диффузия.

Изучение механизма замещения вакансий показывает, что вакансии как бы стекают от поверхности поры, а поток атомов, наоборот, направлен к поверхности поры, что и приводит к диффузионному зарастанию поры атомами (объемная диффузия). Однако в реальных условиях спекания обмен вакансий в пористом теле, как правило, происходит между участками с отрицательной и положительной кривизной. Возникающий между ними градиент вакансий способствует сглаживанию рельефа пор, так как вещество с выступов перемещается во впадины (поверхностная диффузия). Таким образом, рельеф поверхности пор сглаживается с помощью трех механизмов: объемной диффузии, поверхностной диффузии и переноса атомов через газовую фазу, причем основную роль играет механизм поверхностной диффузии.

Спекание пористых тел сопровождается почти во всех случаях усадкой, для понимания механизма которой целесообразно рассмотреть явление ползучести кристаллических тел под нагрузкой (крип). В условиях спекания действующими силами являются силы избыточного капиллярного давления, возникающие на вогнутых и выпуклых поверхностях твердых и жидких частиц пористого тела. Влияние капиллярных сил на процесс усадки легко проследить, если к спекаемому телу приложить внешние силы одного порядка с капиллярными.

Опыты показывают, что внешне приложенные силы одного порядка с капиллярными силами существенно влияют на величину усадки пористого тела. Усадка пористого тела сопровождается уменьшением объема пор и приближением свойств пористого тела к свойствам основного материала.

Важную роль в процессах диффузии и крипа играют границы зерен, поэтому в этих явлениях имеет значение рекристаллизация на границах зерен, где, как правило, нарушено кристаллическое строение зерен.

Протекание процессов диффузии, крипа, рекристаллизации, переноса атомов через газовую фазу существенно зависит от температуры и продолжительности спекания, характеристик спрессованных тел, среды, в которой происходит спекание и др. Результатом спекания является изменение плотности и физико-механических свойств спекаемого тела в сторону приближения их к свойствам беспористого материала.

Нагрев пористых тел при спекании сопровождается прежде всего удалением паров, газов и связующих веществ вследствие сорбции, испарения и выгорания. Параллельно или вслед за этим, если спекание идет в восстановительной среде, начинается восстановление окисных пленок. Образование металлических контактов и увеличение их площади на ранних стадиях спекания происходит прежде всего вследствие восстановления окисных пленок на поверхности частиц. В момент восстановления молекулы окисла атомы имеют повышенную диффузионную активность и поэтому возможно образование перемычек между отдельными частицами. Возникновение контактов между частицами зависит не только от наличия окисных и других пленок, но и от взаимного расположения частиц и их кристаллической ориентировки.

С повышением температуры в спекаемом теле развивается процесс рекристаллизации, который начинается прежде всего в напряженных местах межчастичных контактов. Однако индивидуальные очертания частиц в спрессованном теле исчезают при гораздо более высоких температурах, чем температура рекристаллизации деформированных приконтактных участков. Рекристаллизация в основном заканчивается до начала обнаружения заметного изменения пористости при спекании.

Дальнейшее повышение температуры спекания приводит к увеличению подвижности атомов и к интенсификации усадки спекаемого тела. Усадка протекает сначала на контактах, при этом уничтожаются в первую очередь поры, образованные выступами и впадинами на поверхности частиц, затем исчезают межчастичные поры.

Во время спекания происходит не только уменьшение размеров и количества пор, но и изменение их формы. Впадины и выступы на поверхности пор в значительной части сглаживаются вследствие процессов поверхностной диффузии и переноса атомов через газовую фазу. Однако форма пор не стремится к строго сферической в связи с анизотропией поверхностного натяжения. Обычно после долговременного спекания на микрошлифах можно наблюдать поры, имеющие кубическую огранку, что подтверждают данные работы [113].

На размеры пор существенно влияет процесс собирательной рекристаллизации, т. е. процесс коагуляции частиц при спекании. В связи с тем, что поры препятствуют протеканию межчастичной собирательной рекристаллизации, последняя в бóльшей степени зависит от размера спрессованных частиц, так как с увеличением величины частиц возрастает и размер пор. При спекании тел, спрессованных из мелких порошков, контуры отдельных частиц исчезают раньше, чем в телах из крупных порошков, где индивидуальные контуры порошковых частиц различимы даже после спекания при высоких температурах.

В работе [43] показано, что при спекании прессовок из сферических порошков, в особенности мелких, значительно возрастает их плотность. Данные по плотности образцов, полученных гидростатическим прессованием и затем спеченных в вакууме при 2750° С с выдержкой 1,5 ч, приведены ниже:

Диаметр частиц, мкм	5—7	7—10
Относительная плотность образцов:		
спрессованных	0,542	0,579
спеченных	0,942	0,926

Интенсивное протекание межчастичной собирательной рекристаллизации можно наблюдать при температурах спекания, равных $(0{,}75—0{,}85)\,T_{пл}$ и выше.

На процессы спекания существенно влияют величина частиц, распределение их по размерам, состояние поверхности частиц, содержание окислов и несовершенство кристаллического строения.

Величина частицы не только влияет на изменение плотности, но и определяет свойства спеченных тел: так, при одинаковой пористости механические свойства тем выше, чем дисперснее порошок. Это объясняется большим количеством межчастичных контактов в случае мелких порошков и более интенсивным зарастанием межчастичных впадин и сглаживанием рельефа пор.

Экспериментальные данные однозначно показывают, что с повышением дисперсности порошка и неоднородности рельефа поверхности частиц увеличивается удельная поверхность и усадка при спекании. Наличие выступов и впадин на поверхности частиц значительно активизирует усадку вследствие образования микропор с малым радиусом кривизны на стыках частиц. Содержание дефектов кристаллического строения в этих выступах также повышенное, что способствует активированию диффузионной подвижности атомов.

Сведения, приведенные в настоящей главе, о видах пористых материалов, форме, размерах и состоянии поверхности частиц, способах прессования и режимах спекания пористых изделий указывают на большое разнообразие свойств исходных порошков и возможных сочетаний режимов технологического процесса получения пористых изделий. Поскольку свойства пористых материалов и их гидравлические характеристики во многом зависят от технологических режимов получения пористых изделий и состава шихты, то их изучение необходимо начинать с выявления общих закономерностей, присущих отдельным видам пористых сред.

Очевидно, что пористые изделия, изготовленные из частиц сферической формы с одинаковым состоянием поверхности частиц, должны иметь общие закономерности в свойствах, если при прессовании и спекании не изменяются существенно форма и поверхность частиц.

С другой стороны, пористые изделия, изготовленные из несферических частиц, могут приблизить свои свойства к свойствам изделий, изготовленных из сферических частиц, если при спекании частицы принимают форму, близкую к сферической, а поверхность пор сглаживается.

На свойства пористых изделий и распределение этих свойств по объему пористого тела влияет способ прессования. Изделия, изготовленные одним способом формования шихты, могут иметь специфические свойства.

Особое влияние на свойства пористых изделий могут оказать режимы процесса спекания: температура, время выдержки, темп нагрева, а также свойства материала частиц. При спекании может значительно измениться состояние поверхности частиц (пор) и структура пористого пространства вследствие коагуляции частиц.

Глава II

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Пористые среды, в том числе и пористые металлы, характеризуются целым рядом параметров, каждый из которых в отдельности не дает полного представления о свойствах пористого тела. К числу параметров, определяющих пористую структуру, относятся: пористость, ее распределение по объему тела и вид (открытая, закрытая, полуоткрытая или тупиковая); проницаемость и распределение проницаемости по площади фильтрации пористого тела; форма и коэффициент извилистости пор; распределение пор по размерам, средние и максимальные размеры пор; вязкостный и инерционный коэффициенты; удельная поверхность пор; состояние поверхности пор; физико-механические свойства пористого тела и другие характеристики.

1. ПОРИСТОСТЬ

Пористостью тела ($П$) называется отношение объема пустот ($V_п$) к полному объему пористого тела (V). Пористость определяется по формуле

$$П = \frac{V_п}{V}. \qquad (4)$$

По этой формуле ведут расчет при использовании способа определения пористости взвешиванием сухого и насыщенного смачивающей жидкостью (например, водой) пористого тела (способ пропитки). Если $G_с$ и $G_н$ соответственно масса сухого и насыщенного жидкостью пористого тела, а $\rho_ж$ — плотность жидкости, то

$$П = \frac{G_н - G_с}{Vg\rho_ж}. \qquad (5)$$

Практическое использование формулы (5) требует полного заполнения всех пор смачивающей жидкостью, что весьма сложно из-за наличия в порах воздуха. Поэтому пропитку пористых тел жидкостью целесообразно вести в условиях вакуума или в условиях принудительной фильтрации жидкости через поры тела с последующей выдержкой образцов в жидкости в течение нескольких часов.

Формулу (4) применяют при использовании способа определения пористости вдавливанием ртути в поры при высоких давлениях, подробно описанного в работе [109]. Суть способа состоит в том, что по количеству ртути, вошедшей в поры, определяется объем пор, а затем и пористость исследуемого образца.

Как следует из формул (4) и (5), для определения пористости во всех случаях необходимо знать объем тела, определение которого также сопряжено с трудностями, особенно для тел сложной конфигурации. В этих случаях для определения объема применяют способ погружения пористого тела в несмачивающую жидкость (например, ртуть). Объем пористых тел простой конфигурации определяют расчетом по результатам обмера геометрических размеров тела.

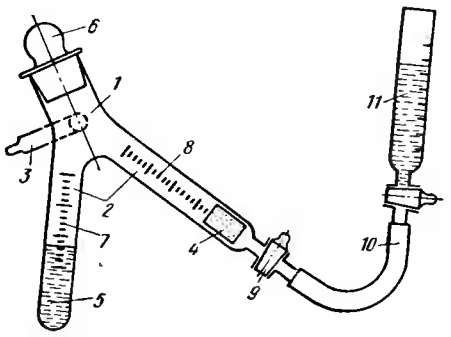


Рис. 11. Схема жидкостного пористомера

В работе [29] предложен способ определения пористости образцов в специально сконструированном приборе — жидкостном пористомере. Принцип разработанного способа заключается в одновременном определении объема образца и находящихся в нем пор в одном приборе без взвешивания, что исключает ошибки, возникающие из-за вытекания жидкости из пор при взвешивании. Схема прибора показана на рис. 11.

Основной частью пористомера является сосуд *1* с двумя сообщающимися в верхней части калиброванными отводами *2*. Через трубку *3* с помощью вакуумных шлангов и переходных кранов сосуд соединяют с вакуумным насосом или с атмосферой. В один из отводов помещают пористый образец *4*, в другой — наливают воду или другую малолетучую жидкость *5*, предназначенную для пропитки образца. Затем сосуд закрывают пробкой *6*, соединяют с вакуумным насосом и производят откачку воздуха из сосуда. Воздух при этом удаляется из сосуда и жидкости. С помощью шкалы *7* определяют объем жидкости в этом отводе, затем при работающем вакуум-насосе поворачивают сосуд вокруг оси трубки *3* и медленно переливают жидкость в другой отвод, где находится образец. После этого отключают вакуум-насос, сообщают сосуд с атмосферой и с помощью шкалы *8* определяют объем жидкости вместе с образцом.

Объем пор рассчитывают по формуле

$$V_{\text{п}} = V_1 + V - V_2, \qquad (6)$$

где V_1 — первоначальный объем жидкости в сосуде; V_2 — объем жидкости с погруженным в нее пористым образцом.

Для определения объема пор необходимо найти объем образца. Для этого через вакуумный кран *9* и шланг *10* подают из бюретки *11* более тяжелую жидкость, не смешивающуюся с уже поданной (например, четыреххлористый углерод при насыщении образца водой). Эта жидкость вытесняет первую и занимает ее место вокруг образца. Тогда объем образца

$$V = V_2 - V_3, \qquad (7)$$

где V_3 — объем вытесненной жидкости.

С учетом соотношения (7) формулу (6) можно записать в виде

$$V_{\text{п}} = V_1 - V_3. \qquad (8)$$

Пористость определяют по формуле

$$П = \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3}. \qquad (9)$$

Авторы работы [29] считают, что предложенный пористомер позволяет определять открытую пористость с точностью до 2—4%.

Пористость тела можно определить по его объему, массе и плотности компактного материала, из частиц которого изготовлено пористое тело. Для этого формулу (4) удобно преобразовать к виду

$$П = \frac{V - V_{\text{м}}}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{м}}}, \qquad (10)$$

где $V_{\text{м}}$ — объем абсолютно компактного материала, из которого изготовлено данное пористое тело; $\rho_{\text{м}}$ — плотность компактного материала; ρ — плотность пористого тела.

Определение пористости по формуле (10) наиболее простой и часто используемый способ, основное преимущество которого в том, что свойства пористых образцов не изменяются при определении пористости и они могут быть использованы для дальнейших работ.

Кроме указанных способов иногда применяют статистический способ определения пористости, основанный на определении просветности пористого материала по микрофотографиям. Просветность — доля площади сечения, приходящаяся на пустоты — равна вероятности случайного попадания точки в область, занятую пустотами. Измеряя эту вероятность, можно найти пористость. Обычно для определения пористости по этому методу используют увеличенные микрофотографии, на которые много раз случайным образом бросают иголку. Пори-

стость определяется отношением числа попаданий иголки в пустоты к общему числу бросаний.

Ниже приведены данные по определению пористости образцов, изготовленных из частиц нихрома различными способами:

По плотности	0,175	0,200	0,340
Способом пропитки	0,165	0,190	0,318
Способом вдавливания ртути	0,168	0,192	0,318
Способом микрофотографии . .	0,181	0,196	0,351

Приведенные данные показывают, что определение пористости по способу пропитки жидкостью и способу вдавливания ртути всегда дает меньшее значение пористости по сравнению со значением пористости, определенным по плотности пористого тела и по способу исследования микрофотографий.

Это объясняется тем, что способы насыщения жидкостью и вдавливания ртути позволяют определить пористость, состоящую из открытых и частично тупиковых пор, а способы определения пористости по плотности и по исследованию микрофотографий учитывают общую пористость.

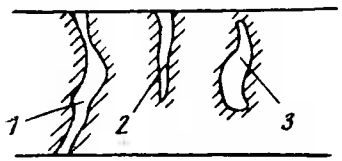


Рис. 12. Виды пор:
1 — открытая; *2* — тупиковая; *3* — закрытая

Все встречающиеся в материалах поры целесообразно разделить на три вида: открытые, тупиковые (полуоткрытые или полузакрытые) и закрытые (рис. 12).

Открытая пора ($П_о$) сообщается с поверхностями пористого тела и участвует в фильтрации жидкости или газа при наличии градиента давления на пористом теле.

Закрытая пора ($П_з$) не сообщается с поверхностью пористого тела и, таким образом, не участвует в фильтрации жидкости или газа.

Часть пор может соединяться только с одной поверхностью пористого тела и также не участвовать в фильтрации. Такие поры образуют так называемую тупиковую пористость ($П_т$). Тупиковые поры заполняются жидкостью при фильтрации и ртутью при порометрических испытаниях, но не влияют на проницаемость пористого материала.

Таким образом, общая пористость тела слагается из трех видов пористости и может быть найдена по формуле

$$П = П_о + П_з + П_т. \qquad (11)$$

Для оценки проницаемости пористого тела большой интерес представляет величина открытой пористости, определяющая фильтрационные способности пористого тела.

Вопрос о соотношении видов пор в пористых телах еще мало изучен, однако сведения, имеющиеся в работах [8, 21, 70, 124] и др., позволяют дать сравнительную оценку соотношения видов пор в пористом теле в зависимости от общей пористости тела.

В работе [8] исследовано соотношение между открытой и закрытой пористостью в спеченных образцах из восстановленного железного порошка, порошков меди и серебра и установлено, что при общей пористости около 0,07 все поры превращаются в закрытые. При увеличении общей пористости свыше 0,07 появляются открытые поры, причем закрытая пористость уменьшается и достигает значений 0,02—0,03 при общей пористости 0,20—0,30. Во всех опытах вакуумированные образцы заполнялись бензиловым спиртом, который отличается малой упругостью паров и стабильной плотностью. Методика проведения опытов не дает возможности выделить из открытой пористости отдельно количество тупиковой пористости.

Методы оценки тупиковой пористости пока развиты недостаточно, однако можно полагать, что с уменьшением общей пористости до 0,18 и ниже количество тупиковых пор возрастает. Так, в работе [124] показано, что при общей пористости 0,12 спеченные медные образцы оказались абсолютно непроницаемыми, т. е. все поры оказались тупиковыми или закрытыми.

Колебаниями в количестве тупиковых пор можно объяснить существенное увеличение разброса коэффициентов гидравлического сопротивления пористых материалов с пористостью менее 0,18. Если у материалов с пористостью 0,18 и более разброс коэффициентов гидравлического сопротивления составляет $\pm(10—15\%)$, то у образцов с пористостью менее 0,18 он может достигать $\pm 50\%$.

В работе [51] приведены результаты исследования кинетики пропитки пористого вольфрама (пористость от 0,17 до 0,51) водой, толуолом, бутиловым и этиловым спиртами. Опыты показали, что вольфрамовые образцы во всем исследованном интервале пористости имеют значительный относительный объем тупиковых пор, о чем свидетельствует неполная пропитка образцов при атмосферном давлении и линейное увеличение предельной степени капиллярной пропитки при понижении давления. Одновременно с этим авторы работы [51] считают, что тупиковые поры в пористом вольфраме не имеют большой протяженности и перемещение жидкости по этим порам при пропитке практически не происходит. Причиной неполной пропитки при атмосферном давлении, по мнению авторов, является защемление газовых пузырьков в тупиковых порах ячейкового типа.

На рис. 13 приведены данные об изменении предельной степени пропитки (что аналогично относительной открытой пористости) дистиллированной водой в зависимости от общей пористости вольфрамовых образцов; доля тупиковых и закрытых пор существенна даже у образцов высокой пористости

($П > 0{,}30$). Данные работы [51] практически совпадают с результатами других исследований. Действительно, если воспользоваться результатами, приведенными на рис. 13, то легко показать, что у образцов с $П = 0{,}50$ открытая пористость составляет 0,465, а закрытая и тупиковая 0,035; у образцов с $П = 0{,}20$ соответственно $П_о = 0{,}16$, а $П_з + П_т = 0{,}04$.

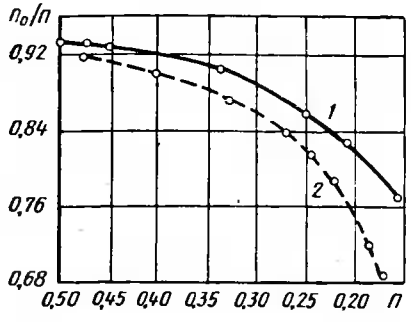


Рис. 13. Зависимость предельной степени капиллярной пропитки $\left(\frac{П_о}{П}\right)$ от пористости вольфрамовых образцов:

1 — мелкозернистый порошок размером 0,8—5,9 мкм; *2* — среднезернистый порошок размером 1,7—5,9 мкм

В работе [67] исследованы пористые вольфрамовые ионизаторы, изготовленные гидростатическим прессованием при давлении 4150 кгс/см² из калиброванных сферических частиц со средним размером 3; 5 и 7 мкм, а также ионизаторы, изготовленные из некалиброванных сферических частиц со средним диаметром 3,47 мкм, и из частиц, полученных восстановлением водородом. После прессования при комнатной температуре все образцы спекались в вакууме при 1800 до 2200°С в течение 60—90 мин.

Объем открытых пор в пористых ионизаторах определялся методом вдавливания ртути при давлении до 330 кгс/см². Результаты опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Виды пор в пористом вольфраме

Вид пористости	Калиброванные сферы			Некалиброванные сферы 3,47 мкм	Частицы, восстановленные водородом
	3 мкм	5 мкм	7 мкм		
П	0,2037	0,1969	0,1927	0,2098	0,1850
$П_о$	0,1970	0,1925	0,1887	0,2068	0,1753
$П_з$	0,0067	0,0044	0,0040	0,0030	0,0097

Из приведенных данных видно, что объем закрытых пор не превышает 1% объема образца, т. е. практически вся пористость открытая. У образца, изготовленного из частиц, полученных восстановлением водородом, закрытых пор больше по сравнению с образцами из сферических частиц.

В работе [21] для экспериментального определения вида пор использованы образцы пористого нихрома, полученные прессованием в пресс-формах, а также образцы нержавеющей стали и железа, полученные прокаткой. Пористость всех образцов определена по формуле (10). Значения отношения $П_о/П$, полученные для пористого нихрома, пористого железа и пористой нержавеющей стали, показаны на рис. 14. Анализ опытных данных показывает, что в образцах с пористостью 0,20—0,60 все поры открыты. Опытные точки ложатся с разбросом $+5 \div -10\%$ около прямой $\frac{П_о}{П} = 1{,}0$. В образцах с пористостью ниже 0,20 появляются закрытые поры. Объем закрытых пор увеличивается линейно с уменьшением пористости. Для расчета относительного объема открытых пор в образцах с $П = 0{,}09 \div 0{,}20$ получена зависимость

$$\frac{П_о}{П} = 7{,}0\,(П - 0{,}06). \qquad (12)$$

Распространение этой зависимости на образцы с пористостью ниже 0,09 приводит к выводу о том, что при $П \leqslant 0{,}06$ все поры образцов будут закрыты. Дальнейшие исследования видов пор, проведенные на образцах из бронзы и нихрома, показали, что объем закрытых пор в образцах невелик и составляет менее 4—5% от общей пористости. С увеличением общей пористости образцов наблюдается тенденция к уменьшению объема закрытых пор.

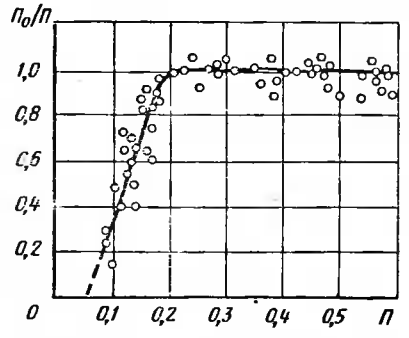


Рис. 14. Зависимость относительного объема открытых пор от общей пористости образцов

Сопоставление результатов исследования по определению видов пор позволяет считать, что тупиковая и закрытая пористость в металлах с $П \geqslant 0{,}18$ составляет порядка 2—5% от общей пористости материала. При уменьшении общей пористости ниже 0,18 объем закрытой и тупиковой пористости возрастает и при $П = 0{,}07 \div 0{,}08$ открытая пористость практически исчезает полностью, т. е. образцы становятся непроницаемыми.

Определение общей пористости тела не дает полного представления о проницаемости отдельных его участков. Практика показывает, что пористость отдельных участков пористого тела зависит от ряда факторов, главными из которых являются равномерность распределения частиц шихты по размерам в объеме пористого тела и совпадение технологических режимов обработки (удельное давление прессования, температура спекания и т. п.) по отдельным участкам пористого тела. Так, например, изделия, полученные прокаткой, могут иметь неравномерную пористость, если не достигнута равномерная подача ших-

ты под валки. Исследование равномерности распределения пористости по площади листа из нихрома, полученного прокаткой, показало, что возможно отклонение местной пористости от среднего значения в пределах до ±6%.

В работе [80] исследована локальная пористость образцов из стали 14Х17Н2, изготовленных из частиц дендритной формы размером —0,16÷+0,10; —0,25÷+0,18 и —0,38÷+0,28 мм путем прессования в пресс-формах и спеканием в среде водорода при 1200° С в течение 2 ч. Пористость образцов изменялась от 0,33 до 0,55, а толщина от 2,0 до 8,0 мм. Для нахождения локальной пористости авторы предложили прибор, позволяющий определять объемы и расход газа через небольшие площади пористой поверхности.

Эксперименты, проведенные в работе [80], показали, что отношение местных скоростей к средней скорости фильтрации составляет от 0,75 до 1,5. Установлено, что относительная локальная пористость изменяется в пределах ∓7,0% и не зависит существенно от размеров частиц порошка и толщины пористого образца. По мнению авторов, основное влияние на равномерность распределения пористости оказывает технология изготовления пористого материала и главным образом качество выравнивания засыпки порошка перед прессованием, а также фракционный состав исходного порошка. Для уменьшения отклонений в локальной пористости необходимы высокая равномерность толщины слоя в пресс-форме, а также более узкий диапазон изменения размеров частиц порошка.

Анализ данных о распределении пористости по объему пористого тела показывает, что на равномерность распределения пористости существенно влияет способ формовки пористого тела. Наибольшую неравномерность распределения пористости имеют изделия, полученные прессованием в пресс-формах. Для изготовления изделий с равномерной пористостью целесообразно применять гидростатическое прессование или прокатку шихты. Равномерное распределение пористости может нарушиться и из-за неравномерного прогрева участков изделия при спекании, а также из-за неравномерного распределения частиц порошка по объему шихты. Изделия, изготовленные из порошков с широким диапазоном изменения размеров частиц, имеют большую склонность к неравномерному распределению пористости по сравнению с изделиями, изготовленными из частиц одного размера.

2. ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Проницаемость — свойство пористого материала пропускать через себя жидкость или газ под действием приложенного градиента давления. Параметр, характеризующий проницаемость, был впервые введен Дарси в 1856 г. и назван коэффициентом проницаемости. Широко употребляемая единица измерения коэффициента проницаемости — дарси.

Дарси — это проницаемость такого пористого материала, в котором перепад давления в 1 кгс/см² поддерживает расход жидкости в 1 см³/с при вязкости, равной 1 сПз, через куб с длиной ребра 1 см. Коэффициент проницаемости характеризуется структурой пористого материала и режимом течения жидкости в порах материала.

Особое значение с точки зрения эксплуатационных качеств пористого материала имеет равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации, которая определяется главным образом технологическими факторами (равномерное распределение частиц в шихте, равномерное распределение удельного давления прессования и температуры нагрева при спекании по объему пористого тела и т. п.).

Равномерность распределения проницаемости пористых материалов зависит в первую очередь от равномерности распределения пористости по площади фильтрации, так как для одного вида пористых материалов при постоянном градиенте давления проницаемость образцов определяется в основном пористостью.

Равномерность распределения проницаемости определяют различными способами, простейший из которых предусматривает вырезку контрольных образцов из отдельных участков пористого тела и их проливку при одних и тех же перепадах давления. Этот способ имеет ограниченное применение, так как нарушает целостность пористого тела и не имеет высокой точности из-за возможного нарушения свойств отдельных образцов при их вырезке.

Второй способ определения равномерности проницаемости предусматривает проливку и продувку пористых образцов в специальных приспособлениях, позволяющих измерять расходы жидкостей или газов по отдельным участкам образца.

В работе [41] описано исследование равномерности проницаемости пористых дисков из нержавеющей стали, изготовленных прессованием порошка с наполнителем в пресс-формах. Пористость образцов изменялась от 0,234 до 0,322, а толщина от 2 до 10 мм. Равномерность проницаемости определяли двумя способами: оценивали скорость фильтрации воздуха при одинаковых перепадах давления через полную площадь фильтрации диска и отдельно скорость фильтрации через его центральную часть, составляющую четвертую часть общей площади фильтрации. Опыты с 28 образцами показали неравномерность по средней скорости фильтрации до 10%, шесть образцов — от 10 до 20% и шесть образцов — свыше 20%.

Третий способ определения равномерности проницаемости основан на непосредственном измерении локальной скорости фильтрации на выходе из пористого образца с помощью термоанемометра. Датчиком служил полупроводник в виде шарика диаметром 0,6 мм, который нагревали постоянным током. При помещении в поток воздуха датчик, охлаждаясь в зависимости

от скорости обтекания, менял свое сопротивление, что и фиксировалось измерительной аппаратурой.

Результаты измерения равномерности скорости фильтрации $W_ф$ (рис. 15) показали, что все образцы имели небольшие участки с существенным отклонением скорости фильтрации от средней. Эти отклонения достигали величины более 50%, а в отдельных случаях и до 100%.

Все рассмотренные способы определения равномерности проницаемости не обладают высокой точностью (точность определения проницаемости составляет ориентировочно $\pm(8—10\%)$, однако дают представление о возможных отклонениях относительной проницаемости по площади фильтрации.

3. ФОРМА И КОЭФФИЦИЕНТ ИЗВИЛИСТОСТИ ПОР

Форма пор носит сложный характер и зависит от формы и размеров частиц, удельных давлений прессования, режимов спекания и т. п.

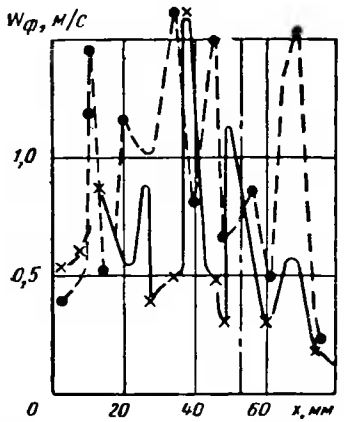


Рис. 15. Распределение скорости фильтрации по площади пористых дисков

Наиболее простой формой пор обладают пористые материалы, изготовленные из сферических частиц одного размера. Однако даже в этом случае их форма достаточно сложна и может существенно меняться в зависимости от плотности укладки шаров. В пористых материалах, изготовленных из несферических частиц разного размера, форма пор носит ярко выраженный случайный характер. Поры имеют по своей длине большое число сужений и расширений; на поверхности пор, как правило, встречаются макронеровности по сравнению с размерами пор в виде выступов и впадин; поры постоянно соединяются с соседними пустотами через сужения, расположенные в плоскости, параллельной направлению фильтрации жидкости; направление пор почти всегда не совпадает с направлением фильтрации жидкости.

Идеализированное представление пористого тела в виде пластины, пронизанной рядом отверстий одного размера (см. рис. 1) с осями, параллельными направлению фильтрации, не отражает существа явлений, происходящих в порах при течении жидкости.

Фиктивная пористая среда (см. рис. 2), состоящая из сфер одного размера, дает более полное представление о структуре

пор и взаимосвязи параметров пористого тела между собой. Так, аналитически в работе [70] показано, что для фиктивной пористой среды минимальная длина пути движения частицы жидкости в порах будет всегда больше толщины пористого тела, что свидетельствует об искривленности пор. Это увеличение длины пор по сравнению с толщиной пористого тела характеризуется коэффициентом извилистости пор

$$a_{изв} = \frac{l_п}{l}, \qquad (13)$$

где $l_п$ — длина средней поры; l — толщина пористого металла.

В работе [70] аналитически показано, что для фиктивной пористой среды коэффициент извилистости изменяется от 1,065 до 1,0 при изменении пористости от 0,259 до 0,476.

В реальных пористых средах коэффициент извилистости почти всегда будет больше, чем для фиктивной пористой среды. Увеличение коэффициента извилистости пор реальных сред объясняется дисперсностью порошков, искажением формы частиц по сравнению со сферической и наличием макрошероховатостей на поверхности пор.

В настоящее время практически нет работ, позволяющих судить о значениях коэффициента извилистости пор различных пористых материалов. Иногда для учета извилистости пор принимают значение коэффициента извилистости пор равным $\sqrt{2}$ или $\pi/2$. Оба эти значения условны и не проверены экспериментально.

В работе [59] определена извилистость пор пористых неэлектропроводных материалов измерением электрического сопротивления электропроводной жидкости, заполняющей поры. Результаты исследования показывают, что для укладки сфер одного диаметра коэффициент извилистости пор равен 1,13 при пористости 0,425. Насадки сфер из частиц разного диаметра с отношением $d_{ч\,max}/d_{ч\,min} = 1{,}8 \div 3{,}0$ при изменении пористости от 0,29 до 0,355 имеют коэффициент извилистости пор 1,15—1,49. Для пористых сред из частиц произвольной формы (сланец, кокс) и различного размера при изменении пористости от 0,36 до 0,84 коэффициент извилистости пор имеет значения в пределах 1,47—1,0.

Эти весьма ограниченные данные дают основание считать, что коэффициент извилистости пор не может достигать больших значений и находится в пределах 1,0—1,5 при изменении пористости от 0,84 до 0,26. Пористости 0,3—0,4 соответствует коэффициент извилистости пор, равный соответственно 1,3—1,2.

В работах [20, 28, 95] предпринята попытка оценить величину коэффициента извилистости пор по результатам исследования проницаемости пористых образцов и результатам определения среднего, а в работе [95] — максимального размера пор

вытеснением жидкости из пор. В работах [20, 28, 95] принято, что коэффициент извилистости пор

$$a_{изв} = \frac{d_{пв}}{d_{пг}}, \qquad (14)$$

где $d_{пв}$ — размер пор, полученный по методу вытеснения жидкости из пор, или по методу вдавливания ртути в поры; $d_{пг}$ — размер пор, вычисленный по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля.

Опыты, проведенные на образцах пористого нихрома, показали, что коэффициент извилистости пор, вычисленный по формуле (14), равен 2 при изменении пористости от 0,18 до 0,43 [20].

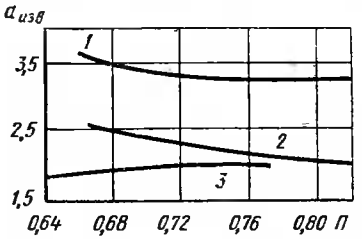


Рис. 16. Зависимость коэффициента извилистости пор от пористости сплава Ni — 30 Mo

Размер частиц наполнителя: *1* — 180 ÷ 300 мкм; *2* — 70 ÷ 150 мкм; *3* — < 70 мкм

В работе [28] принято, что величину коэффициента извилистости пор можно оценить отношением среднего размера пор, полученного методом вдавливания ртути, к размеру пор, вычисленному по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. Для пористой керамики получены значения коэффициента извилистости пор от 1,57 до 6,22.

В работе [95] приведены значения коэффициента извилистости пор, найденные для пористого сплава Ni—30 Mo как отношение максимального размера пор, полученного по методу вытеснения жидкости из пор, к размеру пор, полученному совместным решением уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. На рис. 16 показана зависимость $a_{изв}$ от пористости материала и размера частиц наполнителя. С увеличением пористости коэффициент $a_{изв}$ практически не изменяется. Этот результат подтверждается данными работы [20], где также показано, что $a_{изв}$ не зависит от пористости. Недостаточно ясен в работе [95] экспериментальный факт увеличения значения $a_{изв}$ образцов, изготовленных с наибольшими частицами наполнителя, по сравнению с его значением для образцов, полученных с частицами наполнителя меньших размеров. Утверждение, что это объясняется незначительным увеличением проницаемости при заметном увеличении размеров пор подтверждает лишь правильность полученных результатов, но не раскрывает действительной причины увеличения $a_{изв}$ с ростом размеров частиц наполнителя и ростом размеров пор.

Сопоставляя данные по значениям $a_{изв}$, приведенные в рассмотренных выше работах, можно отметить достаточно большое расхождение в значениях коэффициента $a_{изв}$, а также отсутствие четкого представления о методе определения коэффициента

$a_{изв}$. Вместе с тем ясно, что уменьшение пористости и усложнение формы и дисперсности частиц, из которых получена пористая среда, всегда будет сопровождаться увеличением коэффициента $a_{изв}$ в материалах, изготовленных из частиц любой формы.

4. РАЗМЕРЫ ПОР

Форма поперечного сечения пор носит сложный характер, что видно из рис. 17, на котором показаны микрофотографии шлифов пористых образцов из нихрома и бронзы. Практически все поры имеют свою форму и существенно отличаются друг от друга по размерам.

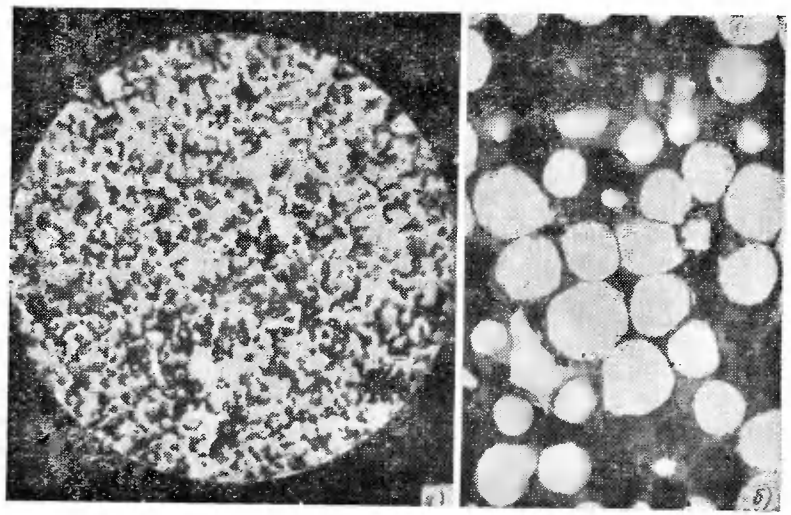


Рис. 17. Микрофотографии (увеличение × 70) шлифов пористого нихрома (*а*) и пористой бронзы (*б*)

Для характеристики пор обычно используют распределение их по размерам, а также понятия максимального и среднего размеров пор. Максимальные поры играют существенную роль, особенно для пористых фильтров, так как определяют максимальные размеры частиц загрязнителя, которые теоретически могут пройти через фильтр. Средние размеры пор обычно используют как характеристику материалов для их сравнения, а также как определяющий размер при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористой среды в критериальной форме.

Распределение пор по размерам дает представление о количестве или объеме пор каждого размера и диапазоне измене-

ния размеров пор в материале. С точки зрения сравнения материалов по размерам пор, распределение пор по размерам является более полной характеристикой, чем средние размеры пор. Однако трудоемкость процесса и сложность оборудования не всегда позволяют определить распределение пор по размерам и поэтому приходится ограничиваться данными по максимальному и среднему размерам пор.

Наиболее распространенными методами определения размеров пор являются: метод вдавливания ртути, метод вытеснения жидкости из пор, метод исследования микрофотографий, метод совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля.

Метод вдавливания ртути основан на свойстве ртути не смачивать многие твердые тела. Для заполнения объема пор пористого тела ртутью с краевым углом смачивания, превышающим 90°, необходимо внешним давлением преодолеть сопротивление поверхностных сил (сил капиллярного сопротивления).

Связь между внешним давлением и капиллярным сопротивлением в порах твердого тела описывается уравнением капиллярного падения (подъема)

$$F_{\text{п}} h g \rho_{\text{ж}} = -m\sigma \cos\theta, \qquad (15)$$

где $F_{\text{п}}$ — площадь поперечного сечения поры; h — высота капиллярного падения жидкости; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; m — периметр поры; σ — поверхностное натяжение жидкости; θ — краевой угол смачивания.

Произведение $hg\rho_{\text{ж}}$ имеет размерность силы на единицу площади и поэтому может быть выражено через давление P.

Тогда

$$\frac{F_{\text{п}}}{m} = -\frac{\sigma \cos\theta}{P}. \qquad (16)$$

Поскольку форма поперечного сечения пор в большинстве случаев произвольна, то обычно принимают, что пора имеет форму круга, и диаметр поры определяют по формуле

$$d_{\text{п}} = \frac{4\sigma \cos\theta}{P}. \qquad (17)$$

Способ вдавливания ртути для определения пористости и распределения пор по размерам нашел широкое применение в СССР и за рубежом. Методика проведения опытов, описание установок и порядок обработки результатов опытов приведены в работе [85]. Опыт исследований показывает, что метод вдавливания ртути в поры имеет высокую точность (до 3—4%) при исследовании материалов с размерами пор от 100 до 600 000 Å.

Метод вытеснения жидкости из пор основан, так же как и метод вдавливания ртути, на использовании сил капиллярного взаимодействия. Для определения размеров пор свободный объ-

ем пористого образца предварительно заполняют смачивающей жидкостью (этиловый спирт или вода), а затем определяют давление газа, необходимое для вытеснения жидкости из пор.

Схема установки для определения максимального и среднего размеров пор показана на рис. 18. Перед опытом поры образца заполняют жидкостью с известным поверхностным натяжением. Наполнение пор жидкостью можно обеспечить фильтрацией жидкости при наличии градиента давления на образце или насыщением жидкостью в вакууме. После наполнения пор жидкостью образец помещают в специальное приспособление и на его поверхность наливают тонкий слой той же жидкости (до 2—3 мм). Затем в полость под образцом подают газ, давление которого плавно увеличивают. Оператор наблюдает за поверхностью образца и фиксирует давление газа, при котором от поверхности образца отрывается первый пузырек газа. Это давление соответствует максимальному размеру пор. Дальнейшее увеличение давления под образцом приводит к началу интенсивного выхода пузырьков по всей поверхности пористого образца. По этому давлению определяют средние размеры пор, пользуясь соотношением (17). Момент выхода пузырьков по всей поверхности образца устанавливают с определенной погрешностью, зависящей от навыков оператора. Однако многократные опыты на одних и тех же образцах, выполненные различными операторами, показали, что максимальная погрешность в определении среднего размера пор не превышает 5%.

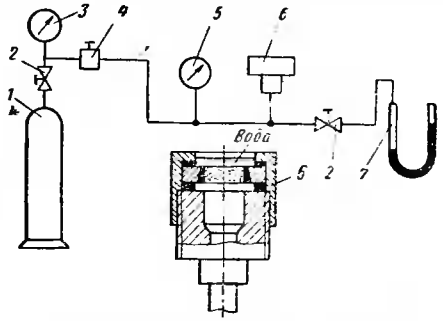


Рис. 18. Схема установки для определения размеров пор методом вытеснения жидкости из пор:
1 — баллон; *2* — вентиль; *3* — манометр; *4* — редуктор; *5* — образцовый манометр; *6* — приспособление с пористым образцом; *7* — ртутный манометр

В работе [28] указывается, что ускоренное повышение давления под образцом приводит к тому, что поры освобождаются от жидкости несколько позже, чем установится равновесное давление, соответствующее истинному размеру пор образца. Одновременно было замечено, что выделение пузырьков продолжается и в течение некоторого времени после снижения давления воздуха под образцом.

Эти явления объясняются тем, что освобождение пор, равно как и их заполнение жидкостью под действием капиллярных сил, не успевает следовать за быстро изменяющимся давлением. Поэтому при проведении опытов необходимо повышать давление

под образцом медленно, в особенности когда оно начинает достигать величины, при которой можно ожидать открытия пор максимального размера.

Для определения размеров малых пор целесообразно заполнять поры этиловым спиртом. Поскольку поверхностное натяжение спирта в несколько раз меньше, чем воды, то при равном давлении воздуха в образцах, пропитанных спиртом, открываются поры соответственно меньшего размера.

В работе [29] на основе обобщения и анализа факторов, влияющих на определение размеров пор методом вытеснения жидкости из пор, даны рекомендации по использованию этого метода. Так, в качестве пропитывающей жидкости при определении размеров максимальных пор на образцах или изделиях с диаметром пор более 3 мкм можно применять воду, мелкопористые изделия целесообразно насыщать спиртом. Рекомендации по скорости подъема давления воздуха под образцом приведены в табл. 4.

Таблица 4

Допустимые скорости подъема давления воздуха под образцом

Максимальный размер пор, мкм	Скорость подъема давления в мм вод. ст/с при толщине образца, мм			
	5	10	20	40
Более 75	2	2	2	2
75—50	2	2	1	1
50—25	2	2	1	0,5
25—10	2	2	0,5	0,2
Менее 10	2	2	—	—

При вычислении размеров пор в расчетную формулу (17) следует подставить скорректированную величину давления, отсчитываемую на манометре с учетом противодавления, создаваемого высотой слоя жидкости над образцом $h_{об}$ и жидкости в образце l:

$$P = P_{ман} - \rho_ж (h_{об} + l), \qquad (18)$$

где $P_{ман}$ — давление под образцом, измеряемое манометром.

При использовании уравнения (17) для определения размеров пор по методу вытеснения жидкости обычно принимают, что краевой угол смачивания равен нулю.

Способ определения размеров пор по методу вытеснения жидкости применяют для определения пор размером от 1,0 до 300 мкм. Нижний предел ограничен ростом необходимых давлений газа под образцом свыше 30—40 кгс/см^2, а верхний предел — невозможностью наполнения пор жидкостью, так как последняя выливается из пор под собственным весом. Учитывая, что реальные значения размеров пор пористых металлов обычно находятся в пределах 1—250 мкм, метод вытеснения жидкости из пор находит все более широкое применение для определения размеров пор.

Иногда применяют метод исследования микрофотографий пористой поверхности [20], получивший основное развитие как способ определения пористости среды.

Широкое распространение в практике получил метод определения размеров пор, основанный на совместном решении уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. С помощью этого метода можно найти диаметр пор идеальной пористой среды, гидравлическое сопротивление которой равно гидравлическому сопротивлению реальной пористой среды.

Для идеальной пористой среды по закону Гагена-Пуазейля перепад давления на ламинарном режиме течения жидкости в порах

$$\Delta P = \frac{32 \mu W_п l}{d_п^2}, \qquad (19$$

где ΔP — перепад давления на пористом образце; $W_п$ — скорость жидкости в порах; μ — коэффициент вязкости жидкости.

Для реальной пористой среды по закону Дарси перепад давления на ламинарном режиме течения жидкости в порах

$$\Delta P = \frac{\mu W_п l П}{k}, \qquad (20)$$

где k — коэффициент проницаемости.

Полагая равенство потерь давления в реальной и идеальной пористых средах при одинаковой скорости движения жидкости, можно получить соотношение для диаметра пор в виде

$$d_п = \sqrt{\frac{32k}{П}}. \qquad (21)$$

Так как при выводе формулы (21) предполагалось, что длина идеальной поры равна толщине пористого образца, то, очевидно, расчетный диаметр поры будет всегда меньше действительного размера пор пористого материала. Для того чтобы приблизить расчетное значение размера пор к его истинному размеру, целесообразно при совместном решении уравнения Дарси и Гагена-Пуазейля длину идеальной поры увеличивать на величину коэффициента извилистости пор. Тогда для определения диаметра пор будет получено соотношение

$$d_п = \sqrt{\frac{32 k a_{изв}}{П}}. \qquad (22)$$

Практическое использование формулы (22) для нахождения диаметра пор требует знания коэффициента проницаемости пористого материала. Так как в настоящее время определить коэффициент проницаемости можно только по экспериментальной расходной характеристике пористого материала, то для определения размеров пор обязательны продувки или проливки образцов на ламинарном режиме фильтрации газа или жидкости в порах.

Из соотношения (22) видно, что определение коэффициента $a_{изв}$ по формуле (14), предложенное в работах [20, 28, 95], яв-

ляется условным, так как не основано ни на геометрических соотношениях в пористой среде, ни на физической картине течения жидкости в порах. Если следовать условиям перехода от реальной пористой среды к идеальной, полагая, что идеальная пористая среда имеет одинаковое гидравлическое сопротивление с реальной пористой средой, а длина идеальной поры больше на коэффициент $a_{изв}$, то соотношение для определения $a_{изв}$ должно быть записано в виде

$$a_{изв} = \frac{d_{пв}^2}{d_{пг}^2}. \qquad (23)$$

Значение коэффициента $a_{изв}$, вычисленное по формуле (23), не является в прямом смысле геометрической извилистостью пор, а представляет собой коэффициент роста потерь давления [24] в реальной пористой среде по сравнению с потерями давления в среде с идеальной порой длиной, равной толщине образца, и диаметром, равным $d_{пв}$.

Кроме рассмотренных выше методов определения размеров пор известны также: метод поверхностной адсорбции, метод рассеяния рентгеновских лучей, метод фильтрации дисперсных систем и др. Однако эти методы весьма редко используют для определения размеров пор пористых металлов. В связи с этим целесообразно дать сравнительную оценку результатов, получаемых различными методами, и установить возможные области их практического применения.

На рис. 19 схематично показано возможное расположение сужений и расширений проходных сечений пор по толщине пористого материала. Условно принято, что все поры имеют одинаковые максимальные и минимальные размеры. Поры, показанные на рис. 19,*а* и *г*, имеют минимальный размер на поверхности пористого образца, а поры, показанные на рис. 19, *б* и *в* — в толщине материала.

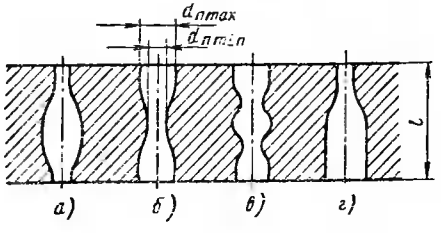


Рис. 19. Схема расположения сужений и расширений пор по толщине пористого образца

Методы определения размеров пор вдавливанием ртути и вытеснением жидкости из пор позволяют найти минимальные размеры пор независимо от местоположения узкого сечения по длине поры. Поэтому все поры, показанные на рис. 19, можно (если размеры их узких сечений одинаковы) считать одного размера независимо от их форм.

При методе исследования микрофотографий поры, показанные на рис. 19, *а* и *г*, можно отнести к одному размеру, а поры, показанные на рис. 19, *б* и *в*, к другому, если микрофотографии будут сняты с верхней поверхности образца. Если же микрофотографии сняты с нижней поверхности образца, то пора, показанная на рис. 19, *а*, будет меньшего размера, чем остальные поры. Очевидно, что во всех случаях средние размеры пор, определенные по методу исследования микрофотографий, будут больше средних размеров пор, определенных по методу вдавливания ртути или по методу вытеснения жидкости из пор. Совпадение результатов определения средних размеров пор различными методами возможно только в том случае, если поры образца имеют минимальные размеры на поверхности образца. Такой случай в практике можно встретить при исследовании образцов, изготовленных прессованием шихты в пресс-формах или прокаткой порошка при высоких удельных давлениях прессования, например, образцов из пористого нихрома, изготовленных двухсторонним прессованием в пресс-формах [20]. Результаты определения средних размеров пор по методу вытеснения жидкости из пор и по методу исследования микрофотографий (рис. 20) удовлетворительно согласуются при изменении пористости образцов от 0,1 до 0,44. Сходимость значений среднего размера пор, определенных различными методами, свидетельствует о том, что большинство пор имеет минимальные размеры проходных сечений пор на поверхности образца. Расположение минимальных сечений пор на поверхности пористого образца можно объяснить характером распределения давлений прессования по толщине образца (максимальные давления прессования действуют всегда на границе шихта-пуансон). Результ-

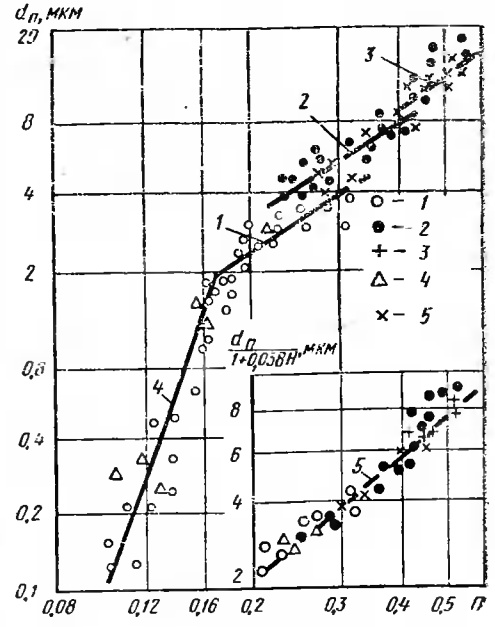


Рис. 20. Экспериментальные значения среднего размера пор пористого нихрома, полученные по методу вытеснения жидкости из пор [*1* — образцы нихрома без наполнителя; *2* — образцы нихрома с 10% наполнителя, по весу (двууглекислый аммоний); *3* — образцы нихрома с 15% наполнителя (по весу)] и методу исследования микрофотографий [*4* — образцы нихрома без наполнителя; *5* — образцы нихрома с 10% наполнителя (по весу)]

таты работы [20] необходимо рассматривать как частный случай, однако имеющий практическое значение. Средние размеры пор, найденные по методу исследования микрофотографий, всегда будут иметь большее значение по сравнению со средними размерами пор, определенными по методу вытеснения жидкости из пор или по методу вдавливания ртути.

Метод определения размеров пор, основанный на совместном решении уравнения Дарси и Гагена-Пуазейля, практически всегда дает меньшие значения средних размеров пор, чем значения $d_{\text{пср}}$, полученные по методу вытеснения жидкости из пор или по методу вдавливания ртути в поры. В табл. 5 приведены экспериментальные данные по средним размерам пор, найденным методом вытеснения жидкости и методом совместного решения уравнений. Все значения $d_{\text{пср}}$, найденные по формуле (22) при $a_{\text{изв}}=1$, меньше размеров пор, определенных по методу вытеснения жидкости из пор.

Таблица 5

Средние размеры пористого нихрома

Пористость	Средний размер пор (мкм) по методу	
	вытеснения жидкости из пор	совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля
0,19	2,1	1,1
0,20	2,2	1,3
0,24	2,7	1,4
0,25	2,8	1,45
0,31	3,5	2,0
0,35	3,8	2,5

На рис. 21 приведены результаты работы [95] по исследованию размеров пор пористых образцов из сплава Ni—30Mo с пористостью 0,64—0,83, спеченных из смеси порошков карбонильного никеля и дисперсного молибдена с применением наполнителя NH_4Cl в количестве 20—40% по весу. Для изготовления образцов использован порошок наполнителя трех фракций: $<0{,}07$; 0,07—0,1 и 0,18—0,3 мм. Размеры пор определены тремя способами: по методу исследования микрофотографий ($d_{\text{п микр}}$), по методу вытеснения жидкости из пор (определен максимальный размер пор $d_{\text{п max}}$) и по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля ($d_{\text{пг}}$).

В работе [95] исследованы также размеры пор образцов из нержавеющей стали пористостью 0,30—0,60, спеченных из восстановленного порошка с размерами частиц трех фракций: $<0{,}04$; 0,07—0,15 и 0,16—0,30 мм. Результаты определения размеров пор для образцов, изготовленных из несферических частиц фракции 0,16—0,30 мм, показаны на рис. 22.

Результаты опытов [95] показывают, что различные методы определения дают значительно отличающиеся друг от друга величины размеров пор, причем для всех образцов справедливо соотношение $d_{\text{п микр}} > d_{\text{п max}} > d_{\text{пг}}$. Так, например, для образцов Ni—30Mo пористостью 0,75 наблюдаются следующие соотношения:

Фракция наполнителя, мкм . .	180—300	70—150	<70
$d_{\text{п микр}}:d_{\text{п max}}:d_{\text{пг}}$	10,5:3:1	6,9:2,2:1	5,8:2:1

Сравнение методов определения размеров пор и результатов эксперимента показывает, что наиболее достоверные данные о размерах пор могут быть получены методом вытеснения жидкости из пор и методом вдавливания ртути в поры. Поэтому при определении размеров пор пористых металлов целесообразно пользоваться одним из этих методов.

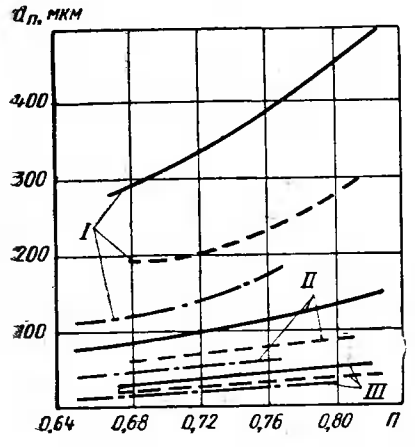


Рис. 21. Размеры пор сплава Ni—30Mo, определенные различными методами:

I — по методу исследования микрофотографий; *II* — по методу вытеснения жидкостей; *III* — по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля; сплошные линии — сплав, где размеры частиц наполнителя 0,18—0,30 мм; штриховые линии — сплав, где размеры частиц наполнителя 0,07—0,15 мм; штрихпунктирные линии — сплав, где размеры частиц наполнителя $<0{,}07$ мм

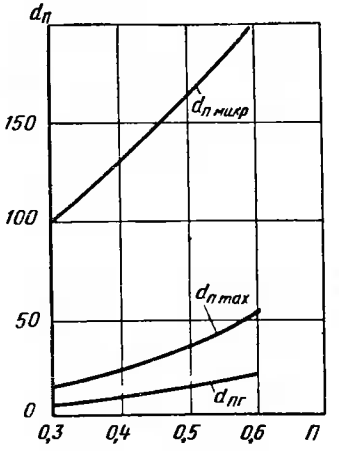


Рис. 22. Зависимость размера пор от пористости образцов нержавеющей стали

Метод вдавливания ртути в поры используют обычно для специальных исследований распределения пор по размерам. Этот метод для проведения опытов требует специального оборудования. Учитывая простоту оборудования и методики проведения опытов, а также малое время проведения эксперимента, предпочтение в получении экспресс-данных по средним и максимальным размерам пор необходимо отдавать методу вытеснения жидкости из пор.

Средние размеры пор. Введением понятия средних размеров пор пористых сред всегда совершается по-существу переход от реальной пористой среды к идеальной. Для перехода от фиктивной пористой среды к идеальной Козени предложил способ, основанный на следующих допущениях: сумма объемов пор фиктивной среды равна сумме объемов поровых каналов идеальной пористой среды; сумма поверхностей всех шаровых ча-

стиц равна сумме поверхностей поровых каналов; пористости фиктивной и идеальной среды одинаковы. Исходя из этих допущений, Козени получил формулу для определения диаметра пор идеальной пористой среды в виде

$$d_{\text{п}} = \frac{2}{3}\,\frac{П}{1-П}\,d_{\text{ч}}. \qquad (24)$$

Поскольку пористость фиктивной среды может меняться от 0,259 до 0,476, то и формулу (24), строго говоря, можно использовать только в этом интервале изменения пористости.

Реальные пористые материалы, изготовленные из сферических частиц или близких по форме к сферическим, обычно состоят из частиц, размер которых изменяется в определенном

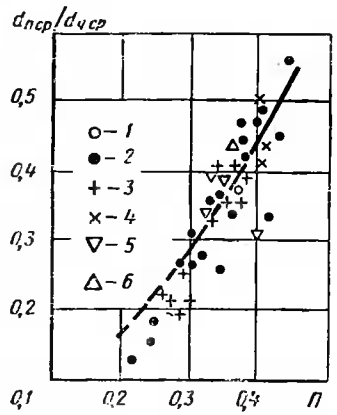


Рис 23. Зависимость отношения среднего размера пор к среднему размеру частиц пористых металлов и насадок из сферических частиц от пористости (кривая рассчитана по формуле (24)]:

1 — данные работы [55]; *2* — данные работы [35]; *3* — данные работы [82]; *4* — данные работы [20]; *5* — данные работы [109]; *6* — данные работы [124]

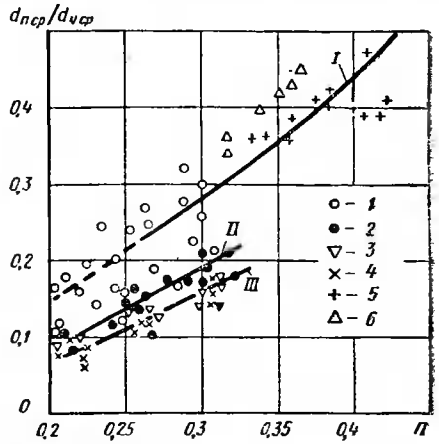


Рис. 24. Зависимость отношения среднего размера пор к среднему размеру частиц от пористости:

I, II, III — кривые, рассчитанные по формулам соответственно (24), (25), (26); *1* — пористая сталь 50ХГ из сферических частиц размером — 63 ÷ + 35 мкм; *2* — пористая сталь 50ХГ из смеси сферических и несферических частиц размером — 200 ÷ + 100 мкм; *3* — пористая сталь 50ХГ из смеси сферических и несферических частиц размером — 315 ÷ + 200 мкм; *4* — пористая сталь 50ХГ из смеси сферических и несферических частиц размером — 500 ÷ ÷ + 315 мкм; *5* — пористая бронза из сферических частиц размером — 125 ÷ + 100 мкм и — 160 ÷ + 125 мкм; *6* — пористый нихром из сферических и округлых частиц размером — 315 ÷ + 200 мкм и — 500 ÷ + 315 мкм

диапазоне. Поэтому формула (24) для расчета среднего размера пор таких металлов может оказаться неприменимой. Правомерность использования формулы (24) для расчета среднего размера пор материалов, состоящих из сфер разного диаметра, можно проверить лишь экспериментально.

На рис. 23 приведены данные работ [20, 35, 55, 82, 109, 126] по среднему размеру пор металлов и насадок из сферических частиц. Сопоставление опытных данных показывает, что, несмотря на определенный разброс, экспериментальные значения средних размеров пор группируются около кривой, рассчитанной по формуле (24), при изменении пористости от 0,30 до 0,45. При уменьшении пористости образцов ниже 0,30 наблюдается тенденция к уменьшению средних размеров пор по сравнению с их расчетным значением, найденным по формуле (24).

Методом вытеснения жидкости из пор найдены средние размеры пор стали 50ХГ, изготовленной из сферических частиц размером — 63÷+35 мкм. Результаты испытаний, показанные на рис. 24, хорошо согласуются с кривой *I*, рассчитанной по формуле (24), при изменении пористости образцов от 0,2 до 0,3. Экспериментальные значения среднего размера пор пористой бронзы хорошо согласуются с зависимостью (24). Средние размеры пор образцов пористого нихрома, изготовленных из частиц сферической и округлой форм двух фракций: —315÷+200 и —500÷+315 мкм также хорошо согласуются с зависимостью (24).

Однако не всегда средние размеры пор металлов, изготовленных из сферических частиц, согласуются с их расчетными значениями, полученными по формуле (24). Причиной такого рассогласования могут быть: искажения в форме частиц (наличие неровностей на поверхности, овальность), широкий диапазон изменения размеров частиц в пределах фракций, а также деформация частиц при прессовании шихты, что характерно для образцов малой пористости.

В работах [35, 82] найдены методом вытеснения жидкости из пор средние размеры пор образцов, изготовленных при высоких давлениях прессования. Экспериментальные значения средних размеров пор ниже рассчитанных по формуле (24), причем величина отклонения увеличивается с ростом размера частиц шихты. Это объясняется увеличением степени остаточных деформаций частиц на поверхности образца при прессовании насыпок с большим размером частиц.

Влияние отклонения формы частиц от сферической на средние размеры пор хорошо проявляется в результатах опытов с пористыми образцами, полученными из частиц стали 50ХГ. Опыты проводили на пористых образцах, изготовленных прессованием шихты в пресс-формах с последующим спеканием в восстановительной среде. Исследовали образцы четырех групп: 1) образцы из сферических частиц размером от 35 до 63 мкм; 2) образцы из сферических частиц размером от 100 до 200 мкм, причем анализ формы частиц под микроскопом показал, что в основной массе сферических частиц встречаются частицы произвольной формы (до 20%); 3) образцы из частиц произволь-

ной формы размером от 200 до 315 мкм, причем около 20% частиц имели сферическую форму; 4) образцы из частиц произвольной формы размером от 315 до 500 мкм (10% сферических частиц).

Из рис. 24 видно, что средний размер пор образцов первой группы удовлетворительно согласуется с зависимостью (24) при изменении пористости образцов от 0,2 до 0,3.

Средние размеры пор образцов второй группы расположены ниже зависимости (24) и описываются формулой

$$d_{\text{п ср}} = 1{,}9\,П^{1{,}9}\,d_{\text{ч ср}}. \qquad (25)$$

Еще меньшее отношение $d_{\text{пср}}/d_{\text{чср}}$ получено у образцов третьей и четвертой групп. В этом случае справедливо соотношение

$$d_{\text{п ср}} = 1{,}2\,П^{1{,}7}\,d_{\text{ч ср}}. \qquad (26)$$

При обработке опытных данных средний размер частиц во всех случаях вычисляется по формуле

$$d_{\text{ч ср}} = \sqrt{\frac{2d^2_{\text{ч max}}\,d^2_{\text{ч min}}}{d_{\text{ч max}} + d_{\text{ч min}}}}, \qquad (27)$$

Определенным подтверждением влияния формы частиц на средние размеры пор металлов служат результаты опытов, проведенных с образцами из нержавеющей стали с размером частиц 200—315 мкм. Частицы в основной массе (70%) имели форму, близкую к сферической, а остальные (30%) частицы имели произвольную форму. Результаты опытов (рис. 25) подтверждают вывод о том, что отклонение формы частиц от сферической сопровождается уменьшением средних размеров пор по сравнению с их расчетным значением, полученным по формуле (24). На рис. 25 приведены также экспериментальные данные по средним размерам пор образцов, изготовленных из порошка меди. Частицы меди, полученные методом распыления, имели округлую форму с неровной поверхностью, отдельные частицы имели неправильную форму. Искажения в форме частиц привели к уменьшению средних размеров пор по сравнению с их расчетными значениями по формуле (24).

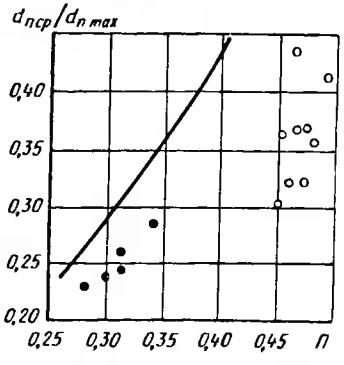


Рис. 25. Зависимость экспериментальных значений средних размеров пор нержавеющей стали (черные кружки) и меди (светлые кружки) от пористости [кривая рассчитана по формуле (24)]

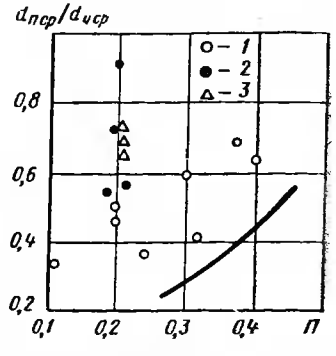


Рис. 26. Средние размеры пор пористого вольфрама из сферических частиц [кривая рассчитана по формуле (24)]:
1 — данные работы [92]; *2* — данные работы [67]; *3* — данные работы [66]

Анализ данных по среднему размеру пор образцов, изготовленных из частиц стали 50ХГ и частиц других металлов, показывает, что с переходом от сферической формы к произвольной наблюдается уменьшение относительного размера пор.

Однако в практике получения пористых металлов из сферических частиц возможны случаи, когда средние размеры пор, а точнее, отношение среднего размера пор к среднему размеру частиц превышают расчетные значения, определенные по формуле (24). Так, все образцы пористого вольфрама (рис. 26), исследованные в работах [66, 67, 92], имели отношения среднего размера пор к среднему размеру частиц выше расчетных значений. Превышение экспериментальных значений отношения $d_{\text{пср}}/d_{\text{чср}}$ над расчетными в работе [92] объясняется склонностью частиц вольфрама к коагуляции при высоких температурах спекания, приводящей к увеличению размера частиц, а следовательно, и размера пор. Кроме того, средние размеры пор были определены по методу исследования микрофотографий, который, как было показано выше, всегда дает завышенные значения размеров пор.

Размеры пор металлов, изготовленных из частиц произвольной формы, определены в ограниченном числе работ и до настоящего времени нет сравнительной оценки проведенных исследований.

Выше на примере пористой стали 50ХГ показано, что отклонение формы частиц от сферической сопровождается уменьшением отношения $d_{\text{пср}}/d_{\text{чср}}$. В табл. 6 приведены значения средних размеров пор образцов металлов, изготовленных из частиц произвольной формы, и показан метод его определения. Во всех случаях отношение $d_{\text{пср}}/d_{\text{чср}}$ остается меньше соответствующего расчетного значения по формуле (24); значения отношения $d_{\text{пср}}/d_{\text{чср}}$ у образцов одинаковой пористости существенно отличаются друг от друга, что можно объяснить влиянием метода определения среднего размера пор и особенностями структуры исследованных пористых металлов.

В работе [36] средний размер пор образцов пористого нихрома и пористой нержавеющей стали найден по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля в предположении, что коэффициент извилистости пор равен единице. Для нихрома пористостью 0,245—0,507 получена зависимость среднего размера пор от пористости в виде

$$d_{\text{п ср}} = 12{,}3\,П^{1{,}6}\ \text{мкм}. \qquad (28)$$

Таблица 6

Средние размеры пор металлов, изготовленных из частиц произвольной формы

Вид пористой среды	$П$	$d_{чср}$, мкм	$d_{пср}$, мкм	Метод определения	Источник
Нержавеющая сталь 14Х17Н2	0,40	242 242 172 122 122	14,7 15,3 14,3 11,9 12,8	Совместное решение уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля при $a_{изв}=\pi/2$	[61]
	0,50	242 242 172 172 122 122	32,0 29,5 30,5 28,6 25,7 24,8		
Фильтровальные плитки	0,3 0,32	1700 1200	64 75	В работе не указан	[47]
Латунь	0,437	40	4,0		[124]
Нержавеющая сталь	0,50 0,50 0,50 0,50 0,45	208 104 104 50 33	65 35 20 10 5	Вдавливание ртути в поры	[126]

Для нержавеющей стали пористостью 0,3—0,5

$$d_{п\,ср} = 18{,}2П^{1{,}69}\ \text{мкм}. \qquad (29)$$

Более полные исследования по определению средних размеров пор проведены в работе [20], где предпринята попытка учесть влияние отдельных факторов на средние размеры пор металлов, изготовленных из частиц произвольной формы. В опытах использованы пористые образцы из нихрома, полученные прессованием шихты в пресс-формах и гидростатическим прессованием. Исследованы образцы из нержавеющей стали, нихрома и железа, полученные прокаткой шихты. После прессования образцы спекали в восстановительной среде. Для увеличения пористости применяли наполнитель — двууглекислый аммоний (10—15% от веса шихты) и парафин (1—2%). Средний размер частиц шихты во всех случаях равен 50 мкм, кроме пористого железа, где $d_{чср}=120$ мкм.

Размеры пор определены тремя методами: вытеснением жидкости из пор, исследованием микрофотографий и совместным решением уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. Результаты опытов по определению среднего размера пор, полученные по методу вытеснения жидкости, см. на рис. 20.

Для пористого нихрома, изготовленного из шихты без наполнителя, в интервале пористости 0,18—0,31 опытные значения среднего размера пор хорошо согласуются с зависимостью (кривая *1*)

$$d_{п\,ср} = 18{,}6\,П^{1{,}3}\ \text{мкм}. \qquad (30$$

Для пористого нихрома, изготовленного из шихты с 10% двууглекислого аммония в интервале пористости 0,20—0,45, опытные значения $d_{пср}$ согласуются с зависимостью (кривая *2*)

$$d_{п\,ср} = 25{,}6\,П^{1{,}3}\ \text{мкм}. \qquad (31)$$

Для пористого нихрома, изготовленного из шихты с 15% двууглекислого аммония в интервале пористости 0,42—0,55, получена зависимость (кривая *3*)

$$d_{п\,ср} = 29{,}2\,П^{1{,}3}\ \text{мкм}. \qquad (32)$$

Сравнение данных по средним размерам пор нихрома, изготовленного из частиц одного размера и одинаковой формы, показывает, что введение наполнителя в шихту приводит к росту средних размеров пор. Влияние количества наполнителя на средний размер пор можно учесть по формуле (кривая *5*)

$$d_{п\,ср} = 18{,}6\,(1 + 0{,}038\,H)\,П^{1{,}3}\ \text{мкм}, \qquad (33$$

где H — процентное содержание двууглекислого аммония в шихте (сверх 100%).

Зависимость (33) экспериментально проверена на образцах пористостью 0,18—0,55.

Для нихрома пористостью 0,08—0,18 опытные значения среднего размера пор хорошо согласуются с зависимостью (кривая *4*)

$$d_{п\,ср} = 1{,}26\cdot10^{4}\,П^{5{,}1}\ \text{мкм}. \qquad (34)$$

Резкое уменьшение средних размеров пор при уменьшении пористости объясняется появлением при прессовании остаточных деформаций частиц шихты. Появление остаточных деформаций частиц сопровождается резким уменьшением пор на поверхности образца, при этом пористость почти не меняется. Дальнейший рост усилий прессования может привести к полному закрытию пор с поверхности образца, в то время как в глубине образца будут свободные пространства.

Эти выводы подтверждаются результатами опытов по определению средних размеров пор методом исследования микрофотографий. Хорошая сходимость значений среднего размера пор, полученных по методу вытеснения жидкости из пор и по методу исследования микрофотографий (см. рис. 20), указывает на то, что большинство пор имеют минимальные размеры проходных сечений на поверхности образца.

В работе [20] средние размеры пор определяли также по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля. При определении средних размеров пор по формуле (22) использованы расходные характеристики образцов, полученные при фильтрации дистиллированной воды и воздуха в порах. Результаты опытов (в предложении, что $a_{изв}=1$) показаны на

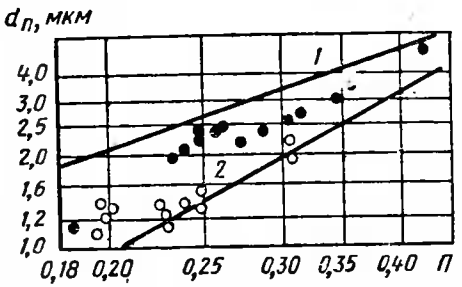


Рис. 27. Экспериментальные значения среднего размера пор по методу совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля:

светлые кружки — нихром без наполнителя; черные кружки — нихром с наполнителем (10% по массе двууглекислого аммония); *1* — линия по формуле (30); 2 — линия по формуле (28)

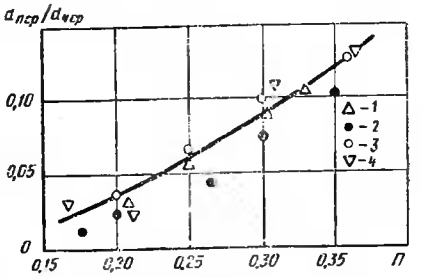


Рис. 28. Зависимость отношения среднего размера пор к среднему размеру частиц от пористости стали 50ХГ [кривая рассчитана по формуле (35)]:

1 — фракция — 63 ÷ + 35 мкм; *2* — фракция — 200 ÷ + 100 мкм; *3* — фракция — 315 ÷ ÷ + 200 мкм; *4* — фракция — 500 ÷ + 315 мкм

рис. 27. Как и следовало ожидать, значения средних размеров пор, полученные по этому методу, меньше значений, найденных по методу вытеснения жидкости и по методу исследования микрофотографий. На рис. 27 показаны для сравнения результаты работы [36], где средний размер пор нихрома, полученного по той же технологии, определяли по формуле (22). Видно, что данные работ [20, 36] хорошо согласуются. На рис. 27 показана также зависимость (30), полученная по методу вытеснения жидкости из пор на тех же образцах из нихрома. Сравнение экспериментальных значений средних размеров пор, найденных различными методами, еще раз показывает, что метод совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля всегда дает меньшие значения среднего размера пор по сравнению со значениями $d_{п\,ср}$, полученными по методу вытеснения жидкости из пор.

Для установления влияния размеров частиц на средние размеры пор при постоянной форме частиц проведена серия опытов с образцами стали 50ХГ, изготовленными из частиц лепестковой формы четырех фракций. Результаты опытов, приведенные на рис. 28, показывают, что независимо от крупности частиц шихты средние размеры пор линейно зависят от размеров частиц и удовлетворительно согласуются с зависимостью

$$d_{п\,ср} = П^2 d_{ч\,ср}. \qquad (35)$$

Исследования на образцах из стали 50 ХГ, результаты работы [20], а также зависимость (24) среднего размера пор от среднего размера частиц, справедливая для пористых металлов из сферических частиц, позволяют считать, что средние размеры пор линейно зависят от средних размеров частиц, из которых изготовлен пористый металл при условии, что в процессе спекания не происходит значительного изменения размеров частиц.

Для оценки влияния способа прессования на средние размеры пор металлов различной пористости исследованы образцы нихрома, нержавеющей стали и железа, изготовленные прессованием в пресс-формах, гидростатическим прессованием и прокаткой порошка. Результаты опытов, приведенные на рис. 29, показывают, что экспериментальные значения средних размеров пор прокатанных пористых металлов согласуются с зависимостью (30), полученной для пористых металлов, изготовленных из шихты такого же состава прессованием в пресс-формах и гидростатическим прессованием. Таким образом, способ прессования не оказывает большого влияния на средние размеры пор металлов, изготовленных из шихты одного состава.

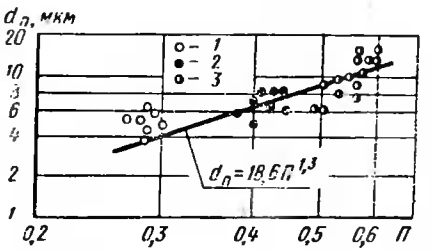


Рис. 29. Зависимость средних размеров пор нихрома (*1*), нержавеющей стали (*2*) и железа (*3*), полученных прокаткой порошка, от пористости

У всех рассмотренных выше металлов (кроме пористых образцов из вольфрама) изменение пористости достигалось главным образом изменением удельных давлений прессования, а процесс спекания обеспечивал лишь необходимую прочность образцов без заметного изменения пористости. Однако в последнее время все шире стали применять технологические процессы изготовления пористых металлов, где необходимая пористость обеспечивается изменением температуры и длительности процесса спекания. Спекание в этих случаях сопровождается заметной усадкой пористых изделий. Исследования по определению среднего размера пор таких пористых образцов указывают на наличие характерных особенностей в зависимостях между средними размерами пор, средними размерами частиц и пористостью металла.

Максимальные размеры пор можно определить тремя способами: вытеснением жидкости из пор, вдавливанием ртути в поры и исследованием микрофотографий. Если первые два способа дают весьма близкие друг к другу результаты, то способ исследования микрофотографий пористой структуры дает завышенные значения размеров пор и поэтому не может при-

меняться для нахождения максимальных размеров пор. Такое расхождение результатов определения максимального размера пор различными способами объясняется тем, что способы определения размера пор, основанные на капиллярных силах, дают минимальный размер самой большой поры по ее длине, тогда способ исследования микрофотографий позволяет найти максимальный размер пор в данном сечении образца. Поскольку пропускающая способность поры характеризуется размером ее минимального сечения, то и результаты определения максимального размера пор по способу вытеснения жидкости из пор или по способу вдавливания ртути в поры следует считать характеристиками тонкости очистки пористого материала.

Максимальные размеры пор, определенные по методу вытеснения жидкости из пор, стали 50ХГ, изготовленной из частиц сферической и несферической формы; пористого нихрома Х20Н80, изготовленного из смеси частиц эллипсовидной и сферической форм; пористой меди, изготовленной из частиц округлой формы; пористой нержавеющей стали 12Х18Н10Т, изготовленной из смеси частиц сферической и произвольной форм, и других пористых металлов оказались величинами одного порядка со средним размером пор. Результаты опытов показали, что отношение максимального размера пор к их среднему размеру зависит от пористости, увеличиваясь при ее уменьшении, а так-

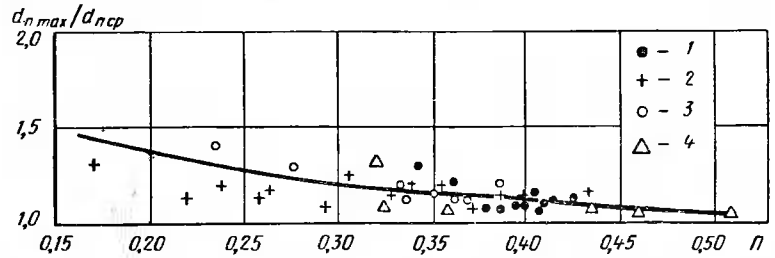


Рис. 30. Зависимость отношения максимального размера пор к среднему размеру пор от пористости металлов, изготовленных из частиц сферической и округлой формы [кривая рассчитана по формуле (36)]:
1 — пористая бронза; *2* — пористая сталь 50ХГ; *3* — пористый нихром; *4* — пористый вольфрам

же от формы частиц. Экспериментальные значения $d_{пmax}/d_{пср}$, полученные для пористых металлов, изготовленных из частиц сферической и округлой формы, приведены на рис. 30. Опытные значения отношения $d_{пmax}/d_{пср}$ для пористых металлов можно описать зависимостью

$$d_{п\,max} = 0{,}88\,П^{-0{,}27}\,d_{п\,ср} \qquad (36)$$

при изменении пористости образцов от 0,16 до 0,51.

Для установления влияния формы частиц исходного материала на отношение $d_{пmax}/d_{пср}$ найдены методом вытеснения жидкости из пор значения максимального и среднего размеров пор для пористых металлов, изготовленных из частиц стали 50ХГ лепестковой формы. Значения отношения $d_{пmax}/d_{пср}$ в зависимости от пористости удовлетворительно согласуются с зависимостью

$$d_{п\,max} = 0{,}56\,П^{-0{,}87}\,d_{п\,ср} \qquad (37)$$

при изменении пористости от 0,16 до 0,37.

Сравнение данных по отношению максимальных размеров пор к средним показывает, что переход от сферической формы частиц к произвольной сопровождается некоторым ростом отношения, особенно у металлов с пористостью менее 0,3. Если у пористых металлов из сферических частиц с пористостью 0,2 отношение $d_{пmax}/d_{пср}=1{,}40$, то для пористых металлов из частиц тарельчатой формы той же пористости отношение $d_{пmax}/d_{пср}=2{,}3$.

Уменьшение пористости образцов во всех случаях сопровождается увеличением отношения $d_{пmax}/d_{пср}$, что можно объяснить повышенной анизотропностью структуры металлов малой пористости. С ростом пористости от 0,3 до 0,51 значения отношения $d_{пmax}/d_{пср}$ стремятся к единице. Таким образом, у крупнопористых образцов практически исчезает разница между средним и максимальным размерами пор. Определенным подтверждением этого экспериментального факта служат результаты работы [95], где найдены максимальные и средние размеры пор методом вытеснения жидкости из пор на образцах из сплава Ni—30 Mo. У образцов пористостью 0,64—0,83 средние размеры пор практически совпадают со значениями максимальных размеров пор, так как первый пузырек газа и основная масса пузырьков появляется на поверхности образца при почти одном и том же давлении газа под образцом.

Помимо метода вытеснения жидкости из пор максимальные размеры пор определены методом вдавливания ртути в поры и методом исследования микрофотографий. За максимальный размер пор при исследовании микрофотографий принят размер наибольшей поры в исследуемом сечении образца, а максимальный размер пор по методу вдавливания ртути определен по давлению, при котором первые порции ртути входят в образец. Результаты определения максимального размера пор тремя различными методами приведены в табл. 7. Значения максимальных размеров пор, найденные по методу исследования микрофотографий, оказываются на порядок больше максимальных размеров пор, определенных методом вытеснения жидкости из пор или методом вдавливания ртути в поры.

Для большинства пористых образцов значения максимальных размеров пор, полученные по методу вдавливания ртути в поры, на 20—30% выше значений $d_{пmax}$, определенных по методу вытеснения жидкости из пор. Такое соотношение данных по

максимальным размерам пор можно объяснить строением порового пространства металлов. Метод вытеснения жидкости из пор всегда дает размер минимального сечения поры, а первые порции ртути при вдавливании могут войти в поры через сечения бо́льших размеров, чем размер минимального сечения (например, при заполнении пор, показанных на рис. 19, *б—г*). Поэтому метод вдавливания ртути дает завышенные результаты по сравнению с методом вытеснения жидкости из пор.

Анализ данных по максимальным размерам пор, найденным различными методами, показывает, что наиболее достоверные значения могут быть получены по методу вытеснения жидкости из пор.

Таблица 7

Макси альные размеры пор металлов

Пористый металл	Средний размер частиц, мкм	Пористость	Максимальный размер пор (мкм), определяемый методом		
			вытеснения жидкости	вдавливания ртути	микрофотографии
Нихром	12	0,175	5,67	6,90	—
		0,175	3,34	4,78	—
		0,200	3,62	4,78	—
		0,210	6,25	6,90	—
		0,260	6,83	6,20	—
		0,290	7,00	6,20	—
		0,310	6,98	6,90	—
		0,340	5,05	7,75	—
		0,345	6,70	5,63	—
		0,365	6,25	5,18	—
Бронза	100	0,316	63,0	78,7	—
		0,389	63,0	78,7	—
Нихром	8,2	0,140	0,782	—	15,69
		0,290	4,96	—	28,6
		0,360	4,04	—	32,40

Распределение пор по размерам. Для сравнения пористых сред по размерам пор обычно используют значения среднего и максимального размеров пор. Однако эти размеры пор неполно характеризуют пористую структуру. Более полное представление о структуре пористой среды дает распределение пор по размерам в виде зависимости количества пор или занимаемого ими объема от размера пор. Для нахождения распределения пор по размерам в пористых средах применяют несколько методов: метод вдавливания ртути в поры, метод вытеснения жидкости из пор, метод исследования микрофотографий, метод адсорбции газов, метод рассеяния рентгеновских лучей и др.

Характеристики пористых образцов из нихрома, бронзы и нержавеющей стали

Материал	Пористость, определяемая методом		Максимальный размер пор (мкм), определяемый методом			Средний размер пор (мкм), определяемый методом			σ, мкм	$E_э$	$A_э$
	объемным	вдавливания ртути в поры	вытеснения жидкости из пор	вдавливания ртути в поры	графическим	вытеснения жидкости из пор	вдавливания ртути в поры	графическим			
Нихром	0,175	0,161	3,34	4,78	3,67	1,886	—	2,72	—	—	—
	0,200	0,185	3,62	4,78	3,47	2,48	—	2,09	—	—	—
	0,340	0,295	5,05	7,75	3,81	4,24	—	2,09	—	—	—
	0,175	0,168	5,67	6,90	6,04	3,06	5,77	4,37	1,025	2,26	—1,92
	0,210	0,207	6,25	6,90	8,73	4,13	6,08	3,09	1,15	1,76	—1,92
	0,260	0,222	6,85	6,20	6,04	5,20	6,09	3,24	1,072	2,15	—2,04
	0,290	0,268	7,00	6,20	6,62	5,66	6,14	4,47	0,970	0,62	—1,68
	0,310	0,299	6,98	6,90	6,93	5,91	5,63	4,47	1,23	0,34	—0,90
	0,345	0,350	6,70	5,63	6,23	6,04	4,73	3,90	0,99	0,32	—0,89
	0,365	0,368	6,25	5,18	5,02	5,80	4,31	2,82	0,838	2,22	—1,44
Нержавеющая сталь	0,064	0,051	43,6	38,37	—	20,2	31,2	45,18	7,1	—0,05	1,38
	0,112	0,079	55,6	58,27	44,78	32,1	42,9	27,6	14,9	—1,95	1,05
	0,126	0,098	82,5	112,20	71,62	50,3	58,3	34,76	26,0	1,34	1,14
	0,140	0,110	93,0	112,20	71,62	58,9	66,5	44,36	24,1	0,60	1,02
	0,165	0,116	101,0	112,20	87,3	68,0	76,6	47,98	28,1	—0,90	0,24
	0,178	0,129	108,2	143,0	98,0	75,7	77,6	45,0	31,0	0,90	0,86
Бронза	0,316	0,172	63,0	78,68	69,02	56,1	58,4	44,16	12,21	0,24	—0,80
	0,389	0,256	63,0	78,68	71,3	56,8	60,62	44,16	12,49	—0,8	—0,18
	0,438	0,286	—	44,95	44,78	—	—	31,7	—	—	—

Применительно к изучению распределения пор по размерам в пористых металлах наибольшее распространение получил метод вдавливания ртути в поры. Этот метод нашел широкое применение также для исследования структуры адсорбентов и катализаторов, термоизоляционных материалов, огнеупоров и других материалов.

Возможность заполнения ртутью поры данного размера зависит от приложенного давления. Чем оно выше, тем в более мелкие поры вдавливается ртуть. Вычисляя размер пор по соответствующему давлению ртути и зная количество вдавленной ртути, можно найти распределение пор по размерам, т. е. найти объемы, занимаемые порами каждого размера. Опыты ведут обычно при возрастающих давлениях ртути, последовательно заполняя поры от максимальной до минимальной.

Иногда для нахождения распределения пор по размерам применяют метод вытеснения жидкости из пор [54]. При вытеснении жидкости из пор одновременно измеряют расход газа через поры данного размера, а затем вычисляют и число пор одинакового размера или суммарное поперечное сечение пор данного размера. Этот метод, названный в работе [54] графо-аналитическим, не обладает высокой точностью в области малых размеров пор, поскольку возникают большие трудности в определении малых приращений расходов газа.

Применительно к пористым металлам для нахождения распределения пор по размерам можно использовать метод исследования микрофотографий. Этот метод дает распределение пор по размерам в одном сечении пористого образца, а не по размерам наиболее узких сечений пор, получаемое при использовании методов вдавливания ртути и вытеснения жидкости из пор. Точность этого метода существенно зависит от выбора увеличения при изготовлении микрофотографий.

Ленинградским технологическим институтом им. Ленсовета и МВТУ им. Баумана проведены совместные опыты по нахождению распределения пор по размерам в образцах методом вдавливания ртути в поры. Для опытов взяты образцы пористой бронзы, изготовленные из сферических частиц размером от 125 до 160 мкм; образцы пористого нихрома, изготовленные из частиц произвольной формы размером 6—12 мкм, и образцы пористой нержавеющей стали. Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 8.

На рис. 31 показаны экспериментальные дифференциальные и интегральные кривые распределения пор по размерам в нихроме ($П = 0{,}345$), бронзе ($П = 0{,}389$) и нержавеющей стали ($П = 0{,}165$). Интегральное распределение пор по размерам показано в координатах размер пор — относительный объем пор. Дифференциальное распределение пор по размерам показано в координатах: размер пор — плотность вероятности распределения, вычисленная по формуле (1/мкм)

$$f_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta d_{пi} \sum_1^n \Delta V_i}. \qquad (38)$$

Для сравнения на рис. 31 показаны кривые закона нормального распределения, рассчитанные по формуле

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{(d_{пi} - d_{п\,ср})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (39)$$

где σ — среднеквадратичное отклонение.

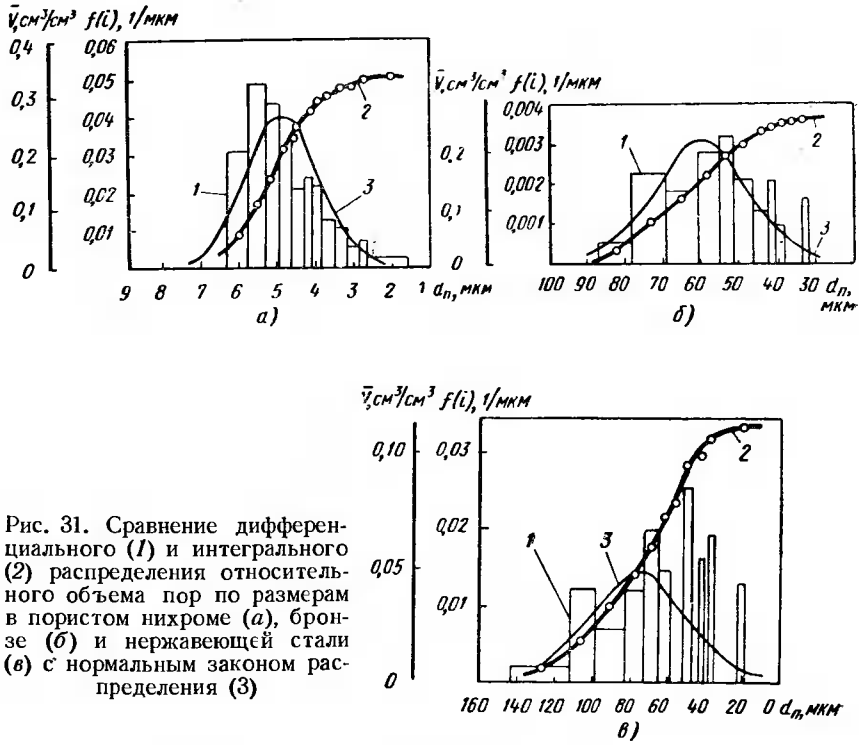


Рис. 31. Сравнение дифференциального (*1*) и интегрального (*2*) распределения относительного объема пор по размерам в пористом нихроме (*а*), бронзе (*б*) и нержавеющей стали (*в*) с нормальным законом распределения (3)

Значение σ вычислено по формуле

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_{пi} - d_{п\,ср})^2 \Delta V_i}{\sum_1^n \Delta V_i}}, \qquad (40)$$

где D — дисперсия.

Оценку сходимости экспериментального распределения пор по размерам с законом нормального распределения можно про-

вести по значениям эксцесса и асимметрии экспериментального распределения, определенным по формулам

$$E_э = \frac{\sum_1^n (d_{пi} - d_{п\,ср})^4 \Delta V_i}{\sigma^4 \sum_1^n \Delta V_i} - 3; \qquad (41)$$

$$A_э = \frac{\sum_1^n (d_{пi} - d_{п\,ср})^3 \Delta V_i}{\sigma^3 \sum_1^n \Delta V_i}, \qquad (42)$$

где $E_э$ — эксцесс экспериментального распределения; $A_э$ — асимметрия экспериментального распределения.

Результаты расчета, приведенные в табл. 8, показывают, что для пористого нихрома и нержавеющей стали значения эксцесса и асимметрии превышают 0,5, что свидетельствует о недостаточной сходимости экспериментального распределения с нормальным законом распределения.

Среднеквадратичное отклонение, приведенное в табл. 8, может характеризовать степень однородности пористого металла по размерам пор — чем оно меньше, тем однороднее пористая структура. Вместе с тем абсолютная величина квадратичного отклонения зависит не только от степени однородности пористой структуры, но и от абсолютного значения среднего размера пор.

Отклонения в металле с большим размером пор будут чаще всего больше, чем в металле с мелкими порами. Поэтому среднеквадратичное отклонение полезно для сравнительной оценки металлов с примерно равными средними размерами пор.

Распределение пор по размерам в сечениях образцов может быть найдено методом исследования микрофотографий. Характеристики пористых образцов и результаты исследований приведены в табл. 9. Опытные значения максимальных и средних размеров пор, определенные по микрофотографиям, значительно больше значений размеров пор, найденных по методу вытеснения жидкости из пор. Это объясняется тем, что методом исследования микрофотографий учитываются размеры пор, находящихся только в исследуемом сечении, а методом вытеснения жидкости из пор определяются минимальные размеры пор по их длине, т. е. по толщине пористого металла.

Сравнение распределения размеров пор, найденного по методу исследования микрофотографий, с законом нормального распределения показывает их удовлетворительную сходимость, поскольку для большинства образцов значения эксцесса и асимметрии, приведенные в табл. 9, менее 0,5. Обращает внимание значительное увеличение среднеквадратичного отклонения для распределения, найденного методом исследования микрофотографий, по сравнению со среднеквадратичным отклонением для распределения, полученного методом вдавливания ртути у образцов с одинаковым средним размером пор. Это указывает на значительно больший диапазон изменения размеров поперечных сечений пор по сравнению с диапазоном изменения размеров их минимальных сечений.

Таблица 9

Характеристики пористых образцов из нихрома, вольфрама и молибдена

Материал	Размер частиц, мкм	Пористость	Максимальный размер пор (мкм), определяемый методом		Средний размер пор (мкм), определяемый методом		σ, мкм	$E_э$	$A_э$
			вытеснения жидкости из пор	микрофотографий	вытеснения жидкости из пор	микрофотографий			
Нихром	6—12	0,140	0,782	15,69	0,425	5,53	—	—	—
	6—12	0,290	4,96	17,37	4,01	4,87	4,3	—1,0	0,568
	6—12	0,360	4,04	22,40	3,50	5,84	4,78	—0,74	0,715
Вольфрам	4,2	0,250	2,60	38,30	1,83	12,10	6,06	3,05	0,485
Молибден	4,2	0,310	3,18	41,90	2,52	11,80	8,78	—0,48	0,587
	6,3	0,130	—	17,15	—	6,67	3,52	—1,15	0,192
	6,3	0,160	0,718	27,4	0,52	10,10	5,51	—0,43	0,473
	4,2	0,160	2,22	21,4	1,51	7,95	—	—0,4	0,003
	4,2	0,160	2,23	25,7	1,52	8,30	4,33	—0,8	0,080
	6,3	0,200	1,45	29,00	1,10	12,85	—	—	—
	4,2	0,200	2,87	29,50	2,25	10,85	5,41	—0,59	0,253
	4,2	0,200	3,06	21,40	2,25	8,54	5,26	0,00	0,412
	6,3	0,260	2,56	38,50	2,10	17,75	8,00	—0,70	0,42
	4,2	0,260	3,71	28,70	3,10	10,50	6,85	—0,72	1,04

При рассмотрении экспериментальных кривых распределения относительных объемов пор по размерам в пористых металлах, которые получены методом вдавливания ртути в поры, обращает на себя внимание следующее: чем однороднее материал, т. е. чем меньше разброс по размерам частиц, из которых изготовлен пористый металл, тем ближе закон распределения размеров пор приближается к нормальному закону распределения (примером могут служить кривые распределения пор по размерам, полученные для пористой бронзы); металлы, изготовленные из частиц произвольной формы, имеют существенные отклонения в распределении пор по размерам от нормального закона распределения со смещением в область пор малого размера; обращает на себя внимание факт практического отсутствия в пористых металлах отдельных пор с размером меньше наименьшего и больше максимального размера пор.

Анализ данных по распределению пор по размерам в металлах позволяет считать, что наилучшим методом экспериментального определения распределения пор по размерам является метод вдавливания ртути в поры. В первом приближении распределение пор по размерам может быть описано законом нормального распределения.

Экспериментальные распределения пор по размерам можно использовать для определения наиболее распространенных характеристик размеров пор пористой структуры, таких как максимальный и средний размеры.

Средний размер пор часто находят, пользуясь статистической величиной — математическим ожиданием размера пор, рассчитываемой в зависимости от количества пор с пределами суммирования 1 — n интервалов размеров пор по формуле

$$d_{\text{п ср}} = \frac{\sum_{1}^{n} N_i d_{\text{п}i}}{\sum_{1} N_i}, \qquad (43)$$

где $d_{\text{п}\,i}$ — средний размер пор в i-м интервале; N_i — количество пор в i-м интервале.

Поскольку количество пор малого размера в пористых металлах всегда больше количества крупных пор, то средний размер пор при таком способе определения будет иметь заниженные значения. Однако известно, что проницаемость пористых металлов обусловлена в основном наличием в них средних и крупных пор, а не мелких, которые, несмотря на их большое количество, имеют малый суммарный объем. Поэтому средний размер пор, рассчитанный по формуле (43), не всегда отражает физическую сущность структуры пористых металлов с точки зрения их проницаемости.

В работе [29] средний размер пор предложено рассчитывать с учетом занимаемых ими объемов в тех же пределах суммирования по формуле

$$d_{\text{п ср}} = \frac{\sum_{1}^{n} \Delta V_i d_{\text{п}i}}{\sum_{1}^{n} \Delta V_i}, \qquad (44)$$

где ΔV_i — объем, занимаемый порами размером $d_{\text{п}\,i}$.

Результаты расчета среднего размера пор по формуле (44) даны в табл. 8. Там же даны значения среднего размера пор, найденные по методу вытеснения жидкости из пор, и приведены максимальные и средние размеры пор, полученные графическим методом, предложенным в работе [29], где для нахождения максимальных и средних размеров пор используются интегральные кривые распределения пор по размерам. Принцип определения $d_{\text{п ср}}$ и $d_{\text{п max}}$ показан на рис. 32. Для определения $d_{\text{п max}}$ предложено продлить нижнюю ветвь порограммы, спрямив ее последний участок перед подъемом кривой, и найти точку пересечения проведенной линии с линией продолжения прямого участка поднимающейся ветви кривой. Для нахождения $d_{\text{п ср}}$ надо продлить спрямленный участок верхней ветви кривой и найти точку пересечения полученной линии с линией продолжения прямого участка поднимающейся ветви кривой. Опустив перпендикуляры из точек пересечения на ось абсцисс, можно найти соответственно $d_{\text{п max}}$ и $d_{\text{п ср}}$.

Сравнение значений среднего размера пор, найденных различными методами, показывает, что удовлетворительно согласуются значения $d_{\text{п ср}}$, полученные по методу вдавливания ртути в поры и по методу вытеснения жидкости из пор. Разброс значений $d_{\text{пср}}$, найденных указанными методами, составляет ±15%. Значения средних размеров пор, полученные графическим методом, почти всегда меньше значений $d_{\text{п ср}}$, найденных другими методами.

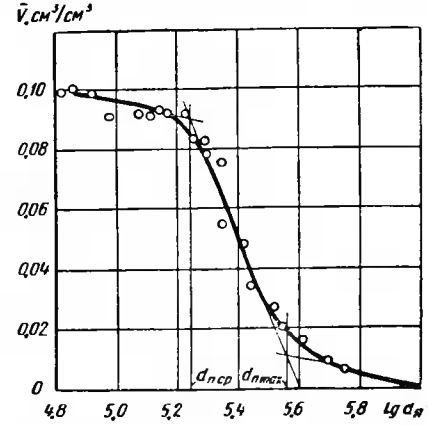


Рис. 32. Графическое определение максимального и среднего размеров пор по интегральным кривым распределения

Значения $d_{\text{п max}}$ получены тремя методами (см. табл. 8): вытеснением жидкости из пор, вдавливанием ртути в поры и графическим по интегральной кривой распределения пор по размерам. По методу вытеснения жидкости из пор $d_{\text{п max}}$ вычислены по давлению, при котором через поры начинается фильтрация газа, что соответствует моменту появления на поверхности пористого образца первого пузырька. По методу вдавливания ртути $d_{\text{п max}}$ найдены по давлению, при котором первые порции ртути вошли в пористый образец. Графическим методом $d_{\text{п max}}$ определены по принципу, показанному на рис. 32. Сравнение данных по максимальным размерам пор показывает, что значения $d_{\text{п max}}$, найденные удовлетворительно согласуются. Значения же $d_{\text{п max}}$, полученные методом вытеснения жидкости из пор и графическим методом, методом вдавливания ртути, как правило, выше значений, определенных другими методами. Максимальный разброс значений максимального размера пор, найденных тремя методами, для большинства образцов не превышает ±20%.

5. ВЯЗКОСТНЫЙ И ИНЕРЦИОННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Структура пористых металлов носит сложный характер и отличается строением, состоянием поверхности, размерами и формой пор. Все эти факторы влияют на проницаемость пористых металлов при фильтрации жидкостей или газов в порах.

Для комплексной оценки влияния характеристик пористой структуры на проницаемость используют вязкостный α и инерционный β коэффициенты пористой среды [40, 48, 65, 125, 126]. Связь между потерями давления в пористой среде и скоростью фильтрации жидкости в аналитической форме в этом случае записывается в виде соотношения

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} = \alpha\mu W_ф + \beta\rho_ж W_ф^2, \qquad (45)$$

где $P_{вх}$ — давление на входе в пористый образец; $P_{вых}$ — давление на выходе из пористого образца; μ — коэффициент вязкости жидкости; l — толщина образца.

Так как удельный секундный расход жидкости связан со скоростью фильтрации жидкости соотношением

$$j = g\rho_ж W_ф, \qquad (46)$$

то уравнение (45) можно записать в виде

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} g\rho_ж = \alpha\mu j + \beta j^2. \qquad (47)$$

Если уравнение (47) использовать для случая фильтрации газа в порах, выразив плотность газа по уравнению состояния через средние параметры газа в пористой среде, то его можно записать в виде

$$\frac{P_{вх}^2 - P_{вых}^2}{2RTl} = \alpha\mu j + \beta j^2, \qquad (48)$$

где R — газовая постоянная; T — средняя температура газа в порах.

Из соотношений (45) и (48) видно, что вязкостный коэффициент α учитывает потери давления, пропорциональные первой степени скорости фильтрации жидкости, т. е. потери на трение, которые определяются вязкостью жидкости и размерами порового канала.

Инерционный коэффициент β учитывает потери давления, пропорциональные квадрату скорости фильтрации жидкости, т. е. потери, вызванные изменением скорости движения жидкости в большом числе внезапных расширений и сужений, характерных для пористой структуры. Коэффициент β учитывает также потери давления, вызванные поворотом потока в порах, смещением отдельных струй, завихрениями жидкости в порах.

Попытки теоретически определить значения коэффициентов α и β не привели к желаемым результатам из-за недостатка сведений о структуре пористой среды [48, 125].

В настоящее время широкое применение получил экспериметальный метод определения значений коэффициентов α и β, предложенный в работе [48]. Суть этого метода состоит в следующем: для двух крайних значений удельного расхода фильтруемой жидкости или газа, взятых с расходной характеристики пористого образца, подсчитывают значение комплекса

$$A = \frac{P_{вх}^2 - P_{вых}^2}{2RTjl}; \qquad (49)$$

по двум точкам в координатах $A - j$ строят прямую линию, уравнение которой $A = B_1 j + B_0$; по графику функции $A = f(j)$ находят величины B_0 и B_1, а затем определяют коэффициенты

$$\alpha = \frac{B_0}{\mu}; \qquad (50)$$

$$\beta = B_1. \qquad (51)$$

При определении коэффициентов α и β рассмотренным методом необходимо расходную характеристику пористой среды находить экспериментально в возможно большем диапазоне перепадов давления на пористом образце. При этом всегда надо достигать области течений, где зависимость удельного секундного расхода жидкости от перепада давления носит нелинейный характер.

Характеристики исследованных пористых металлов, экспериментальные значения коэффициентов, а в отдельных случаях и эмпирические зависимости коэффициентов α и β от пористости металлов, полученные в ряде исследований, приведены в табл. 10.

В работе [126] предпринята попытка установить влияние давления и температуры фильтруемой среды на значения вязкостного и инерционного коэффициентов пористых металлов. Опыты, проведенные при изменении температуры от 15 до 60° С и изменении давления от 1,0 до 140 кгс/см², показали, что инерционный коэффициент не зависит от давления и температуры сжатого азота, а вязкостный коэффициент увеличивается с ростом температуры газа и остается постоянным при изменении давления фильтруемой среды. Авторы работы [126] считают, что рост вязкостного коэффициента при увеличении температуры пористой среды происходит из-за незначительных изменений в структуре пористого тела при нагреве.

В работе [65] описано исследование гидравлического сопротивления пористых образцов карбидов, боридов и стали 20Х23Н18, изготовленных из частиц несферической формы. Для всех пористых металлов получены зависимости (при изменении пористости от 0,264 до 0,624)

Таблица 10

Значения вязкостного и инерционного коэффициентов пористых металлов

Металл и его характеристики	Пористость	α, м$^{-2}$	β м,$^{-1}$	Источник
Нержавеющая сталь	0,256	$1{,}565\cdot10^{13}$	$5{,}78\cdot10^{7}$	[125]
Железо	0,327	$5{,}625\cdot10^{12}$	$6{,}3\cdot10^{7}$	
Железо	0,595	$5{,}19\cdot10^{10}$	$1{,}576\cdot10^{7}$	
Пористая бронза	0,462	$1{,}41\cdot10^{11}$	$1{,}895\cdot10^{5}$	
Нержавеющая сталь четырех фракций, мкм: <40, −50÷+40, −125÷+50, −160÷+125	0,18—0,34	$\alpha=20{,}2\Pi^{-4{,}9}$	$\beta=20{,}2\Pi^{-8{,}8}$	[48]
Металл из сферических частиц	0,357	$0{,}234\cdot10^{13}$	$4{,}6\cdot10^{7}$	[126]
	0,324	$1{,}375\cdot10^{13}$	$8{,}4\cdot10^{7}$	
	0,377	$0{,}0321\cdot10^{13}$	$0{,}915\cdot10^{7}$	
	0,330	$8{,}98\cdot10^{13}$	$90{,}3\cdot10^{7}$	
	0,394	$30{,}3\cdot10^{13}$	$61{,}0\cdot10^{7}$	
Нержавеющая сталь, изготовленная прокаткой порошка	0,273	$2{,}42\cdot10^{13}$	$7{,}36\cdot10^{7}$	[40]
	0,295	$2{,}79\cdot10^{13}$	$8{,}94\cdot10^{7}$	
	0,295	$1{,}91\cdot10^{13}$	$3{,}8\cdot10^{7}$	
	0,296	$2{,}14\cdot10^{13}$	$6{,}63\cdot10^{7}$	
	0,303	$1{,}58\cdot10^{13}$	$1{,}58\cdot10^{7}$	
	0,482	$2{,}61\cdot10^{12}$	$4{,}43\cdot10^{6}$	
	0,522	$1{,}825\cdot10^{12}$	$3{,}065\cdot10^{6}$	
	0,522	$1{,}545\cdot10^{12}$	$2{,}522\cdot10^{6}$	
	0,523	$1{,}513\cdot10^{12}$	$2{,}58\cdot10^{6}$	
	0,524	$1{,}613\cdot10^{12}$	$1{,}882\cdot10^{6}$	
(Ti, Gr) B_2, фракция −100÷+75 мкм, $T_{сп}$=2300 К, $\tau_{сп}$=30 мин	0,497	$7{,}9\cdot10^{11}$	$5{,}91\cdot10^{5}$	[65]
	0,454	$1{,}17\cdot10^{12}$	$7{,}85\cdot10^{5}$	
	0,417	$2{,}06\cdot10^{12}$	$1{,}57\cdot10^{6}$	
	0,400	$3{,}16\cdot10^{12}$	$2{,}36\cdot10^{6}$	
Zr B_2, фракция −75÷+50 мкм, $T_{сп}$=2300 К, $\tau_{сп}$=30 мин	0,486	$3{,}26\cdot10^{12}$	$3{,}4\cdot10^{6}$	[65]
	0,436	$3{,}86\cdot10^{12}$	$3{,}14\cdot10^{6}$	
	0,411	$8{,}85\cdot10^{12}$	$7{,}36\cdot10^{6}$	
	0,375	$8{,}97\cdot10^{12}$	$8{,}8\cdot10^{6}$	
WC фракция −100÷+75 мкм, $T_{сп}$=2600 К, $\tau_{сп}$=60 мин	,483	$8{,}5\cdot10^{11}$	$7{,}85\cdot10^{5}$	[65]
	,479	$1{,}06\cdot10^{12}$	$1{,}1\cdot10^{6}$	
	,466	$1{,}5\cdot10^{12}$	$9{,}8\cdot10^{5}$	
	,419	$1{,}71\cdot10^{12}$	$1{,}03\cdot10^{6}$	

Продолжение табл. 10

Металл и его характеристики	Пористость	α, м$^{-2}$	β, м$^{-1}$	Источник
TiC, фракция −100÷+75 мкм, $T_{сп}$=2600 К, $\tau_{сп}$=60 мин	0,320	$2{,}84\cdot10^{13}$	$3{,}0\cdot10^{7}$	[65]
	0,305	$2{,}21\cdot10^{13}$	$4{,}4\cdot10^{7}$	
	0,288	$2{,}79\cdot10^{13}$	$4{,}7\cdot10^{8}$	
	0,264	$8{,}12\cdot10^{13}$	$9{,}8\cdot10^{8}$	
Сталь 20Х23Н18; фракция −100÷+75 мкм,	0,624	$1{,}85\cdot10^{11}$	$1{,}95\cdot10^{5}$	
фракция −150÷+100 мкм	0,620	$1{,}14\cdot10^{11}$	$2{,}3\cdot10^{5}$	

$$\alpha = 8{,}9\cdot10^{9}\,\Pi^{-7}\ \text{м}^{-2}; \qquad (52)$$

$$\beta = 6{,}8\cdot10^{2}\,\Pi^{-10}\ \text{м}^{-1}. \qquad (53)$$

В работе [50] получены экспериментальные значения коэффициентов α и β для металлов, изготовленных из порошков стали 14Х17Н2 с частицами несферической формы. Спекание образцов проводили в среде водорода при $T_{сп}$=1473 К в течение 120 мин. Экспериментально авторы установили, что на значение коэффициента α влияет размер частиц, из которых получен пористый металл. Так, для пористых металлов, изготовленных из частиц размером от 280 до 380 мкм (здесь и далее α в м$^{-2}$)

$$\alpha = 4\cdot10^{9}\,\Pi^{-5{,}8}, \qquad (54)$$

а для металлов, изготовленных из частиц размером от 100 до 160 мкм,

$$\alpha = 6{,}2\cdot10^{9}\,\Pi^{-5{,}8}. \qquad (55)$$

Значения коэффициента β, полученные в работе [50], оказались зависимыми не только от пористости, но и от толщины образцов (здесь и далее β в м$^{-1}$)

$$l = 2\ \text{мм}, \quad \beta = 1{,}4\cdot10^{4}\,\Pi^{-5{,}8}; \qquad (56)$$

$$l = 5\ \text{мм}, \beta = 0{,}95\cdot10^{4}\,\Pi^{-5{,}8}; \qquad (57)$$

$$l = 8\ \text{мм}, \beta = 0{,}75\cdot10^{4}\,\Pi^{-5{,}8}. \qquad (58)$$

Зависимости (54)—(58) экспериментально проверены при изменении пористости от 0,3 до 0,55.

Кроме определения значений коэффициентов α и β в работе [50] описано влияние нагрева фильтруемого воздуха и пористого металла на величину коэффициентов α и β. Опыты проводили в изотермических условиях при температуре 20, 100 и 200° С. Изменение температуры не влияло на значения α и β, а увеличение потерь давления с ростом температуры полностью соответствовало увеличению вязкости воздуха.

Сравнение значений коэффициентов, полученных в рассмотренных выше исследованиях, показало, что коэффициенты α и β значительно отличаются по своим числовым значениям, такое расхождение объясняется различием в характеристиках структуры пористых сред.

Влияние фракционного состава шихты на значения коэффициентов α и β можно установить по результатам исследований, выполненных с образцами пористой стали 50ХГ. Пористость образцов, полученных из частиц лепестковой формы четырех фракций, изменялась от 0,165 до 0,36. Значения коэффициентов α и β показывают, что рост размеров частиц сопровождается уменьшением коэффициентов. С физической точки зрения уменьшение коэффициентов α и β при увеличении размера частиц можно объяснить ростом размеров пор пористой структуры, уменьшением макрошероховатостей на поверхности пор и числа внезапных сужений и расширений в поровом канале. Для стали 50ХГ, изготовленной из частиц лепестковой формы, можно рекомендовать следующие экспериментальные зависимости:

для фракции $-63 \div +35$ мкм

$$\alpha = 5{,}2 \cdot 10^{10} \Pi^{-5{,}0}; \quad (59)$$

$$\beta = 3{,}0 \cdot 10^{4} \Pi^{-6{,}1}; \quad (60)$$

для фракции $-200 \div +100$ мкм

$$\alpha = 0{,}82 \cdot 10^{10} \cdot \Pi^{-5{,}0}; \quad (61)$$

$$\beta = 1{,}8 \cdot 10^{4} \Pi^{-6{,}2}; \quad (62)$$

для фракции $-315 \div +200$ мкм

$$\alpha = 0{,}377 \cdot 10^{10} \Pi^{-5{,}0}; \quad (63)$$

$$\beta = 1{,}2 \cdot 10^{4} \Pi^{-5{,}7}; \quad (64)$$

для фракции $-500 \div +315$ мкм

$$\alpha = 0{,}15 \cdot 10^{10} \Pi^{-5{,}0}; \quad (65)$$

$$\beta = 1{,}3 \cdot 10^{4} \Pi^{-5{,}2}. \quad (66)$$

Аналогичное влияние размеров фракций частиц на значения вязкостного и инерционного коэффициентов пористых металлов получено в опытах, проведенных с образцами нихрома. Экспериментальные значения коэффициентов α и β удовлетворительно согласуются с зависимостями:

для фракции $-315 \div +200$ мкм

$$\alpha = 6{,}73 \cdot 10^{8} \Pi^{-3{,}0}; \quad (67)$$

$$\beta = 2{,}0 \cdot 10^{3} \Pi^{-3{,}4}; \quad (68)$$

для фракции $-500 \div +315$ мкм

$$\alpha = 2{,}71 \cdot 10^{8} \Pi^{-3{,}0}; \quad (69)$$

$$\beta = 1{,}04 \cdot 10^{3} \cdot \Pi^{-3{,}6}. \quad (70)$$

Зависимости (67)—(70) экспериментально проверены при изменении пористости нихрома от 0,23 до 0,36. Нихром получен прессованием частиц эллипсовидной и округлой форм в пресс-формах с последующим спеканием в восстановительной среде при температуре 1300° С в течение 120 мин.

Одновременное влияние размеров фракций частиц и их формы на значения вязкостного и инерционного коэффициентов получено при исследованиях пористой стали 50ХГ. Образцы для опытов изготовлены прессованием шихты в пресс-формах с последующим спеканием в восстановительной среде при температуре 1300° С в течение 120 мин. Форма частиц в зависимости от размера фракций менялась от сферической до произвольной. Рост размера фракций сопровождался уменьшением коэффициентов α и β, однако уменьшение инерционного коэффициента β происходит в меньшей степени, чем у образцов пористого нихрома и пористой стали 50ХГ, изготовленной из частиц лепестковой формы. На основании опытов можно заключить, что искажение формы частиц приводит к росту вязкостного α и в большей степени инерционного β коэффициентов. Это объясняется усложнением структуры пористого металла при переходе от сферической к произвольной форме частиц.

Для расчета значений коэффициентов α и β пористой стали 50ХГ можно рекомендовать следующие зависимости:

для фракции $-63 \div +35$ мкм

$$\alpha = 7{,}16 \cdot 10^{10} \frac{(1-\Pi)^2}{\Pi^3}; \quad (71)$$

$$\beta = 1{,}34 \cdot 10^{4} \Pi^{-3{,}8}; \quad (72)$$

для фракции $-200 \div +100$ мкм

$$\alpha = 1{,}06 \cdot 10^{9} \Pi^{-4{,}8}; \quad (73)$$

$$\beta = 0{,}52 \cdot 10^{4} \Pi^{-4{,}1}; \quad (74)$$

для фракции $-315 \div +200$ мкм

$$\alpha = 1{,}05 \cdot 10^{9} \Pi^{-4{,}4}; \quad (75)$$

$$\beta = 1{,}15 \cdot 10^{4} \Pi^{-3{,}7}; \quad (76)$$

для фракции $-500 \div +315$ мкм

$$\alpha = 0{,}64 \cdot 10^{9} \Pi^{-4{,}4}; \quad (77)$$

$$\beta = 0{,}8 \cdot 10^{3} \Pi^{-5{,}6}. \quad (78)$$

Зависимости (71)—(78) экспериментально проверены для стали 50ХГ пористостью от 0,19 до 0,31.

Влияние толщины образцов пористых металлов на значение коэффициентов α и β, отмеченное в работе [50], экспериментально не подтвердилось. В опытах толщина пористых образцов изменялась от 2 до 40 мм.

Анализ экспериментальных зависимостей, полученных для расчета коэффициентов, показывает, что для каждого вида пористого металла они носят индивидуальный характер. Однако несмотря на их разнообразие, можно отметить ряд общих закономерностей, характерных для этих зависимостей. Наибольшее влияние на значения коэффициентов α и β оказывает пористость металла; во всех случаях рост пористости сопровождается уменьшением коэффициентов. Укрупнение частиц исходного материала приводит к уменьшению значений коэффициентов α и β. Искажения формы частиц, т. е. переход от сферической к произвольной форме частиц, сопровождается ростом значений вязкостного и инерционного коэффициентов.

Глава III

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Пористая структура имеет существенные особенности в своем строении. Поры, как правило, представляют собой сложный искривленный канал переменного поперечного сечения как по форме, так и по размерам. Поэтому при описании характера течения жидкостей в порах необходимо весьма осторожно использовать закономерности, справедливые для каналов правильной геометрической формы.

В некоторых работах [28, 48] для установления закономерностей течения жидкостей в порах предлагались различные модели пористого тела в виде круглых каналов с переменным проходным сечением, каналов с большим числом сосредоточенных гидросопротивлений — дроссельных шайб, равномерно расположенных по длине канала, щелей различной формы и т. д. Однако все предлагаемые модели не отражают полностью явления, происходящие в порах при фильтрации жидкостей, и не могут служить расчетной моделью реальной пористой структуры.

Течение жидкостей в пористой среде обладает рядом особенностей, обусловленных строением порового пространства. В реальной пористой среде поры представляют собой искривленные каналы с переменной площадью и формой поперечного сечения; все поры сообщаются между собой поперечными каналами; характерные геометрические размеры пор переменны; поскольку в любой пористой среде поры распределены по размерам от максимальной до минимальной поры, то возможно возникновение различных режимов течения в соседних порах при одинаковых градиентах давления жидкости по длине пор; размеры неровностей на поверхности пор могут быть соизмеримы с размерами пор, что приводит к высокой относительной шероховатости поверхности пор; относительная шероховатость поверхности пор зависит не только от высоты неровностей на поверхности пор, но и от размеров пор, которые, в свою очередь, являются функцией пористости среды. Особенности строения порового пространства обусловливают ряд специфических гидродинамических явлений, возникающих при течении жидкостей или газов в порах.

1. РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

При фильтрации жидкостей или газов в пористой среде различают три основных вида течений: молекулярное, ламинарное и турбулентное. Поскольку переход от одного вида течения к другому не имеет выраженных границ, то в пористой среде рассматривают два переходных режима течения: от молекулярного к ламинарному режиму и от ламинарного к турбулентному режиму течения. Каждый режим течения в пористой среде обладает характерными особенностями как по взаимодействию частиц жидкости с поверхностью пор, так и по взаимодействию частиц жидкости друг с другом.

Основной зависимостью, определяющей режим течения жидкости в порах, принято считать связь между скоростью движения жидкости в порах и градиентом давления в пористой среде. Иногда вместо скорости движения жидкости в порах рассматривают скорость фильтрации жидкости.

Молекулярное или кнудсеновское течение газов в пористой среде — это течение настолько разреженного газа, что соударения его молекул между собой крайне редки по сравнению с ударами о стенки пор. Такое течение газов возникает при размерах пор, сравнимых с длиной свободного пробега молекул, поэтому оно возможно при весьма низких давлениях газа и очень малых размерах пор. Молекулярное течение газа при атмосферном давлении возможно в порах, размер которых составляет десятые доли микрона, а в случае разреженных газов — и при более широких порах.

В работе [38] предложена формула для определения скорости фильтрации газа в порах в зависимости от градиента давления, свойств пористой среды и фильтруемого газа при молекулярном течении

$$W_ф = K\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\Pi^2}{S_{уд}\,g\rho}\sqrt{\frac{M}{RT}}\,\frac{P_{вх}-P_{вых}}{l}, \qquad (79)$$

где K — коэффициент, равный $^8/_3$ для упругих соударений молекул и $^{24}/_{13}$ для неупругих соударений молекул; $S_{уд}$ — удельная поверхность пор; M — молекулярный вес газа.

Режим переходного течения от молекулярного к ламинарному течению газа в порах характеризуется соотношением

$$W_ф = c\,\frac{P_{вх}-P_{вых}}{l}, \qquad (80)$$

где c — коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от констант, определяющих режимы молекулярного и ламинарного течений в порах.

Значение коэффициента c по данным работы [55]

$$c = APNd_п^4 + BNd_п^3, \qquad (81)$$

где A и B — постоянные коэффициенты; P — среднее давление фильтруемого газа; N — число пор на единицу поверхности пористого тела.

Течение вязких жидкостей при очень малых градиентах давления обладает рядом особенностей. В порах малого размера жидкости могут значительно изменять свои свойства за счет взаимодействия молекул жидкости с поверхностью. Результатом такого взаимодействия является увеличение вязкости жидкости в граничных пленках на поверхности пор. Если поры малого размера, то они могут быть полностью перекрыты граничными пленками и потребуется начальный градиент давления для возникновения фильтрации жидкости.

В работе [6] для описания закономерностей течения жидкостей в порах малого размера при низких градиентах давления использована теория вязкопластичных жидкостей. Фильтрация вязкопластичных жидкостей в каналах начинается после приложения конечного градиента давления, величина которого зависит от свойств жидкости в пористой среде.

Если градиент давления на пористой среде не превышает начального градиента давления $\left(\frac{P_{вх}-P_{вых}}{l}\right)_0$, то фильтрация жидкости в порах отсутствует.

В соответствии с теорией течения вязкопластичной жидкости рассмотрены три характерных режима течения жидкостей в зависимости от величины приложенного градиента давления.

При увеличении градиента давления выше его начального значения в порах возникает фильтрация жидкости, которая характеризуется уравнением

$$W_ф = \kappa_1 (J - J_0)^2, \qquad (82)$$

где

$J_0 = \left(\frac{P_{вх}-P_{вых}}{l}\right)_0 \frac{1}{g\rho_ж}$ — начальный гидравлический уклон;

$J = \frac{P_{вх}-P_{вых}}{lg\rho_ж}$ — действующий гидравлический уклон;

$\kappa_1 = \frac{\Pi g\rho_ж d_п^2}{4b\mu J_0}$ — коэффициент фильтрации (для идеальной пористой среды $b=4$, для модельных щелей $b=2$).

Квадратичная зависимость скорости движения жидкости от градиента давления характерна для вязкопластичных течений, в которых преобладающее значение имеют силы трения. Зависимость (82) можно использовать при условии, что $J_0 < J \ll 2J_0$.

Рост градиента давления до значений, при которых гидравлический уклон становится равным или больше удвоенного начального гидравлического уклона, т. е. $J \gg J_0$, приводит к течениям, для которых характерна линейная зависимость скорости фильтрации от градиента давления с поправкой на начальный градиент давления.

В этой области течения справедливо соотношение

$$W_ф = \kappa_2 (J - A_1 J_0), \qquad (83)$$

где $\kappa_2 = \dfrac{\Pi g \rho_ж d_п^2}{4 b_1 \mu}$ — коэффициент фильтрации (для идеальной пористой среды $b_1 = 8$, для модельных щелей $b_1 = 3$);

A_1 — постоянный коэффициент (для идеальной пористой среды $A_1 = {}^4/_3$, для модельных щелей $A_1 = {}^3/_2$).

Дальнейшее увеличение градиента давления до значений, при которых величина гидравлического уклона становится значительно больше начального градиента, приводит в область линейной зависимости скорости фильтрации от градиента давления, т. е. в ламинарную область течения жидкости в порах. В переходной области течений, где $J_0 < J \leqslant 2J_0$, связь между скоростью фильтрации и гидравлическим уклоном описывается уравнением

$$W_ф = \kappa_2 \left(J - A_1 J_0 + B \frac{J_0^n}{J^{n-1}} \right). \qquad (84)$$

Постоянные B и n для идеальной пористой среды соответственно равны ${}^1/_3$ и 4, а для модельных щелей — ${}^1/_2$ и 3.

Соотношения (82), (83) и (84) описывают режимы течения жидкостей в порах размером менее нескольких десятков микрон при условии, что вязкость жидкости в пристеночных слоях повышается. Для оценки вязкопластичных свойств жидкости можно, по данным работы [120], использовать комплекс $\tau_0/g\rho_ж$, где τ_0 — напряжение начального сдвига. Если значение комплекса $\tau_0/g\rho_ж < 0{,}5$ см, то такая жидкость называется структурной, если $\tau_0/g\rho_ж = 0{,}5 \div 2{,}0$ см, то это жидкие пасты, если $\tau_0/g\rho_ж = 2{,}0 \div 15{,}0$ см, то это густые жидкости. По данным работы [90], для воды в граничных слоях комплекс может достигать значений, равных 2,0, т. е. воду можно рассматривать как структурную жидкость или как жидкую пасту.

Обобщение данных по фильтрации воды в глинистых грунтах позволило сформулировать условие для определения начальных гидравлических уклонов в виде зависимости

$$J_0 = \frac{A_2}{\kappa_2^{0,5}}, \qquad (85)$$

где A_2 — постоянная, равная $1{,}7 \cdot 10^{-3}$ при условии, что коэффициент фильтрации имеет размерность см/с.

Как следует из формулы (85), при значениях коэффициента фильтрации более 10^{-6} см/с начальный гидравлический уклон становится менее 2, что соответствует начальным градиентам давления, равным $2 \cdot 10^{-3}$ кгс/см³.

Если пористая структура обладает порами больших размеров, то даже при малых градиентах давления в пористой среде наблюдается линейная зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления, т. е. в порах устанавливается ламинарное течение.

Режим ламинарного течения жидкостей и газов в порах характеризуется линейной зависимостью скорости фильтрации от градиента давления в пористой среде. В аналитической форме эта связь выражается уравнением Дарси

$$W_ф = \kappa \frac{P_{вх} - P_{вых}}{\mu l}. \qquad (86)$$

Уравнение (86) можно представить в виде соотношения

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} = \alpha \mu W_ф. \qquad (87)$$

Из уравнений (86) и (87) следует, что вязкостный коэффициент и коэффициент проницаемости пористой среды связаны соотношением

$$\alpha = \frac{1}{\kappa}. \qquad (88)$$

Многочисленными опытами показано, что коэффициент проницаемости не зависит от свойств фильтруемой жидкости и характеризует пропускную способность пористой структуры. На режиме ламинарной фильтрации жидкости или газов в порах коэффициент проницаемости имеет постоянное значение для одной и той же пористой среды. Изменение структуры пористой среды приводит к изменению численного значения коэффициента проницаемости.

Иногда для описания режима ламинарного течения жидкости в порах используют уравнение Гагена-Пуазейля, заменяя реальную пористую среду на идеальную, состоящую из системы круглых гладких каналов одного диаметра. В этом случае связь скорости жидкости в канале пористого тела и градиентом давления описывается уравнением

$$W_п = \frac{\Pi d_п^2 (P_{вх} - P_{вых})}{32 \mu a_{изв}^2 l}. \qquad (89)$$

Из уравнений (86) и (89) видно, что связь между скоростью движения жидкости и градиентом давления зависит от свойств пористой среды таких, как коэффициент проницаемости, размер пор, пористость, коэффициент извилистости пор, причем если в уравнении Дарси все свойства структуры пористого тела учитываются коэффициентом проницаемости, то в уравнении Гагена-Пуазейля через комплекс параметров.

Режим турбулентного движения жидкости в порах характеризуется квадратичной зависимостью градиента давления в по-

ристой среде от скорости движения жидкости в порах или от скорости фильтрации. В аналитической форме эта зависимость выражается уравнением

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} = \beta \rho_{ж} W_{ф}^2. \qquad (90)$$

Развитое турбулентное движение жидкости в порах характеризуется значительным преобладанием потерь давления, вызванных возникновением инерционных сил в жидкости, над силами трения. Поскольку инерционные силы пропорциональны квадрату скорости движения жидкости, то в режиме развитого турбулентного движения инерционный коэффициент должен быть постоянной величиной, полностью определяемой структурой пористого тела.

Сложное строение порового пространства, различия в геометрических размерах проходных сечений пор обусловливают возможность возникновения различных режимов течения в соседних порах при одинаковых градиентах давления. Эта особенность пористой структуры приводит к тому, что переход от ламинарного течения в порах к турбулентному происходит плавно без четко выраженных границ, характерных для течений жидкостей в каналах правильной геометрической формы.

Переходный режим от ламинарного течения к турбулентному характеризуется переменной степенью n в зависимости градиента давления от скорости фильтрации:

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} = c W_{ф}^n, \qquad (91)$$

где c — коэффициент, характеризующий структуру пористого тела и свойства фильтруемой жидкости.

Показатель степени n в уравнении (91) изменяется от 1 до 2 в зависимости от соотношения потерь давления жидкости, вызванных силами вязкого трения и силами, пропорциональными квадрату скорости движения.

Поскольку в уравнении (91) показатель степени — переменная величина, то практическое использование этого уравнения сопряжено с трудностями определения значения показателя степени в зависимости от соотношения сил, действующих в жидкости при фильтрации.

Переходный режим течения жидкости в порах удобнее описывать двучленной зависимостью (45), в которой первое слагаемое правой части уравнения характеризует потери, связанные с силами трения, а второе слагаемое — потери, вызванные силами инерции. Зависимость (45) можно использовать для определения потерь давления при ламинарном и турбулентном режиме течения жидкости в порах, так как при малом значении скорости фильтрации зависимость (45) аналогична зависимости (87),

а при больших значениях скорости фильтрации — зависимости (90).

Использовать зависимости (45), (87) и (90) для определения потерь давления при фильтрации жидкости в пористой среде можно лишь в том случае, когда известны значения вязкостного и инерционного коэффициентов пористого тела. Выше показано, что их значения определяются экспериментально по расходным характеристикам пористой среды.

Для определения потерь давления в режиме ламинарной, турбулентной и переходной от ламинарной к турбулентной фильтрации жидкости в пористой среде обычно используют формулу

$$\frac{P_{вх} - P_{вых}}{l} = \zeta \frac{2\rho W_{п}^2}{d_{п}}, \qquad (92)$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления пористого тела.

Коэффициент ζ зависит от характеристик структуры пористого тела и режима течения жидкости в порах. Его значение определяется экспериментально по результатам проливок или продувок образцов пористого тела.

Зависимость (92) позволяет сравнить потери давления в пористой среде с потерями давления в каналах правильной геометрической формы при одинаковых характерных размерах по значениям коэффициента ζ, поскольку для оценки потерь давления при течении жидкости в каналах правильной геометрической формы применяются зависимости, аналогичные соотношению (92).

2. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Выбор определяющих параметров при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористой среды в критериальном виде представляет определенные трудности. Наибольшие из них возникают при выборе определяющего размера пористой среды. Если при исследовании течения жидкости в трубах и каналах различной формы выбор определяющего размера обычно не вызывает сомнений, то при исследовании течений в пористой среде еще нет установившегося подхода к выбору определяющего размера. Это объясняется сложным строением поровых каналов и разнообразием геометрических характеристик пористых сред.

Анализ работ по исследованию гидравлического сопротивления пористых сред показывает, что в качестве определяющего размера применяются: средний размер частиц, средний размер пор, корень квадратный из коэффициента проницаемости и отношение инерционного коэффициента пористой среды к вязкостному коэффициенту.

В работах [77, 93, 112] за определяющий размер взят размер частиц. Такой выбор определяющего размера удобен для фиктивной пористой среды, поскольку диаметр частиц легко определяется непосредственным измерением их размера. Для пористых насадок, состоящих из сферических частиц разного диаметра в качестве определяющего размера обычно принимают средний диаметр частиц. Использование среднего размера частиц в качестве определяющего параметра для пористых сред, полученных прессованием шихты с последующим спеканием, невозможно, так как размеры пор таких сред зависят от давлений и условий прессования, температуры и времени спекания и т. п.

Пористые металлы, полученные из частиц одинаковых размеров, могут существенно отличаться друг от друга по своим характеристикам. Определяющим размером пористых сред, изготовленных из частиц сферической и произвольной формы с применением прессования и спекания шихты, может служить только размер пор (средний или максимальный). В большинстве выполненных исследований предпочтение отдается среднему размеру пор. Средний размер пор, хотя и не является истинным размером всех пор, однако представляет собой наиболее характерный размер пор пористой среды, и позволяет сравнить гидравлическое сопротивление реальной пористой среды с гидравлическим сопротивлением идеального пористого тела, диаметр капилляров которого равен среднему размеру пор. Такой подход к выбору определяющего размера пористой среды позволяет оценить влияние особенностей структуры пористого тела на его гидравлическое сопротивление.

В ряде работ [47, 109] и др. в качестве определяющего размера принят корень квадратный из коэффициента проницаемости пористого тела. Из формулы (22) видно, что корень квадратный из коэффициента проницаемости является геометрической характеристикой размеров пор и отличается от них только масштабом. Такой выбор определяющего размера позволяет свести значения коэффициента гидравлического сопротивления к критериальным зависимостям, полученным для каналов идеального пористого тела. Увеличение гидравлического сопротивления реальной пористой среды по сравнению с идеальной в этом случае учитывается уменьшением определяющего размера по сравнению с действительным средним размером пор. Поскольку значение коэффициента проницаемости находится всегда по расходным характеристикам, то и сходимость экспериментальных значений коэффициента гидравлического сопротивления пористой среды со значениями коэффициента гидравлического сопротивления идеального пористого тела получается удовлетворительная.

Значение коэффициента проницаемости постоянно лишь на ламинарном режиме течения жидкости в порах. На переходном

и турбулентном режимах течения значение коэффициента проницаемости переменно. Поскольку заранее неизвестны границы режима ламинарной фильтрации, то при экспериментальном определении коэффициента проницаемости необходимо одновременно решать вопрос о предельных числах Рейнольдса, до достижения которых в порах наблюдается ламинарное течение жидкости.

В ряде работ [40, 48, 65, 125] за определяющий размер пористого тела принято отношение инерционного коэффициента к вязкостному. Такой выбор определяющего размера позволяет свести коэффициенты гидравлического сопротивления любой пористой среды к одной критериальной зависимости, так как коэффициенты α и β всегда определяются по расходным характеристикам пористой среды.

Действительно, если принять, как это показано в работах [48, 125], что коэффициент гидравлического сопротивления ζ_L и критерий Рейнольдса Re_L определяются соотношениями:

$$\zeta_L = \frac{(P_{\text{вх}}^2 - P_{\text{вых}}^2)}{\beta R T j^2 l}; \tag{93}$$

$$\mathrm{Re}_L = \frac{\beta j}{\alpha \mu}, \tag{94}$$

то с учетом зависимостей (46) и (87), а также полагая, что плотность жидкости в порах можно определять по среднеарифметическому давлению жидкости, можно показать, что для любой пористой среды на ламинарном режиме течения жидкости в порах будет справедлива критериальная зависимость

$$\zeta_L = \frac{2}{\mathrm{Re}_L}, \tag{95}$$

Если использовать соотношения (90) и (93), то можно показать, что для турбулентного режима течения жидкости в любой пористой среде будет справедлива критериальная зависимость

$$\zeta_L = 2. \tag{96}$$

Таким образом, независимо от типа пористой среды коэффициент ζ_L на ламинарном и турбулентном режиме течения жидкости в порах можно определять соответственно по критериальным зависимостям (95) и (96). Однако практическая ценность выбора отношения инерционного коэффициента к вязкостному в качестве определяющего размера невелика, поскольку значения коэффициентов α и β можно найти лишь по расходным характеристикам пористой среды, причем если значение α находится по расходной характеристике на режиме ламинарной фильтрации, то значение β — на режиме развитого турбулентного течения. Снятие расходной характеристики при развитом турбулентном течении затруднительно, особенно для пористых сред со средним размером пор от 500 мкм и ниже.

Из анализа возможностей выбора определяющего размера пористой среды следует, что наиболее рациональным является средний размер пор. Применение среднего размера пор в качестве определяющего размера позволяет по значениям коэффициента ζ оценить увеличение потерь давления жидкости в реальной пористой среде по сравнению с идеальной за счет извилистости, шероховатости, переменности поперечного сечения пор по размерам и форме и других факторов, а также дает возможность сравнивать пористые среды между собой по гидравлическому сопротивлению при одинаковых режимах течения жидкости в зависимости от особенностей строения порового пространства.

При использовании корня квадратного из коэффициента проницаемости κ или отношения инерционного коэффициента к вязкостному в качестве определяющего размера изменение структуры пористой среды вызывает соответствующие изменения $\sqrt{\kappa}$ или отношения β/α, но не приводит к изменениям значений коэффициента ζ. В этом случае параметрами для сравнения пористых сред по их гидравлическому сопротивлению становятся коэффициенты κ, α и β.

Из всех рассмотренных параметров, которые используются в качестве определяющего размера пористых металлов, средний размер пор — единственный параметр, который можно найти без использования расходных характеристик пористой среды, тогда как коэффициенты κ, α и β определяются лишь по расходным характеристикам пористых образцов.

За определяющую скорость при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористой среды в критериальной форме принимают либо скорость фильтрации жидкости [109, 112], либо скорость движения жидкости в порах [25, 55]. Эти скорости связаны между собой соотношением

$$W_{\Phi} = W_{\text{п}} П. \tag{97}$$

Скорость фильтрации жидкости рассчитывают по полному сечению пористого образца, а скорость жидкости в порах — только по площади пустот в поперечном сечении образца; последняя является средней скоростью движения жидкости в порах. С физической точки зрения скорость жидкости в порах точнее отражает процессы, происходящие при движении жидкости в порах, что позволяет с большим основанием принимать ее за определяющую скорость движения жидкости при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористой среды в критериальной форме.

Физические константы фильтруемой жидкости зависят от давления и температуры. Обычно при обработке экспериментальных данных в критериальной форме за определяющее давление и определяющую температуру принимают их среднее арифметическое значение от значений этих параметров на входе и выходе пористой среды. Средние значения давления и температуры необходимы для определения вязкости и плотности фильтруемой жидкости.

В дальнейшем во всех критериальных зависимостях в качестве определяющих параметров использованы: средний размер пор, скорость движения жидкости в порах, среднеарифметические давление и температуру жидкости.

3. ВИДЫ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ПОРИСТЫХ СРЕД

Неоднозначность в выборе определяющих параметров пористой среды приводит к различным видам критериев Рейнольдса, коэффициентов гидравлического сопротивления и критериальных зависимостей, используемых для обработки опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористых сред.

При использовании в качестве определяющих параметров среднего размера частиц насадки и скорости фильтрации жидкости выражения для коэффициента ζ и критерия Re записываются в виде

$$\zeta = \frac{(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})\, d_{\text{ч ср}}}{2\rho W_{\Phi}^2\, l}; \tag{98}$$

$$\text{Re} = \frac{W_{\Phi} d_{\text{ч ср}} \rho}{\mu}. \tag{99}$$

При исследовании гидравлического сопротивления каналов правильной геометрической формы пользуются иным выражением для коэффициента гидравлического сопротивления, а именно

$$\zeta = \frac{2\,(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})\, d}{\rho W^2 l}. \tag{100}$$

Значение ζ, вычисленное по формуле (100), отличается от значения ζ, рассчитанного по формуле (98), на постоянный множитель, равный 4. Поскольку большинство исследователей используют для определения коэффициента ζ пористой среды зависимость (98), то целесообразно использовать это соотношение и при дальнейшем изучении гидравлического сопротивления пористых сред, несмотря на то, что в трубной гидравлике всегда используется зависимость (100).

В результате обработки опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористых сред с использованием зависимостей (98) и (99) получают критериальные зависимости

$$\zeta = \frac{c}{\text{Re}}; \tag{101}$$

$$\zeta = \frac{a}{\text{Re}} + \frac{b}{\text{Re}^n}, \tag{102}$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты; n — показатель степени, всегда $n < 1$.

Критериальная зависимость (101) справедлива для ламинарного режима течения жидкости в порах, а критериальная зависимость (102) описывает связь между числом Рейнольдса и коэффициентом ζ на режиме переходной и турбулентной фильтрации жидкости в порах. Области применения зависимостей (101) и (102) определяются критическим числом Рейнольдса, который обычно находится из условия, что средние экспериментальные значения коэффициента ζ превышают на 5% расчетные значения ζ, полученные по формуле (101).

Постоянные коэффициенты a, b, c и показатель степени n в критериальных зависимостях (101) и (102) находят экспериментально, они зависят от характеристик структуры пористой среды.

Аналогичные по форме, но отличные по значениям постоянных коэффициентов, критериальные зависимости получают при использовании в качестве определяющих параметров среднего размера пор и скорости движения жидкости в порах. В этом случае критерий Рейнольдса и коэффициент ζ определяют по формулам

$$\zeta_d = \frac{(P_{вх} - P_{вых})\, d_{п\,ср}}{2\rho W_п^2 l}; \qquad (103)$$

$$\mathrm{Re}_d = \frac{W_п d_{п\,ср}\rho}{\mu}. \qquad (104)$$

Такую форму записи критерия Рейнольдса и коэффициента гидравлического сопротивления используют в трубной гидравлике, она удобна для сравнения коэффициента гидравлического сопротивления пористой среды с коэффициентом гидравлического сопротивления гладких труб или идеального пористого тела при одинаковых числах Рейнольдса. Форма записи критерия Re и коэффициента ζ в виде соотношений (103) и (104) удобна и с точки зрения выбора значений определяющих параметров, поскольку средний размер пор и пористость являются самыми распространенными характеристиками структуры пористой среды и почти всегда находятся экспериментально перед проведением гидравлических испытаний.

Переход от критериальных зависимостей (101) и (102) к аналогичным зависимостям, выраженным через критерии, записанные по формулам (103) и (104), для насадок и пористых металлов, изготовленных спеканием свободных насыпок сферических частиц, можно производить с помощью формул (24) и (97). При этом в критериальных зависимостях (101) и (102) будут изменяться лишь значения постоянных коэффициентов.

В ряде исследований при обработке экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению пористых сред использованы в качестве определяющих параметров корень квадратный из коэффициента проницаемости и скорость фильтрации

жидкости. Коэффициент гидравлического сопротивления и критерий Рейнольдса в этом случае записываются в виде соотношений:

$$\zeta_{\sqrt{к}} = \frac{2\,(P_{вх} - P_{вых})\sqrt{32\kappa}\,П\sqrt{П}}{\rho W_ф^2 l}; \qquad (105)$$

$$\mathrm{Re}_{\sqrt{к}} = \frac{W_ф\sqrt{32\kappa}\rho}{П\sqrt{П}\mu}. \qquad (106)$$

Использование корня квадратного из коэффициента проницаемости в качестве определяющего размера позволяет свести все экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению пористых сред на ламинарном режиме течения жидкости в порах к одной критериальной зависимости, справедливой для круглых труб:

$$\zeta_{\sqrt{к}} = \frac{64}{\mathrm{Re}_{\sqrt{к}}}. \qquad (107)$$

Влияние свойств пористых тел на их гидравлические характеристики в этом случае проявляется только через значение коэффициента проницаемости.

Если использовать формулу (22) для среднего размера пор, полученную в результате совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля, а также связь между скоростью фильтрации и средней скоростью движения жидкости в порах, то можно получить соотношения:

$$\zeta_d = \frac{\sqrt{a_{изв}}}{4}\zeta_{\sqrt{к}}; \qquad (108)$$

$$\mathrm{Re}_d = \sqrt{a_{изв}}\,\mathrm{Re}_{\sqrt{к}}. \qquad (109)$$

Подставив соотношения (108) и (109) в формулу (107), можно получить критериальную зависимость для ламинарного режима течения жидкости в порах, выраженную через критерии Re_d, ζ_d и коэффициент извилистости пор, в виде соотношения

$$\zeta_d = \frac{16 a_{изв}}{\mathrm{Re}_d}. \qquad (110)$$

Критериальная зависимость (110) удобна тем, что показывает природу увеличения гидравлического сопротивления реальной пористой среды по сравнению с гидравлическим сопротивлением идеального пористого тела на ламинарном режиме течения жидкости. Как следует из формулы (110), прирост гидравлического сопротивления пористой среды обусловлен увеличением длины пути жидкости в порах вследствие извилистости пор.

Использование в качестве определяющего размера корня квадратного из коэффициента проницаемости пористой среды не дает никаких преимуществ. Кроме того, на переходном и

турбулентных режимах фильтрации жидкости в порах коэффициент проницаемости становится переменной величиной при изменении скорости движения жидкости в порах, что создает дополнительные трудности при выборе значения определяющего размера.

В ряде исследований [40, 48, 65, 125] для обработки экспериментальных данных по гидравлическому сопротивлению пористых сред в критериальной форме используются в качестве определяющих параметров отношение инерционного коэффициента пористой среды к вязкостному и скорость фильтрации жидкости. Коэффициент гидравлического сопротивления и критерий Рейнольдса определяют по формулам (93) и (94). Такой выбор определяющего размера позволяет для всех пористых сред при любом значении чисел Рейнольдса использовать одну критериальную зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\zeta_L = \frac{2}{\mathrm{Re}_L} + 2. \qquad (111)$$

Поскольку значения α и β всегда находят по результатам гидравлических проливок пористых сред, то согласование экспериментальных значений коэффициента ζ с зависимостью (111) определяется лишь точностью расчета и точностью эксперимента. Если значения коэффициентов α и β можно было бы рассчитать теоретически или определить без проведения гидравлических испытаний, то преимущества критериальной зависимости (111) были бы бесспорны. Однако учитывая сложную структуру пористых тел и большое число факторов, влияющих на характер течения жидкости в порах, теоретическое определение значений α и β невозможно, поэтому и практическая ценность критериальной зависимости (111) невелика.

Совместное решение критериальных зависимостей (95) и (101) позволяет найти аналитическую связь вязкостного коэффициента со свойствами пористой среды. Для этого достаточно выразить из указанных критериальных зависимостей потери давления при фильтрации одного и того же удельного расхода жидкости и приравнять их друг другу. В результате получится соотношение для вязкостного коэффициента пористой среды

$$\alpha = \frac{2c}{\Pi d^2_{\text{п ср}}}. \qquad (112)$$

Совместное решение критериальных зависимостей (96) и (102) при условии, что $n \to 0$, а число Re на трубулентном режиме фильтрации достаточно большое, дает возможность установить зависимость инерционного коэффициента от свойств пористой среды

$$\beta = \frac{2b}{\Pi^2 d_{\text{п ср}}}. \qquad (113)$$

Как следует из формул (112) и (113), для расчета значений коэффициентов α и β необходимы постоянные коэффициенты c и b, входящие в критериальные зависимости (95) и (96) и определяемые экспериментально для каждого вида пористых металлов по результатам гидравлических испытаний образцов пористых сред.

Сравнительная оценка наиболее распространенных видов критериальных зависимостей, применяемых при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористых сред, показывает, что самыми рациональными являются критериальные зависимости, полученные при использовании в качестве определяющих параметров среднего размера пор и скорости фильтрации жидкости в порах. Этот вид критериальных зависимостей позволяет оценить, путем сравнения значений коэффициента гидравлического сопротивления при одинаковых числах Рейнольдса, увеличение гидравлического сопротивления пористой среды по сравнению с гидравлическим сопротивлением идеального пористого тела, а также дает возможность без проведения гидравлических испытаний приближенно рассчитать гидравлическое сопротивление пористой среды, если известны особенности ее структуры.

Глава IV

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

1. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Первые исследования гидравлического сопротивления пористых металлов проводили на насадках сферических частиц одного или разного диаметра. В работе [112] на основе обобщения большого числа экспериментальных данных ряда исследований установлено, что значения коэффициента гидравлического сопротивления насадки сферических частиц в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,11 до 11,0 согласуются с критериальной зависимостью

$$\zeta_d = \frac{40{,}7}{\mathrm{Re}_d}. \qquad (114)$$

При этом размер частиц изменялся в широких пределах 250—30 000 мкм, а пористость насадки равнялась 0,40. При дальнейшем увеличении чисел Re от 11 до 10^4 экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления насадки сферических частиц согласуются с критериальной зависимостью

$$\zeta_d = \frac{35{,}6}{\mathrm{Re}_d} + \frac{0{,}816}{\mathrm{Re}_d^{0{,}08}}. \qquad (115)$$

Опытные данные, использованные для вывода зависимостей (114) и (115), получены при фильтрации в порах жидкостей и газов в широком диапазоне изменения вязкости от 0,005 (газ) до 0,5 Пз (нефть). С критериальной зависимостью (115) несколько не согласуются данные Фернеса, полученные для насадок мелкой дроби. В области чисел Re=11÷900 опытные значения коэффициента гидравлического сопротивления лежат выше критериальной зависимости (115).

Обобщение большого числа экспериментальных данных показало, кто коэффициент ζ_d не зависит от размеров сферических частиц при условии, что форма и состояние поверхности частиц неизменны.

Дальнейшие экспериментальные исследования, выполненные авторами работ [37, 46, 75, 76], подтвердили правомерность зависимостей (114) и (115), хотя в каждой из указанных работ получены свои числовые коэффициенты в критериальных зависимостях.

Однако не все результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления насадок сферических частиц согласуются с зависимостями (114) и (115). Так, в работе [77] исследовано гидравлическое сопротивление насадки стальных шаров диаметром 3200—7000 мкм при фильтрации воздуха и показано, что ламинарный режим течения в порах сохраняется до значений Re~180. Для определения коэффициента гидравлического сопротивления в диапазоне чисел Re=78÷180 получена критериальная зависимость

$$\zeta_d = \frac{154}{\mathrm{Re}_d}. \qquad (116)$$

При дальнейшем увеличении чисел Re от 180 до 3300 для расчета коэффициента гидравлического сопротивления получена критериальная зависимость

$$\zeta_d = \frac{3{,}25}{\mathrm{Re}_d^{0{,}25}}. \qquad (117)$$

Необходимо отметить, что экспериментальные значения ζ_d насадки стальных шаров [77], полученные для подтверждения критериальной зависимости (116), соответствуют весьма узкому диапазону изменения чисел Re, что дает основания сомневаться в ее правомерности. Дальнейшие исследования в этой области не подтвердили критериальную зависимость (116) и лишь данные работы [93], кстати также полученные в весьма узком диапазоне изменения чисел Re, удовлетворительно согласуются с критериальной зависимостью (116).

Если размер частиц насадки не оказывает заметного влияния на значения коэффициента ζ_d, то, как показывают опыты, форма частиц и состояние их поверхности существенно влияют на гидравлическое сопротивление пористых насадок.

В работе [4] приведены результаты исследования гидравлического сопротивления насадки полированных стальных шаров диаметрами 2000, 4000 и 6000 мкм при фильтрации воздуха. Экспериментально показано, что при Re<39,0 справедлива критериальная зависимость

$$\zeta_d = \frac{24{,}5}{\mathrm{Re}_d}, \qquad (118)$$

а при Re_d=78÷7800

$$\zeta_d = \frac{1{,}19}{\mathrm{Re}_d^{0{,}25}}. \qquad (119)$$

В области чисел Рейнольдса от 39 до 78 критериальной зависимости для расчета коэффициента гидравлического сопротивления не предложено, а для области чисел Рейнольдса выше 7800 авторы без экспериментальной проверки предлагают считать, что ζ_d=0,126.

Значительное уменьшение значений коэффициента гидравлического сопротивления насадки на ламинарном режиме течения можно объяснить строго сферической формой частиц насадки и состоянием их поверхности. В этой же работе показано, что для расчета гидравлического сопротивления насадки стеклянных и полихлорвиниловых шаров следует использовать формулу

$$\zeta_d = \xi_{d\,сф}\,\varphi_ф, \qquad (120)$$

где $\zeta_{d\,сф}$ — коэффициент гидравлического сопротивления насадки стальных шаров, рассчитанный по формулам (118) или (119); $\varphi_ф$ — коэффициент формы.

Для насадки стеклянных и полихлорвиниловых шаров коэффициент формы равен 1,5, поэтому критериальная зависимость (118) может быть записана в виде

$$\zeta_d = \frac{38}{\mathrm{Re}_d}. \qquad (121)$$

Значения коэффициентов ζ_d, рассчитанные по формулам (114) и (121), практически совпадают, поскольку погрешность расчета не превышает точности получения экспериментальных данных.

Искажение формы частиц приводит к росту гидравлического сопротивления насадок и соответственно к росту числовых значений коэффициентов в критериальных зависимостях.

Так, в работе [71] исследовано гидравлическое сопротивление насыпок речного и морского песка со средним размером частиц от 650 до 5500 мкм при фильтрации воды в порах. Опыты проведены в диапазоне $\mathrm{Re}=0{,}11\div1000$. Обработка опытных данных показала, что для $\mathrm{Re}=0{,}11\div14{,}0$ опытные значения коэффициентов гидравлического сопротивления совпадают с критериальной зависимостью

$$\zeta_d = \frac{56}{\mathrm{Re}_d}. \qquad (122)$$

В диапазоне $\mathrm{Re}=14\div240$ получена критериальная зависимость

$$\zeta_d = \frac{15{,}5}{\mathrm{Re}_d^{0,5}}, \qquad (123)$$

а при $\mathrm{Re}=240\div1000$

$$\zeta_d = \frac{3{,}82}{\mathrm{Re}_d^{0,25}}. \qquad (124)$$

Результаты известных автору работ по исследованию гидравлического сопротивления насадок из сферических частиц сопоставлены на рис. 33, а основные характеристики насадок, условия проведения опытов и результаты эксперимента приведены в табл. 11. При сопоставлении опытных данных все критериальные зависимости пересчитаны на определяющие параметры: средний размер пор и скорость движения жидкости в порах с использованием формул (24) и (97). В тех случаях, когда пористость насадок изменялась в некотором интервале, за расчетную принимали пористость 0,4. Если пересчет зависимостей требовал использования значения коэффициента извилистости пор, то его принимали равным 1,5.

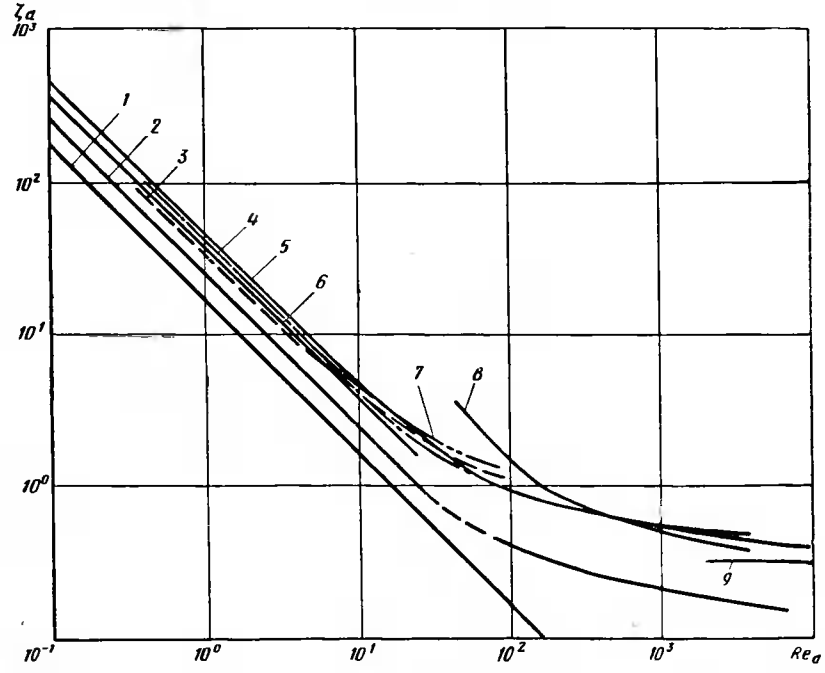


Рис. 33. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления насадок и пористых металлов из сферических частиц от Re_d:

1 — зависимость Гагена-Пуазейля для гладких труб; *2*—по данным работы [4]; *3*—по данным работы [46]; *4* — по данным работы [55]; *5* — по данным работы [112]; *6* — по данным работ [37, 56]; *7* — по данным работы [75]; *8* — по данным работ [77, 93]; *9* — по данным работы [37]

Анализ опытных данных по гидравлическому сопротивлению насадок из сферических частиц показывает, что на ламинарном режиме фильтрации жидкости или газа в порах критериальная зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления имеет вид (101). Опытные данные большинства исследований удовлетворительно согласуются с зависимостью (101) при $c=34\div44$. Значительно отличаются от общих данных результаты работы [4], выполненной на насадках из стальных шаров, предназначенных для шарикоподшипников. Уменьшение гидросопротивления таких насадок можно объяснить лишь

Таблица 11

Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению насадок и пористых металлов из сферических частиц

Источник	Исследованная среда	Пористость	Размер частиц, мкм	Критернальная зависимость	Диапазон исследованных чисел Re_d	Фильтруемая среда	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8
[112]	Насадок сферических частиц	0,40	250—30000	$\zeta_d = \frac{40,7}{Re_d}$ $\zeta_d = \frac{35,6}{Re_d} + \frac{0,816}{Re_d^{0,08}}$	0,11—11,0 11,0—10^4	Газ Нефть	В работе обобщено большое число данных других авторов
[77]	Насадок стальных шаров	0,40	3200—7000	$\zeta_d = \frac{154}{Re_d}$ $\zeta_d = \frac{3,25}{Re_d^{0,25}}$	78—180 180—3300	Воздух	—
[71]	Насыпки речного и морского песка	0,352—0,395	650—5500	$\zeta_d = \frac{56}{Re_d}$ $\zeta_d = \frac{15,5}{Re_d^{0,5}}$ $\zeta_d = \frac{3,82}{Re_d^{0,25}}$	0,11—14,0 14,0—240 240—1000	Вода	—
[46]	Насадок стекляниых шаров	0,40	2000—11500	$\zeta_d = \frac{34}{Re_d}$	0,4—4,0		—
				$\zeta_d = \frac{27,8}{Re_d} + 0,8$	4,0—80		
[75]	Насадок стальных шаров	0,446	1664	$\zeta_d = \frac{40,8}{Re_d}$ $\zeta_d = \frac{43,8}{Re_d} + 0,770$	До 6,3 6,3—80	Газ, жидкость	В работе обобщены данные других авторов
[4]		0,40	2000 4000 6000	$\zeta_d = \frac{24,5}{Re_d}$ $\zeta_a = \frac{1,19}{Re_d^{0,25}}$ $\zeta_d = 0,126$	0,1—39,0 78—7800 7800	Газ	ζ_d=0,126 экспериментально не проверено Для насадок стеклянных и полихлорвиниловых шаров получено $\zeta_d = \frac{38}{Re_d}$
[93]		0,39—0,40	7920 11720	$\zeta_d = \frac{148}{Re_d} + 0,32$ $\zeta_d = \frac{91}{Re_d} + 0,462$	44,4—392 392—690	Воздух	—
[1]	Насадок дроби	0,34	1550	$\zeta_d = \frac{36}{Re_d}$	0,0003—30	Азот, керосин	—

Продолжение табл. 11

Источник	Исследованная среда	Пористость	Размер частиц, мкм	Критериальная зависимость	Диапазон исследованных чисел Re_d	Фильтруемая среда	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
[76]	Насадок стальной и свинцовой дроби	0,36—0,42	2320—3550	$\zeta_d = \frac{33{,}3}{Re_d} + 0{,}55$	До 850		—
[37]	Насадок стальных и резиновых шаров	0,28—0,47	17 000 30 000	$\zeta_d = \frac{36}{Re_d}$ $\zeta_d = 0{,}309$	0,2—4,0 2000—20000	Вода	—
[55]	Пористая бронза	0,35—0,408	90—133 270—420	$\zeta_d = \frac{38}{Re_d}$ $\zeta_d = \frac{29}{Re_d} + \frac{1{,}25}{Re_d^{0{,}15}}$ $\zeta_d = \frac{1{,}56}{Re_d^{0{,}15}}$	0,001—10,0 10,0—250 250—5000	Воздух	—
[56]	Пористые никель, железо, бронза и нержавеющая сталь	0,25—0,52	80—500	$\zeta_d = \frac{36}{Re_d}$	До 1,1	Воздух, азот, дизельное топливо	—

состоянием поверхности и строго сферической формой частиц, поскольку в этих же исследованиях для насадки стеклянных и полихлорвиниловых шаров получено значение $c=38$. Авторы многих работ отмечают, что коэффициент c зависит в значительной мере от формы частиц насадки. Отклонение формы частиц от сферической всегда приводит к увеличению коэффициента c, что подтверждается экспериментальными данными работы [71], где для насадок песка получено $c=56$.

Отличительной особенностью всех экспериментальных зависимостей коэффициента ζ_d от числа Re является наличие плавного перехода от ламинарного режима течения к турбулентному. В области переходных течений жидкости в насадках экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления ζ_d не всегда согласуются, что объясняется различиями в свойствах насадок и в условиях проведения опытов.

Область развитого турбулентного режима течения в насадках практически не исследована из-за технических трудностей, возникающих при достижении больших чисел Re в порах (необходимы большие градиенты давления по высоте насадки).

В табл. 11 и на рис. 33 приведены для сравнения экспериментальные данные по коэффициентам ζ_d пористых металлов, изготовленных из сферических частиц. Так, в работе [55] исследованием гидравлического сопротивления образцов пористой бронзы при фильтрации воздуха в порах установлено, что ламинарный режим течения в порах сохраняется до $\mathrm{Re}=10$, при этом экспериментальные значения коэффициента ζ_d согласуются с критериальной зависимостью (101) при $c=38$. Для переходной области течения, при $\mathrm{Re}_d=10\div250$, получена критериальная зависимость

$$\zeta_d=\frac{29}{\mathrm{Re}_d}+\frac{1{,}25}{\mathrm{Re}_d^{0{,}15}}. \qquad (125)$$

Для развитого турбулентного течения в диапазоне чисел $\mathrm{Re}=250\div5000$ экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления согласуются с критериальной зависимостью

$$\zeta_d=\frac{1{,}56}{\mathrm{Re}_d^{0{,}15}}. \qquad (126)$$

В работе [56] при исследовании гидравлического сопротивления образцов пористых металлов, изготовленных из сферических частиц никеля, железа, бронзы и нержавеющей стали, установлено, что при ламинарном течении жидкости в порах опытные значения коэффициента ζ_d согласуются с критериальной зависимостью (101) при $c=36$.

Кроме исследований, описанных в работах [55, 56], известны и другие опыты по изучению гидравлического сопротивления пористых металлов, изготовленных из сферических частиц.

Однако результаты опытов работ [42, 127] и др. не обработаны в критериальной форме и поэтому их нельзя сопоставлять. Попытки обработать экспериментальные данные указанных работ в критериальной форме не дали положительных результатов из-за отсутствия значений среднего размера пор исследованных образцов.

Сопоставление критериальных зависимостей, полученных для пористых металлов, изготовленных из сферических частиц, с критериальными зависимостями, полученными для насадок сферических частиц, показывает их удовлетворительную сходимость.

При дальнейшем исследовании гидравлического сопротивления пористых металлов, изготовленных из сферических частиц, основное внимание уделено расширению диапазона изменения чисел Рейнольдса, изучению влияния пористости, размеров пор, размеров частиц и толщины пористых образцов, а также изменений давления, температур и свойств фильтруемой среды на гидравлическое сопротивление пористых металлов.

Экспериментальные исследования проведены на образцах пористых металлов, характеристики которых приведены в табл. 12. Опыты проведены при фильтрации в порах воздуха,

Таблица 12

Характеристика пористых металлов, изготовленных из сферических частиц

Материал частиц	Размер частиц, мкм	Давление прессования, тс/см²	Температура спекания, °С	Время спекания, ч	Пористость	Средний размер пор, мкм	Толщина образцов, мм
Бронза	100—125 125—160 400—500 500—600	Свободная засыпка	850—870	0,6	0,334—0,424	43 55 180 200	2—40
Сталь 50ХГ	35—63	2,38—3,69	1300—1320	1; 2; 3; 4;	0,180—0,320	7,4—15,7	2—8

азота, гелия и дистиллированной воды. Результаты опытов, обработанные в критериальной форме с помощью формул (103) и (104), приведены на рис. 34. Анализ экспериментальных данных показывает, что значения коэффициента ζ_d зависят от режима течения жидкости в порах и пористости металла. Изменение пористости металла влияет на коэффициент ζ_d в переходной и турбулентной областях течения жидкости в порах, причем уменьшение пористости сопровождается ростом значений коэффициента ζ_d. Влияние пористости на коэффициент ζ_d можно объяснить усложнением структуры каналов пористых сред при

уменьшении их пористости. Действительно, уменьшение пористости сопровождается уменьшением размера пор, а следовательно, и увеличением относительной шероховатости поверхности пор. Кроме того, при уменьшении пористости увеличиваются отношения площадей сечений, характеризующих места внезап-

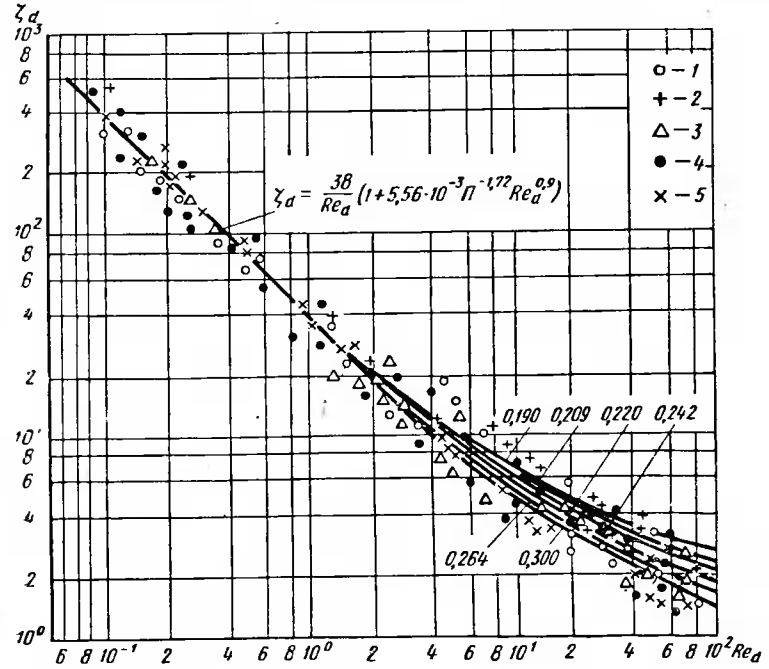


Рис. 34. Экспериментальная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления пористой стали 50ХГ, изготовленной из сферических частиц, от числа Рейнольдса:
1 — П=0,19; 2 — П=0,20; 3 — П=0,22; 4 — П=0,25; 5 — П=0,30

ных расширений и сужений поровых каналов. Такое изменение структуры порового пространства должно приводить к увеличению влияния инерционной составляющей потерь давления при фильтрации жидкости в порах по сравнению с составляющей потерь давления на трение. Опытные данные показывают, что уменьшение пористости сопровождается срывом ламинарного режима течения жидкости в порах при меньших числах Рейнольдса и увеличением значения коэффициента ζ_d пористых металлов в переходной и турбулентной областях течений жидкости в порах. Изменение размеров пор, размеров частиц, толщины пористых металлов и свойств фильтруемой жидкости не влияет на значения коэффициента ζ_d при одинаковых числах Re.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления пористых металлов, изготовленных из сферических частиц, можно использовать критериальную зависимость

$$\zeta_d = \frac{38}{\mathrm{Re}_d}\left(1 + 5{,}56\cdot 10^{-3} П^{-1{,}72}\,\mathrm{Re}_d^{0{,}9}\right). \qquad (127)$$

Зависимость (127) экспериментально проверена в диапазоне $\mathrm{Re}=0{,}085\div 2300$ при изменении пористости металлов от 0,180 до 0,424. Максимальный разброс экспериментальных значений коэффициента ζ_d относительно расчетных значений, полученных по формуле (127), не превышал ± 10—12%. В области малых значений чисел Re значения коэффициента ζ_d, рассчитанные по формулам (114), (121) и (127), практически совпадают друг с другом, что еще раз говорит о том, что гидравлическое сопротивление пористых металлов, изготовленных из сферических частиц, и гидравлическое сопротивление пористых насадок сферических частиц одинаковы при ламинарном течении жидкости в порах. В переходной и турбулентной областях течений значения коэффициентов ζ_d пористых металлов и насадок практически совпадают, если их пористость равна 0,4. Уменьшение пористости металлов сопровождается ростом коэффициента ζ_d

2. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЧАСТИЦ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Так как гидравлическое сопротивление пористых металлов, изготовленных из частиц произвольной формы, с обработкой опытных данных в критериальной форме в известных автору исследованиях не рассмотрено, то целесообразно влияние формы частиц насадок на их гидравлическое сопротивление проследить по результатам опытов с насадками неметаллических материалов.

Результаты опытов и обобщение большого числа опытных данных других исследователей, приведенные в работе [112], показали, что коэффициент ζ_d насадок из несферических частиц всегда больше коэффициента ζ_d насадок из сферических частиц. Значение коэффициента ζ_d для насадок из несферических частиц предложено определять по формуле (120), используя для этого экспериментальные значения коэффициента формы, приведенные ниже:

Материал насадки	Дробленый камень	Бурый уголь	Песок	Кварц	Чешуйки грунта
Коэффициент формы	0,98	1,53	1,5—1,7	3,54	5,0

Аналогичный подход к учету влияния формы частиц на гидросопротивление насадки использован и в работе [4], где получены экспериментальные значения коэффициента формы (табл. 13).

Таблица 13

Значения коэффициента формы некоторых материалов

Материал частиц	Размер частиц, мкм	Коэффициент формы	Материал частиц	Размер частиц, мкм	Коэффициент формы
Органическое стекло	2000	1,15	Морской песок	1000	4,15
				556	4,76
Дробь свинцовая	1350	1,2		374	1,9
Уголь	1500	2,0	Силикагель	296	5,5
				180	6,3
Песок	290	1,21	Алюмосиликагель	2500	5,46
	247	1,07		3500	3,70
	940	1,04		4500	7,05
	710	1,26		250	3,05
	418	3,65		400	1,79
	589	1,05		150	4,10
	270	1,2			

Иной подход к оценке гидравлического сопротивления насадок несферических частиц использован в работе [55], где исследованием сопротивления насадок частиц силикагеля, активированного угля и глинозема установлено, что в диапазоне $\mathrm{Re}=4\div 400$ коэффициент гидравлического сопротивления можно определять по критериальной зависимости

$$\zeta_d = \frac{41}{\mathrm{Re}_d} + \frac{1{,}92}{\mathrm{Re}_d^{0{,}11}}. \qquad (128)$$

Экспериментальные данные по исследованию гидравлического сопротивления насадок частиц произвольной формы, полученные в работах [46, 55, 64, 109], показывают, что коэффициент ζ_d насадки зависит от формы частиц и всегда больше коэффициента ζ_d насадки сферических частиц.

Гидравлическое сопротивление пористых металлов исследовано при фильтрации в порах воздуха, азота и гелия. Для опытов использовали образцы пористых металлов, характеристики которых приведены в табл. 14.

Влияние формы частиц на гидравлическое сопротивление пористых металлов удобнее всего проследить по результатам опытов с образцами пористой стали 50ХГ, которые изготовлены из шихты с различным процентным содержанием по весу частиц сферической и несферической формы. Для стали 50ХГ, изготовленной из 80% сферических частиц и 20% несферических частиц, критериальная зависимость для определения коэффициента ζ_d при изменении пористости металла от 0,18 до 0,32 и $\mathrm{Re}=0{,}14\div 260$ имеет вид

$$\zeta_d = \frac{43}{\mathrm{Re}_d}\left(1 + 3{,}8\cdot 10^{-3}\,\mathrm{Re}_d^{0{,}95} П^{-1{,}72}\right). \qquad (129)$$

Таблица 14

Характеристики пористых металлов, изготовленных из несферических частиц

Материал частиц	Форма частиц	Размер частиц, мкм	Давление прессования, тс/см²	Температура спекания, °С	Время спекания, ч	Пористость	Средний размер пор, мкм	Толщина образцов, мм
Сталь 50ХГ	80% сферическая + 20% несферическая	100—200	2,10—3,54	—	—	—	12,1—33,2	—
	20% сферическая + 80% несферическая	200—315	2,10—3,54	1300—1320	1; 2; 3; 4	0,18—0,32	15,4—44,7	2—20
	10% сферическая + 90% несферическая	315—500	2,04—3,07	—	—	—	24,4—77,5	—
	Лепестковая	200—315 315—500	—	1300—1320	2	0,18—0,32	8,32—26,2 13,2—41,6	2—10
Железо	Тарельчатая	150—250	—	1050—1150	2	0,27—0,49	14,6—48,0	1,5—6,0
Нихром	Округлая	200—315 315—500	1,5—4,7	1300—1320	2	0,22—0,34	106—321	2—5
Нержавеющая сталь	70% сферическая + 30% несферическая	200—315	2,55—3,90	1300—1320	2	0,28—0,34	59,2—74,5	2—6

Для стали 50ХГ, изготовленной из 20% сферических и 80% несферических частиц, критериальная зависимость для определения коэффициента ζ_d при изменении пористости металла от 0,18 до 0,32 и $Re = 0{,}1 \div 310$ имеет вид

$$\zeta_d = \frac{50}{Re_d}(1 + 4{,}9 \cdot 10^{-3} Re_d^{0{,}9} \Pi^{-1{,}9}). \qquad (130)$$

Для стали 50ХГ, изготовленной из 10% сферических частиц и 90% частиц произвольной формы, аналогичная критериальная зависимость при изменении пористости от 0,18 до 0,32 и $Re = 0{,}12 \div 470$ имеет вид

$$\zeta_d = \frac{77}{Re_d}(1 + 5{,}5 \cdot 10^{-3} Re_d^{0{,}9} \Pi^{-1{,}9}). \qquad (131)$$

Сопоставление критериальных зависимостей (127) и (129)—(131) показывает, что переход от сферической формы частиц к частицам произвольной формы сопровождается увеличением гидравлического сопротивления пористых металлов.

Результаты, полученные при исследовании гидравлического сопротивления стали 50ХГ, подтверждаются опытными данными по определению гидравлического сопротивления пористого нихрома и нержавеющей стали.

Для пористого нихрома, изготовленного из частиц округлой формы, и пористой нержавеющей стали, изготовленной из смеси сферических и несферических частиц, получена по результатам опытов критериальная зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в виде соотношения

$$\zeta_d = \frac{52}{Re_d}(1 + 4{,}43 \cdot 10^{-3} Re_d^{0{,}9} \Pi^{-1{,}9}). \qquad (132)$$

Зависимость (132) экспериментально проверена при изменении пористости металлов от 0,22 до 0,34 и $Re = 0{,}84 \div 100$.

Переход от пористых металлов, изготовленных из частиц округлой или близкой к сферической формы, к металлам, полученным с использованием частиц тарельчатой или лепестковой формы, сопровождается дальнейшим увеличением значений коэффициентов ζ_d.

Так, по данным работы [25], для расчета коэффициента гидравлического сопротивления пористого железа, изготовленного из частиц тарельчатой формы, можно рекомендовать критериальную зависимость

$$\zeta_d = \frac{104}{Re_d}(1 + 1{,}79 \cdot 10^{-2} Re_d^{0{,}9} \Pi^{-1{,}9}). \qquad (133)$$

при изменении пористости от 0,27 до 0,49 и $Re = 0{,}12 \div 200$.

Для стали 50ХГ, изготовленной из частиц лепестковой формы, критериальная зависимость для определения коэффициента

гидравлического сопротивления при изменении пористости от 0,18 до 0,32 и $Re = 0{,}08 \div 160$ имеет вид

$$\zeta_d = \frac{125}{Re_d}(1 + 1{,}42 \cdot 10^{-2} Re_d^{0,9} \Pi^{-1,9}). \qquad (134)$$

Сравнение значений коэффициентов ζ_d пористых металлов показывает, что с усложнением формы частиц увеличивается гидравлическое сопротивление пористых металлов как на режиме ламинарной, так и на режиме переходной фильтрации жидкостей в порах. Связь между формой частиц, использованных при изготовлении, и гидравлическим сопротивлением пористых металлов может нарушиться, если процесс спекания сопровождается коагуляцией частиц и изменением их формы. Однако во всех случаях уменьшение высоты и числа неровностей на поверхности пор, а также приближение формы поверхности пор к сферической сопровождается уменьшением гидравлического сопротивления пористых металлов, независимо от того, на каком этапе технологического процесса изготовления пористых металлов происходят эти явления. Наименьшим гидравлическим сопротивлением обладают металлы, полученные из частиц сферической формы.

Влияние размеров пор, размеров частиц, толщины пористых образцов, их пористости и свойств фильтруемой жидкости на значения коэффициентов ζ_d металлов, изготовленных из частиц произвольной формы, аналогично рассмотренному выше при анализе гидравлического сопротивления металлов, изготовленных из частиц сферической формы.

Все рассмотренные выше экспериментальные значения коэффициента ζ_d пористых металлов можно свести к одной критериальной зависимости (111), если использовать в качестве определяющего размера отношение инерционного коэффициента к вязкостному. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетной зависимостью (111) для всех исследованных пористых металлов.

3. ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНА ЛАМИНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛАХ

В гл. III, п. 1 были рассмотрены условия возникновения ламинарного режима течения жидкости и газа в поровом пространстве и показано, что в порах размером в несколько микрон и выше ламинарный режим течения устанавливается при весьма низких значениях градиента давления. Такие условия фильтрации будут наблюдаться практически во всех случаях использования пористых металлов в машиностроении, поэтому в данном разделе рассмотрен вопрос только о верхней границе применения закона ламинарной фильтрации в пористых металлах.

В трубной гидравлике установлено, что начало перехода от ламинарного режима течения к турбулентному зависит от скорости движения жидкости, ее кинематической вязкости, геометрического размера и изменения формы канала по длине. В общем виде зависимость для критического числа Рейнольдса, при котором нарушается режим ламинарной фильтрации, можно записать в виде

$$Re_{кр} = f(Re, \Phi), \qquad (135)$$

где Φ — фактор формы канала, зависящий от степени изменения площади поперечного сечения по длине канала. Многочисленными опытами установлено, что для каналов с постоянным поперечным сечением $Re_{кр} = 2300$. Относительная шероховатость и форма поперечного сечения канала не влияют на $Re_{кр}$. В трубной гидравлике исследовано влияние относительной шероховатости в диапазоне от 0 до 0,03. Особый интерес в применении к пористым металлам представляют результаты исследований по изучению условий нарушения ламинарного режима течения в каналах с переменной по длине площадью поперечного сечения. Так, в работе [71] показано, что при движении жидкости в трубах с попеременно расширяющимися и суживающимися поперечными сечениями нарушение закона ламинарного движения наступает при $Re \to 540$. Причина раннего отхода от ламинарного режима движения, по мнению автора, состоит в том, что в потоке жидкости наряду с силами трения существенное влияние на потери напора начинают оказывать силы инерции. Возникновение сил инерции связано с постоянными ускорениями и замедлениями жидкости по длине канала. Изучение режимов течения жидкости в щелях различной формы показало, что $Re_{кр}$ существенно зависит от степени шероховатости поверхности канала, особенно при относительной шероховатости, близкой к единице.

В работах [57, 58] исследованием гидравлического сопротивления трубопроводов при внезапном расширении или сужении поперечного сечения установлено, что нарушение ламинарного режима течения жидкости возникает при $Re_{кр} = 9$, если за определяющие параметры принять диаметр канала и скорость движения жидкости в узком сечении трубопровода. Переходный режим течения наблюдается до $Re = 2300$.

В работе [68] указано, что исследование гидравлического сопротивления диафрагм при различных числах Рейнольдса показало, что отклонение от ламинарного режима течения наступает при $Re = 10 \div 1000$ и существенно зависит от отношения площади диафрагмы к площади канала. Так, при отношении, равном 0,64, $Re_{кр} = 1000$, а при отношении площадей, равном 0,05, составляет 10. Интересно отметить, что почти во всех случаях, рассмотренных в работах [57, 58, 68, 71], переход от ламинарного режима течения к турбулентному совершается плавно без резкого изменения коэффициента ζ_d, характерного для каналов постоянного поперечного сечения.

Результаты работ [59, 68, 71] дают основания предполагать следующее: в пористой среде, для которой характерно измене-

ние площади поперечного сечения пор и высокие степени шероховатости поверхности, нарушение режима ламинарной фильтрации должно возникать при малых числах Рейнольдса; значение $Re_{кр}$ может изменяться в широких пределах, так как относительная шероховатость поверхности пор может изменяться в пределах от 0 до 1, а отношение минимальной площади поперечного сечения к максимальной площади в поровом канале также может быть большим и достигать значений, близких к $(d_{п\,ср}/d_{ч\,ср})^2$; переход от ламинарного режима фильтрации к турбулентному должен совершаться плавно. С учетом этих предложений для пористой среды зависимость критического числа Рейнольдса от режима течения и параметров пористой среды можно записать в виде

$$Re_{кр} = f(d_{п\,ср},\ \delta/d_{п\,ср},\ d_{п\,ср}/d_{ч\,ср}). \qquad (136)$$

Точная оценка степени шероховатости поверхности поровых каналов затруднена и поэтому можно лишь качественно разделить пористые среды на две группы по степени шероховатости поверхности пор. Очевидно, что пористые среды, полученные из частиц с гладкой поверхностью, будут иметь низкую степень шероховатости (насадки из сферических частиц, пористые металлы из сферических частиц и частиц, близких по форме к сферическим, и т. п.). Пористые среды, полученные из частиц неправильной формы с шероховатой поверхностью, будут обладать высокой степенью шероховатости поверхности пор (пористые металлы из губчатых, чешуйчатых, дендритных частиц и т. п.).

Форма каналов в пористом материале очень сложная, причем наиболее сложной формой поровых каналов обладают материалы, полученные из частиц неправильной формы. Чем сложнее форма канала, тем больше встречается по длине пор сужений и расширений. Поэтому следует ожидать, что в пористых материалах из частиц произвольной формы нарушение ламинарного режима фильтрации должно происходить при меньших числах Рейнольдса, чем в пористых материалах из гладких сферических частиц.

Экспериментальному определению предела применимости законов ламинарной фильтрации в пористых материалах посвящено много работ, в которых прямо или косвенно ставилась задача определения $Re_{кр}$ применительно к конкретной пористой среде. Однако полученные результаты не обобщались с учетом всех факторов, влияющих на критические числа Рейнольдса, поэтому в настоящее время существуют различные представления о верхнем пределе применимости закона ламинарной фильтрации в пористой среде. Для удобства обобщения все известные автору данные по критическим числам Рейнольдса для насадок и пористых материалов из сферических частиц сведены в табл. 15, из которой видно, что в большинстве случаев критические числа Рейнольдса равны 4—11. Такие значения $Re_{кр}$ хорошо

Таблица 15

Значения критических чисел Рейнольдса для насадок и пористых металлов, изготовленных из сферических частиц

Источник	Материал	Размер частиц, мкм	Пористость	$Re_{кр}$	Средний размер, мкм	
					частиц	пор
[112]	Насадок сферических частиц	250—30000	0,40	7,8—11,0	1500	667,0
[77]	Насадок стальных шаров	3200—7000	0,40	180	4600	2050
[71]	Песок речной и морской	650—5500	0,352—0,395	1÷8	746	305
[55]	Пористая бронза	270—400, 90—133	0,35—0,408	10,0	174	71,0
[4]	Насадок стальных шаров	2000, 4000, 6000	0,40	39,0	3300	1460
[75]		1664	0,446	6,3	1664	893
[93]		7920—11720	0,39—0,40	51,5	9580	4260
[97]	Насадок из дроби	—	0,40	11,2	—	—
[1, 2]	Насадок из дроби	1550	0,340	1,0	1550	535
[76]	Насадок из свинцовой и стальной дроби	2320, 3550	0,36—0,42	10,0	2840	1260
[103]	Насадок из шариков кокса	5440, 8320, 11100, 12900	0,422÷0,518	48,0	8100	4800
[69]	Насадок из дроби	957, 9180	0,40	3,2—4,0	2260	1000
[56]	Пористая бронза, никель, нержавеющая сталь из сферических частиц	80—500	0,25—0,52	0,5—1,1	176	72
[37]	Насадок стальных шаров	165, 500, 1700, 3000, 5000	0,28—0,47	4,0	643	258
[111]	Песок, гравий	250—15000	0,25—0,475	0,232—415	—	—
[39]	Насадок стальных шаров, гравий	937	0,40	2,6	—	416
		136000	0,40	1500	—	60500
[127]	Пористая бронза из сферических частиц	56—482	0,193—0,354	6,0	292	72
[129]	Пористая бронза, нержавеющая сталь из сферических частиц	—	0,35—0,45	5,0	—	—

согласуются с результатами работ [57, 58, 68], где исследован вопрос о нарушении ламинарного режима течения в каналах переменного проходного сечения. В ряде случаев имеют место отклонения в значениях $Re_{кр}$; так, по данным работ [4, 77, 93, 103], в насадках из гладких сферических частиц большого размера (от 2,0 до 12 мм) ламинарный режим течения сохраняется до чисел $Re_{кр} = 40 \div 180$. В спеченных пористых металлах из сферических частиц отклонение от ламинарного режима фильтрации наступает при $Re_{кр} = 0{,}5 \div 10{,}0$.

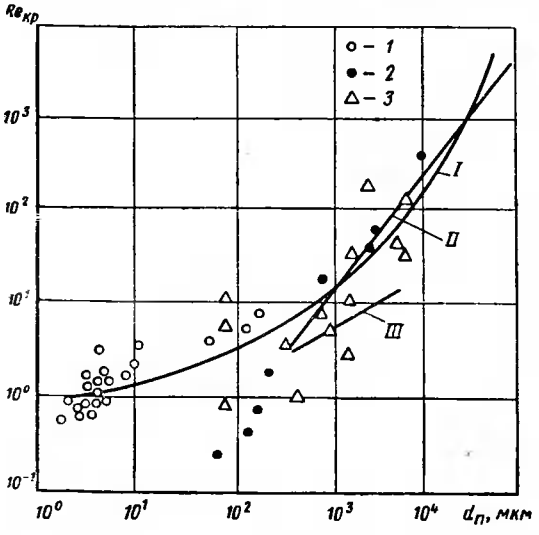


Рис. 35. Зависимость критического числа Рейнольдса от размеров пор насадок и пористых металлов, изготовленных из сферических частиц:

1 — данные работы [22]; *2* — данные работы [111]; *3* — данные работ [2, 4, 37, 56, 69, 71, 75, 76, 77. 93, 103, 112, 127]; *I* — кривая по формуле [140]; *II* — кривая по формуле (138); *III* — кривая по формуле (139)

При сведении данных, полученных в разных исследованиях, в табл. 15 средний размер пор вычислен по формуле (24), а средний размер частиц определен по формуле (27). Результаты всех работ показаны на рис. 35 в виде зависимости критических чисел Рейнольдса от размеров пор.

В работе [39] приведено сопоставление и обобщение данных по $Re_{кр}$, полученных на крупнозернистых насадках из стальных шариков, гравия, антрацита, щебня и т. п., с размерами частиц от 0,937 до 136 мм. В результате анализа установлено, что $Re_{кр}$ зависит от размеров зерен: чем больше размер частиц, тем больше $Re_{кр}$. Кроме того, на величину $Re_{кр}$ существенно влияет форма частиц и состояние их поверхности. Неровные, шероховатые поверхности частиц вызывают более раннее наступление турбулизации потока, у гладких шарообразных частиц турбулизация наступает позже. Автор работы [39] предложил зависимость для определения критического числа Рейнольдса в виде

$$Re_{кр} = \kappa \left(\frac{d_ч}{\delta}\right)^n, \qquad (137)$$

где κ — коэффициент пропорциональности.

Для округлых частиц (стальные шары, гравий) зависимость (137) записана в виде

$$Re_{кр} = 3{,}72\, d_{ч\,ср}^{1{,}22}. \qquad (138)$$

при изменении $d_{ч\,ср}$ от 0,937 до 136 мм. Для частиц с шероховатой поверхностью с размерами от 0,937 до 7,79 мм

$$Re_{кр} = 4{,}2\, d_{ч\,ср}^{0{,}5}. \qquad (139)$$

Кроме рассмотренных выше работ, в которых определение $Re_{кр}$ являлось одним из основных направлений исследования, встречаются работы, где вопрос об определении $Re_{кр}$ имеет вспомогательное значение.

Анализ экспериментальных данных показывает, что существует общая тенденция к увеличению $Re_{кр}$ с ростом среднего размера пор, что, по-видимому, аналогично увеличению $Re_{кр}$ с уменьшением относительной шероховатости поверхности пор. Как видно из рис. 35, данные работ различных авторов имеют существенный разброс, что во многом объясняется условиями проведения опытов и способами определения $Re_{кр}$. Так в ряде случаев [37, 112], несмотря на большое различие во фракционном составе насадки, авторы получают одно значение $Re_{кр}$, что вызывает сомнение. Кроме того, во всех работах не оценивалась относительная шероховатость частиц, поэтому вполне возможно, что данные по критическим числам Рейнольдса получены для различной относительной шероховатости (например, стальные частицы и свинцовая дробь и т. д.). Нарушение ламинарного режима течения не имеет резко выраженных границ и происходит плавно, поэтому возможно, что авторы в основу оценки $Re_{кр}$ закладывали различные относительные отклонения от режима ламинарной фильтрации, что могло повлиять на абсолютное значение $Re_{кр}$.

Однако несмотря на существенный разброс экспериментальных данных, все же заметна тенденция к росту критического числа Рейнольдса при увеличении среднего размера пор. Сравнение данных, выполненное в работе [22], показало, что для насадок из сферических частиц и пористых металлов, изготовленных из частиц сферической и округлой формы, можно рекомендовать зависимость (140) для приближенного определения критического числа Рейнольдса по известному среднему размеру пор для материалов со средним размером пор от 2 до 10 000 мкм при изменении пористости от 0,35 до 0,45:

$$Re_{кр} = d_{п\,ср}^{0{,}15(\lg d_{п\,ср} - 0{,}4)}. \qquad (140)$$

Исследования по определению $Re_{кр}$ пористых металлов, проведенные на образцах, изготовленных из сферических частиц (бронза, медь), а также из частиц округлой формы (вольфрам, молибден, нихром), показало, что числа $Re_{кр}$ зависят от размеров пор, увеличиваясь с их ростом [22].

Экспериментально установлено, что в пористой бронзе со средним размером пор 45 мкм ламинарный режим течения нарушается при $Re_{кр} = 4{,}0$; для пористого вольфрама с $d_{п\,ср} = 3{,}2$ мкм — при $Re_{кр} = 1{,}5$; для пористого молибдена с $d_{п\,ср} = 2{,}8$ мкм — при $Re_{кр} = 0{,}7$; для пористого молибдена с $d_{п\,ср} = 3{,}1$ мкм — при $Re_{кр} = 1{,}0$; для пористой меди с $d_{п\,ср} = 140$ мкм — при $Re_{кр} = 6{,}0$; для пористого нихрома получены данные, приведенные ниже:

$d_{п\,ср}$, мкм	2,38	3,04	3,62	4,33	3,89	1,77	3,38	3,59	4,07	2,2	2,0	0,61	4,07
$Re_{кр}$	0,68	0,82	1,11	1,29	0,95	0,6	0,96	1,2	1,4	0,63	0,75	0,815	1,36

Для стали 50ХГ, изготовленной из сферических частиц диаметром 35—63 мкм, получены следующие данные: при $d_{п\,ср} = 8{,}3$ мкм $Re_{кр} = 1{,}65$, при $d_{п\,ср} = 10$ мкм $Re_{кр} = 2{,}6$ и при $d_{п\,ср} = 12{,}5$ мкм $Re_{кр} = 3{,}6$.

Все экспериментальные значения $Re_{кр}$, полученные в работе [22], удовлетворительно согласуются с зависимостью (140).

Интересно оценить расположение экспериментальных точек относительно кривой, полученной по формуле (140). Экспериментальные точки, расположенные выше кривой, получены, как правило, для насадок пористых металлов, изготовленных из гладких сферических частиц, а экспериментальные точки, расположенные ниже кривой, получены, как правило, на насадках из песка, дроби, гравия и т. п. Этот факт еще раз подтверждает, что состояние поверхности частиц существенно влияет на критическое число Рейнольдса, и что $Re_{кр}$ в пористых металлах, изготовленных из частиц произвольной формы, должны быть меньше для материалов, изготовленных из сферических частиц.

Кроме относительной шероховатости поверхности пор на $Re_{кр}$ должно влиять и изменение формы порового канала по длине, которое в первом приближении можно оценить через величину отношения среднего размера пор к среднему размеру частиц. Это отношение зависит от пористости материала, увеличиваясь при уменьшении пористости. Экспериментально очень сложно выявить отдельно влияние формы поровых каналов и относительной шероховатости на значение $Re_{кр}$, так как при уменьшении среднего диаметра пор уменьшается не только отношение $d_{п\,ср}/d_{ч\,ср}$, но и увеличивается относительная шероховатость поверхности пор.

С учетом этих двух факторов целесообразно для конкретного пористого металла находить зависимость $Re_{кр}$ от пористости, так как она определяет во многом средний размер пор, а следовательно, и отношения $d_{п\,ср}/d_{ч\,ср}$ и $\delta/d_{п\,ср}$ для данного пористого металла.

В работе [26] исследованием большой группы пористых металлов установлено, что для каждого материала существует своя зависимость

$$Re_{кр} = a(П - в). \qquad (141)$$

Так, для стали 50ХГ ($П = 0{,}195 \div 0{,}3$), изготовленной из частиц округлой формы с размерами от 35 до 65 мкм, $a = 20$ и $в = 0{,}12$. Для вольфрама ($П = 0{,}2 \div 0{,}35$) и молибдена ($П = 0{,}2 \div 0{,}26$), изготовленных из частиц округлой формы со средним размером соответственно 8 и 5 мкм, экспериментальные значения $Re_{кр}$ согласуются с зависимостью (141), если $a = 18{,}8$ и $в = 0{,}18$. Для нихрома ($П = 0{,}17 \div 0{,}30$), изготовленного из частиц никеля и хрома округлой формы со средним размером около 8 мкм, экспериментальные значения $Re_{кр}$ согласуются с зависимостью (141), если $a = 8{,}2$ и $в = 0{,}10$.

Эксперименты показали, что значения $a = 8{,}2$ и $в = 0{,}10$ можно использовать для определения $Re_{кр}$ в пористом нихроме, изготовленном из частиц никеля (80% по весу) округлой формы со средним размером 12 мкм и частиц хрома (20% по весу) произвольной формы со средним размером 8 мкм, если пористость нихрома изменяется от 0,17 до 0,30. Удовлетворительно согласуются с зависимостью (141) при $a = 8{,}2$ и $в = 0{,}10$ и значения $Re_{кр}$, полученные для нихрома, изготовленного из сферических частиц нихрома (50% по весу) со средним размером 60 мкм и 50% по весу смеси частиц (80% Ni и 20% Cr) произвольной формы со средним размером 8 мкм. Пористость исследованных образцов изменялась от 0,195 до 0,315.

Для нихрома, изготовленного из частиц Ni дендритной формы со средним размером частиц 50 мкм и частиц Cr произвольной формы со средним размером 3 мкм, получено $a = 5{,}4$ и $в = 0{,}12$ при изменении пористости от 0,15 до 0,45.

Сравнение результатов показывает, что $Re_{кр}$ уменьшаются при переходе от сферической формы частиц к произвольной. Чем сложнее форма частиц, тем при меньших числах Рейнольдса нарушается ламинарная фильтрация в порах. В этом отношении показательны результаты опытов, проведенных с образцами из стали 50 ХГ и железа.

Всего было исследовано четыре групы образцов: первая группа образцов изготовлена из сферических частиц размером от 100 до 200 мкм, причем анализ формы частиц под микроскопом показал, что в основной массе сферических частиц имелись частицы произвольной формы (до 20%); третья группа образцов изготовлена из частиц произвольной формы размером от 200 до 315 мкм, причем исследования формы частиц под микроскопом показали, что около 20% частиц имели сферическую форму; четвертая — из частиц произвольной формы размером от 315 до 500 мкм (10% сферических частиц). Опытные данные показывают, что с переходом от сферической формы частиц к произвольной форме происходит снижение значений $Re_{кр}$.

Для сравнения с зависимостью (140) на рис. 35 показаны значения $Re_{кр}$, полученные для пористых металлов, изготовленных из частиц сферической и округлой формы [22].

4. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Критериальные зависимости для расчета коэффициента гидравлического сопротивления пористых материалов обычно определяются по результатам опытов, проведенных в изотермических условиях при температурах, близких к 20° С. Однако практическое использование пористых металлов не всегда соответствует нормальным температурным условиям, а в некоторых случаях, например, при фильтрации горячих газов или криогенных жидкостей, может существенно отличаться от условий экспериментального определения гидравлических характеристик пористых материалов.

В трубной гидравлике влияние температуры фильтруемой жидкости на потери давления учитывается выбором определяющей температуры, по значениям которой находят физические константы фильтруемой жидкости. Многочисленными экспериментами подтверждено, что такой подход к оценке влияния температуры фильтруемой жидкости на гидравлическое сопротивление каналов вполне допустим и весьма удобен, поскольку для расчета гидравлических потерь при любых температурах жидкости можно пользоваться критериальными зависимостями, полученными в изотермических условиях при температуре, близкой к 20° С. Для этого необходимо лишь выполнить условия изотермичности, т. е. обеспечить равенство температур стенок канала и жидкости при любом уровне температуры.

Распространение этих положений на условия фильтрации жидкостей в пористых металлах невозможно без достаточной экспериментальной проверки, поскольку изменение температуры фильтруемой жидкости и пористого металла может привести к изменению гидравлического сопротивления как за счет переменности физических свойств фильтруемой жидкости, так и за счет изменений в структуре пористого тела, вызванных нагревом или охлаждением его.

Из-за сложного строения порового пространства теоретическая оценка влияния температуры пористого тела на размер его проходных сечений, а следовательно, и на его гидравлическое сопротивление невозможна. Поэтому наиболее правильным способом оценки влияния температуры пористого металла на его гидравлическое сопротивление следует считать экспериментальные исследования в максимально возможном диапазоне изменения температур.

Экспериментальным исследованием гидравлического сопротивления насадки стальных шаров, нагретой до 150° С, при фильтрации воздуха показано, что гидравлическое сопротивление стальной насадки можно рассчитывать по критериальным зависимостям, полученным при нормальных условиях проведения опытов, т. е. при температуре 20° С, если плотность и вязкость воздуха определены по средней температуре насадки [77].

К аналогичным выводам пришли и авторы работы [103] при исследовании гидравлического сопротивления насадок трех типов (шарики кокса, куски кокса и стеклянные кольца) при фильтрации воздуха, нагретого до температур от 20 до 250° С, и масла при изменении температуры от 14 до 115° С.

Однако, по данным работы [126], у пористых металлов (бронза, латунь, никель, медь и вольфрам), изготовленных спеканием частиц сферической формы, гидравлическое сопротивление изменяется при нагреве на большую величину по сравнению с увеличением гидросопротивления за счет изменения вязкости азота. Это явление авторы объясняют изменениями структуры пористых металлов, происходящими при их тепловом расширении. Опыты проведены при изменении температуры пористых металлов и азота в пределах 15—60° С.

Более полные теоретические и экспериментальные исследования по учету влияния температуры фильтруемой жидкости и пористого металла на его гидравлическое сопротивление проведены авторами работы [49], которые исследовали влияние эффекта охлаждения пористого металла на его гидравлическое сопротивление. По мнению авторов, изменение гидравлического сопротивления пористого металла при его охлаждении или нагреве может происходить в силу следующих причин: изменение размеров пор из-за теплового расширения должно увеличивать гидравлическое сопротивление при охлаждении и уменьшать его при нагреве металла; незначительное изменение взаимного расположения элементов поверхности пор (выступы на поверхности пор) при изменении температуры металла может привести к заметному отклонению в размерах проходных сечений пор, особенно в местах сужения пор; изменение температуры фильтруемой жидкости изменяет ее вязкость и плотность, а следовательно, и потери давления на пористом элементе конструкции.

Для теоретической оценки влияния этих факторов на гидравлическое сопротивление пористой среды была рассмотрена идеальная пористая среда (см. рис. 1) в предположении одномерного установившегося течения газа в порах [49]. Результаты расчета показали, что потери на трение, вызванные изменением вязкости газа, уменьшаются в 2,7 раза, а потери из-за изменения диаметра пор практически постоянны при изменении температуры пористого тела от 20 до —173° С. Для подтверждения результатов расчета были проведены опыты на пористых образцах при температуре 15—20° С и при температуре от 27 до —173° С.

Результаты опытов (рис. 36), обработанные в критериальной форме, показывают, что гидравлическое сопротивление пористых металлов при фильтрации в порах газообразного азота в изотермических условиях при температуре от 27 до —173° С можно рассчитывать по критериальным зависимостям, полученным по продувкам воздуха при нормальных условиях.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований [49, 77, 103] показывают, что гидравлическое сопротивление пористых металлов при их нагреве до 250° С и охлаждении до —173° С изменяется лишь за счет изменения вязкости фильтруемой среды. Для учета изменения гидравлического сопротивления пористых металлов, вызванного отклонением температуры

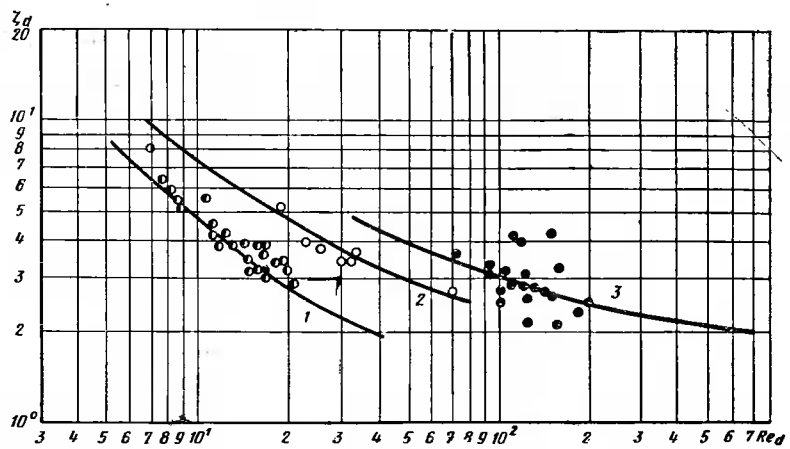


Рис. 36. Экспериментальные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при температуре 20° С [*1* — кривая для пористой бронзы; *2* — кривая для пористой нержавеющей стали; *3* — кривая для пористого нихрома] или при —173° С (показано точками)

от нормальной, достаточно вязкость и плотность газа в критериальных зависимостях, полученные при нормальных условиях, определять по средней температуре газа в порах.

5. ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ РЕАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В КАПИЛЛЯРНЫХ КАНАЛАХ И ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛАХ

Экспериментальные исследования показывают, что приведенные выше критериальные зависимости для определения коэффициента ζ_d пористых сред, а также известные критериальные зависимости для расчета коэффициента ζ_d капиллярных каналов оказываются несправедливыми при фильтрации некоторых жидкостей по каналам микронных размеров. Начальный расход жидкостей уменьшается с течением времени фильтрации, причем скорость снижения расхода жидкостей зависит от ряда факторов, к которым относятся свойства фильтруемой жидкости, геометрические размеры канала и режимы фильтрации. Явление уменьшения расхода жидкости с течением времени при постоянных условиях фильтрации в каналах малого размера получило название облитерации.

Начало изучения явления облитерации каналов было положено Вильсоном в 1922 г., который исследовал зависимость скорости протекания масел через капиллярные каналы от времени. Жидкость с перепадом давления, равным 1 кгс/см², проливалась через металлические и стеклянные капилляры длиной 10 мм и диаметром 300 мкм. Уменьшение относительного расхода жидкостей с течением времени свидетельствует об адсорбционном эффекте, в результате которого живое сечение каналов со временем уменьшается. Наибольшим адсорбционным эффектом обладают каналы, изготовленные из стали и железа, наименьшим — каналы, изготовленные из стекла. В исследованиях замечено влияние на относительный расход жидкостей присадок полярных молекул. Наибольший эффект получен при добавлении в неполярное масло стеариновой кислоты.

Автор работы [19] впервые развил предположение о том, что течение жидкости в микронных каналах определяется поведением и свойствами жидкости в граничных пленках, образующихся на поверхности твердых стенок, что должно вызывать нарушение классических законов гидравлики.

Ряд исследователей объясняют явление уменьшения расхода жидкостей через капилляры с течением времени повышением вязкости части жидкости, находящейся в сфере действия поля твердой стенки. В работе [30] показано, что в плоских капиллярных каналах вязкость масла *СС* повышается в среднем на величину 1,04—2,75 по сравнению с ее значением в неограниченном объеме, что приводит к соответствующему уменьшению расхода масла через капиллярные каналы. Предположение, что вязкость жидкости вблизи твердых стенок отличается от вязкости в объеме, неоднократно высказывалось и другими исследователями, однако опыты, вследствие технических трудностей, приводили к противоречивым результатам. Наиболее достоверные результаты по определению вязкости жидкостей в граничных слоях получены в работах Б. В. Дерягина и его сотрудников, которые установили, что у некоторых жидкостей, например у вазелинового масла, из которого удалены тщательной очисткой даже самые ничтожные количества поверхностно-активных веществ, вязкость в граничном слое не изменяется. Вязкость диолефинового углеводорода $C_{30}H_{58}$ меняется в граничном слое дважды ступенями. Касторовое масло не имеет четкой границы изменения вязкости, вязкость изменяется постепенно, и у границы с твердым телом она в 4—5 раз превышает объемное значение. Часто вязкость вблизи границы поверхности меняется скачкообразно в сторону увеличения. Если иметь в виду, что вязкость является свойством структурного строения жидкости, то жидкость вблизи стенки меняет свою структуру скачкообразно. Максимально граничная вязкость меняется в несколько раз, а толщина граничных пленок не превышает 0,1 мкм. Для масел, у которых молекулы ориентируются на поверхности твердого

тела в касательной плоскости, наблюдается снижение вязкости у границы тела.

В большинстве работ причину уменьшения расхода жидкости при течении через капилляры объясняют силами межмолекулярного и электрического взаимодействия, возникающими на границе раздела жидкой и твердой фаз. В результате этого взаимодействия на стенках каналов адсорбируются и фиксируются слои полярно активных молекул определенной прочности, которые постепенно уменьшают живое сечение канала.

Для понимания причин образования слоев полярных молекул жидкости на поверхности твердого тела необходимо рассмотреть некоторые особенности поверхностных слоев. Эти слои, полученные, как правило, после механической обработки, имеют особые свойства, отличные от свойств сплошного металла. На поверхности располагаются преимущественно разрушенные кристаллы, что приводит к нарушению равновесного состояния силового поля межмолекулярных сил. Если атомы кристаллической решетки в сплошной массе тела находятся в равновесном состоянии, то в поверхностном слое атомы испытывают различное воздействие со стороны окружающей среды и со стороны металла. В результате у поверхности твердого тела возникает внешнее молекулярное поле, которое интенсивно взаимодействует с контактирующими молекулами газов и жидкостей.

А. С. Ахматов [16] считает, что поле твердой фазы нельзя представлять как простую сумму элементарных полей образующих его частиц, действие которых ограничено радиусом в несколько ангстрем. Это поле не только количественно, но и качественно отличается от поля изолированной частицы. Можно предположить, что электромагнитное поле выходит за пределы тела в виде волн, затухающих по мере удаления от тела. Граничное же поле, заключенное между двумя взаимодействующими поверхностями в капиллярном канале, в значительной степени отличается от поля, излучаемого одиночной поверхностью. Это поле образуется как результат интерференции излучаемых и отражаемых взаимодействующими поверхностями волн. Сила взаимодействия в пространстве между двумя твердыми телами сохраняет конечное значение на расстоянии в несколько десятков тысяч ангстрем, уменьшаясь с увеличением расстояния между телами.

Если неполярная молекула жидкости в своем беспорядочном тепловом движении приблизится к поверхности твердого тела, то под действием сильного одностороннего поля поверхности в молекуле нарушается распределение ее зарядов: все противоположно заряженные частицы будут притягиваться к телу, одноименные — отталкиваться. Молекула притягивается к источнику поля, при этом диполь ее увеличивается. Величина такого индуцированного диполя будет тем больше, чем сильнее и легче деформируется молекула. Полярная молекула жидкости, обладающая постоянным диполем, попадая в силовое поле, притягивается к твердой поверхности противоположно заряженными концами своих диполей. Ориентация молекул происходит тем быстрее, чем значительнее их диполь.

При фильтрации жидкости в канале постепенно происходит насыщение поверхностей металла полярными молекулами. Вслед за образованием монослоя может происходить дальнейшая ориентация молекул, поскольку концы молекул монослоя, обращенные к жидкости, также создают силовое поле, хотя и более слабое по сравнению с полем твердого тела. Однако благодаря его правильности сила этого поля достаточна, чтобы ориентировать второй слой молекул. Так происходит построение молекулярного граничного слоя, состоящего из многих рядов. При определенной толщине граничного слоя дальнейший его рост, вероятно, должен прекратиться, так как действие силового поля твердой поверхности ослабевает за счет экранирующего влияния близлежащих к твердой поверхности слоев полярных молекул. Молекулы граничного слоя жидкости совершают тепловые колебательные движения, в результате которых некоторые из них могут оторваться и вновь перейти в движущийся поток жидкости. Вместе с тем о поверхность непрерывно ударяются новые молекулы и часть их на ней задерживается. Наличие обоих процессов, действующих одновременно, приводит к равновесию. В результате взаимодействия молекул жидкости с поверхностью твердого тела образуются адсорбционные слои жидкости, свободная поверхность которых точно копирует рельеф твердой поверхности, и толщина слоя для любого элемента поверхности остается постоянной.

Толщина адсорбированных слоев жидкости зависит от свойств жидкости, структуры и свойств твердой поверхности. На структуру граничных слоев жидкостей влияют микрогеометрия поверхности, различные механические включения, содержащиеся в жидкости и присутствующие на поверхности металла. По данным работы [79], максимально возможная толщина граничного слоя жидкостей составляет: для жидкости АМГ-10— 0,48 мкм; для жидкости 7-50-С3 — 1,15 мкм; для веретенного масла АУ—1,75 мкм; для водопроводной воды — 0,99 мкм.

Кроме рассмотренных явлений образования адсорбированных слоев жидкостей на поверхности капиллярных каналов на процесс облитерации существенно может влиять наличие частиц загрязнений в жидкости, которые частично или полностью закрывают живое сечение капиллярного канала. Авторы работы [79], не отрицая влияния адсорбционных слоев на процесс облитерации, считают, что основной причиной облитерации является механическое забивание каналов микронных размеров неотфильтрованными частицами загрязнений, находящимися в жидкости. При течении жидкости через капилляр частицы бóльших размеров, чем высота канала, будут задерживаться у входа и нач-

нут отфильтровывать частицы меньших размеров. Если на поверхности капилляров есть выступы или капилляр искривлен, то и частицы с размером меньше диаметра капилляра могут задерживаться в каналах, уменьшая его живое сечение. Последнее обстоятельство особенно важно для пористых сред, каналы которых имеют большое число сужений и выступов на поверхности пор.

Кроме частиц примесей на процесс облитерации могут влиять сложные малоизученные рыхлые структуры смолоподобных загрязнений, образующиеся при течении технических масел в капиллярных каналах. Такое явление наблюдали при экспериментальном исследовании течения трансформаторного масла в круглых каналах диаметром менее 400 мкм, выполненных из стали и латуни. Полное прекращение расхода трансформаторного масла наступало в каналах размером менее 200 мкм, независимо от их длины. При проливках через латунный канал диаметром 120 мкм таких жидкостей, как толуол, уайт-спирит, цетан, белое вазелиновое масло, очищенный керосин и вода, облитерации не было.

В реальных условиях фильтрации жидкости в капиллярных каналах или пористой среде процесс облитерации может определяться совокупностью всех или некоторых из рассмотренных явлений.

Изучению процесса облитерации капиллярных каналов уделено внимание в ряде экспериментальных исследований, результаты которых показывают, что наибольшее влияние на облитерацию оказывают свойства жидкости, геометрические размеры каналов и режимы фильтрации. В работе [88] рассмотрено влияние свойств жидкости на процесс облитерации. Автор, считая основной причиной облитерации образование на стенках канала слоя полярных молекул или ионов, классифицирует жидкости по склонности к облитерации следующим образом: неполярный диэлектрик, если электрическое поле стенок капилляра не вызывает ориентации молекул жидкости и не превращает их в индуцированные диполи. К таким жидкостям относятся: бензол, бензин, керосин и др.; полярный диэлектрик, если электрическое поле вызывает ориентацию молекул жидкости, причем молекулы ориентируются зарядом с противоположным знаком к стенке и в результате действия кулоновых сил молекулы жидкости притягиваются к стенке. К таким жидкостям относятся вода, водный раствор сахара, трансформаторное масло и др.; сильный электролит — жидкость, в которой все молекулы диссоциированы на ионы. Избыток заряда на стенке постепенно нейтрализуется ионами противоположного знака, в этом случае облитерационный слой тонок. К таким жидкостям относятся: водные растворы NaCl, KCl и др.; слабые электролиты, состоящие из ионов и молекул, нейтрализуют только часть заряда стенки и поэтому образование слоя полярных молекул на стенке капилляра возможно, хотя этот слой несплошной и постоянно разрушается. К таким жидкостям относятся водные растворы лимонной кислоты и др. Экспериментальные результаты работы [88] показаны на рис. 37. Все опыты проведены на пористых керамических фильтрах со средним размером пор менее 25 мкм.

Специальные исследования по изучению влияния скорости движения жидкостей на процесс облитерации показывают, что с ростом скорости жидкости в капиллярных каналах увеличивается и скорость облитерации. Такую взаимосвязь процесса об-

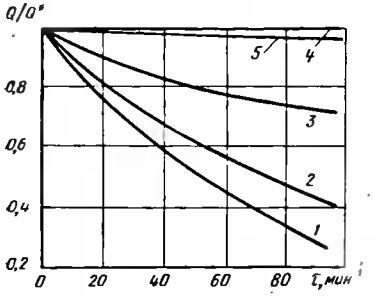


Рис. 37. Зависимость относительного расхода различных жидкостей от времени фильтрации в порах по данным работы [88]:
1 — водный раствор сахара; *2* — вода; *3* — водный 0,3%-ный раствор лимонной кислоты; *4* — бензин; *5* — водный раствор NaCl

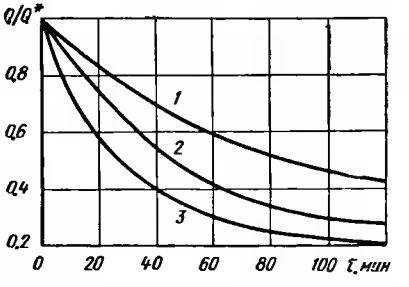


Рис. 38. Зависимость относительного расхода дистиллированной воды через пористые керамические элементы со средним размером пор $d_п = 15$ мкм от перепада давления и времени фильтрации:
1 — $\Delta P = 0{,}02$ кгс/см²; *2* — 0,06 кгс/см²; *3* — $\Delta P = 0{,}08$ кгс/см²

литерации и скорости движения жидкости можно объяснить бо́льшим количеством полярных молекул, вступающих в контакт с поверхностью канала в единицу времени, а также большим числом частиц примесей, задерживаемых каналом, при увеличении скорости фильтрации жидкостей. Эти положения подтверждаются экспериментальными исследованиями, выполненными авторами работы [79], по влиянию роста перепада давления жидкости в капиллярном канале высотой 10 и 14 мкм на скорость облитерации.

Аналогичные результаты получены в работе [88], где исследовано влияние перепада давления на процесс облитерации при фильтрации дистиллированной воды через пористые керамические элементы со средним размером пор 15 мкм. Результаты опытов показаны на рис. 38.

Таким образом, экспериментальные исследования, проведенные в работах [79, 88], показывают, что во всех случаях рост скорости фильтрации сопровождается увеличением скорости облитерации капиллярных каналов. Эта закономерность объясняется возможностью более интенсивного засорения каналов, а

также возможностью более быстрого роста слоя полярных молекул на стенках капиллярных каналов при увеличении скорости движения жидкостей.

Степень загрязненности жидкостей, фильтруемых через пористые металлы, может оказать существенное влияние на процесс облитерации. Даже в стандартно чистой жидкости, поставляемой промышленностью по ГОСТ 6794—53, имеется большое число частиц, соизмеримых с размерами капиллярных каналов, в которых возможна облитерация. Поэтому при проведении исследований по изучению процессов облитерации, возникающих из-за влияния свойств жидкостей и размеров каналов, или при использовании пористых металлов в конструкциях машин и аппаратов необходимо принимать специальные меры по тщательной очистке жидкостей от примесей. Даже при использовании пористых металлов в качестве фильтрующих элементов перед пористым фильтром целесообразно устанавливать дополнительный фильтр грубой очистки.

Облитерация в пористых металлах при фильтрации дистиллированной воды исследована в работе [26]. В опытах были использованы образцы пористой стали 50ХГ, изготовленные спеканием частиц различного фракционного состава. Характеристики пористых образцов приведены в табл. 16.

Таблица 16

Характеристики пористых образцов из стали 50ХГ

№ образца	Размер частиц, мкм	Пористость	Средний размер пор, мкм	Толщина образца, мм
7	35—63	0,300	7,57	2,99
14	35—63	0,236	5,07	3,00
3	35—63	0,224	4,62	6,08
17	100—200	0,270	19,4	6,03
10	100—200	0,265	12,16	3,03
9	100—200	0,208	12,5	3,04
38	200—315	0,210	21,75	3,04
19	200—315	0,215	22,6	3,05
41	315—500	0,212	34,9	3,06
36	315—500	0,204	32,8	3,04
18	315—500	0,305	65,0	5,95

При проведении опытов на подводящей магистрали установки размещали фильтр грубой очистки с размером ячеек сетки 40 мкм. В качестве фильтра тонкой очистки использовали пористые фильтроэлементы со средними размерами пор, в 2—3 раза меньшими, чем средние размеры пор исследуемого образца. Такой выбор фильтров обеспечивал требуемую степень очистки жидкостей от частиц примесей, соизмеримых по размерам со средними размерами пор исследуемого образца. Результаты опытов в виде зависимости относительного расхода жидкости от времени фильтрации, приведенные на рис. 39 (где Q^* — расход жидкости в начальный момент времени), показывают, что при фильтрации дистиллированной воды через пористые металлы со средними размерами пор менее 40 мкм с течением времени наблюдается уменьшение расхода жидкости по сравнению с его

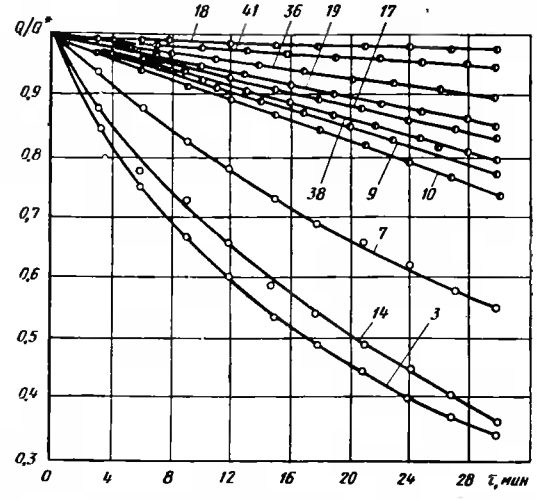


Рис. 39. Зависимость относительного расхода дистиллированной воды от времени фильтрации и средних размеров пор (цифры у кривых — номера образцов)

первоначальным значением. Скорость уменьшения относительного расхода воды, как показали опыты, увеличивается с уменьшением среднего размера пор металла при постоянном перепаде давления на образце.

Опыты проведены при перепадах давления:

№ образца . . .	3	7	9	10	14	17	18	19	36	38	41
Перепад давления на образце, кгс/см²	7,5	0,8	1,2	1,0	1,2	0,8	0,2	0,8	1,6	1,2	0,8

На рис. 40 показана зависимость относительного расхода воды через поры различного размера при перепаде давления на пористых образцах, равном 1,0 кгс/см², и длительности фильтрации $\tau = 12$ мин. В пористых образцах со средним размером пор менее 40 мкм начинается заметное уменьшение относительного расхода воды, которое тем интенсивнее, чем меньше размер пор. Результаты опытов показывают, что изменение относительного расхода воды зависит не только от размера пор, но и от скорости движения жидкости в порах: чем выше скорость

жидкости в порах, тем интенсивнее протекает процесс облитерации.

На рис. 41 показана зависимость относительного расхода воды через пористые образцы стали 50ХГ с размерами пор 22

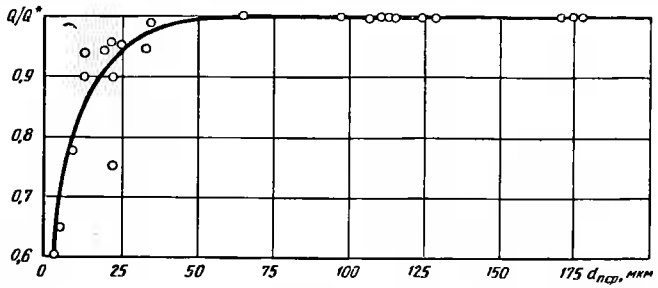


Рис. 40. Зависимость относительного расхода воды от среднего размера пор стали 50ХГ при длительности фильтрации 12 мин

и 33 мкм при различных перепадах давления, что соответствует различной скорости жидкости в порах. Рост перепада давления сопровождается уменьшением относительного расхода дистиллированной воды через пористые металлы.

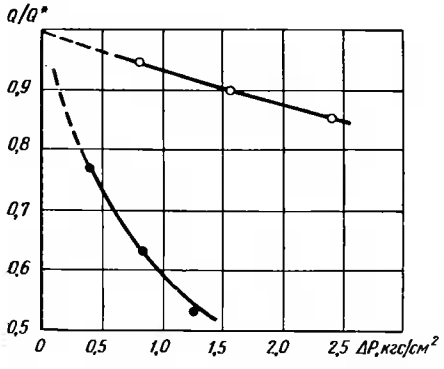


Рис. 41. Зависимость относительного расхода дистиллированной воды от перепада давления на пористых образцах стали 50ХГ с размером пор 22 (черные кружки) и 33 (светлые кружки) мкм при фильтрации в течение 30 мин

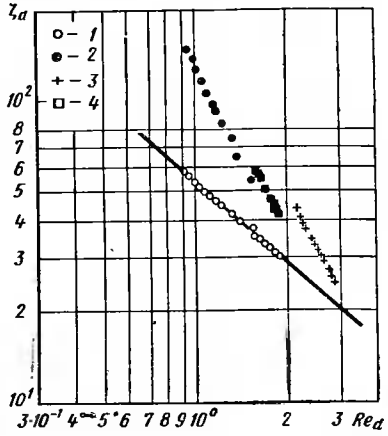


Рис. 42. Экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления пористой стали 50ХГ при продувках воздухом (*1*) и при проливках дистиллированной водой (*2* — средний размер пор 21,6 мкм; *3* — средний размер пор 21 мкм; *4* — средний размер пор 22,6 мкм)

Возникновение облитерации в порах приводит к росту гидравлического сопротивления металлов. Для оценки роста гидравлического сопротивления пористых металлов в условиях облитерации расходные характеристики образцов обработаны в критериальной форме и сопоставлены с критериальными зависимостями, полученными для тех же пористых образцов при продувках воздухом [26]. Взаимное расположение экспериментальных значений коэффициента ζ_d (рис. 42), полученных при продувке пористых металлов воздухом и при проливках дистиллированной водой, указывает на значительный рост гидравлического сопротивления пористых металлов в условиях облитерации.

Анализ результатов экспериментальных исследований по фильтрации жидкостей в капиллярных каналах и пористых металлах показывает, что облитерация приводит к увеличению гидравлического сопротивления каналов размером менее 20 мкм и пористых металлов со средним размером пор менее 40 мкм. Такое отличие в характерных размерах объясняется присутствием в металлах пор меньшего размера, чем средний размер, что подтверждается экспериментальными кривыми распределения пор по размерам.

Облитерация в системах, предназначенных для фильтрации жидкостей, является нежелательным эффектом и поэтому необходимо отыскивать меры борьбы с указанным явлением. Одним из возможных способов борьбы с облитерацией является взаимное перемещение деталей, образующих капиллярный канал. Очевидно, что при перемещении деталей нарушаются слои адсорбированных молекул и слои загрязнений, задерживаемых в канале, что уменьшает или полностью устраняет облитерацию. В эксперименте [45] масло проливалось через щель золотникового распределителя высотой 20 мкм при перепаде давления 5 кгс/см² и температуре 50° С, плунжер совершал возвратно-поступательное движение с различной частотой. Результаты эксперимента показали, что при частоте более 10 Гц облитерация полностью исчезает, а дальнейшее увеличение частоты колебаний приводит даже к росту начального расхода жидкости. Аналогичные результаты описаны и в работе [79].

Воздействие ультразвуковых колебаний на пористые элементы приводит к снижению степени облитерации при фильтрации жидкости в порах [88]. При проведении опытов пористые фильтры устанавливали на ультразвуковой вибратор, а дистиллированную воду пропускали через пористый фильтр при отключенном и работающем вибраторе. Результаты опытов свидетельствуют о том, что облитерация резко снижается при воздействии на образец ультразвуком. Снижение степени облитерации в случае воздействия ультразвуком можно объяснить тем, что на молекулу движущейся жидкости при озвучивании передаются колебания. Электростатическое воздействие стенки на молекулу становится переменным из-за постоянного изменения расстояния от стенки капилляра до молекулы. В динамических условиях молекуле труднее прийти в соприкосновение со стенкой.

Глава V

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Основными характеристиками пористых металлов, как было показано выше, принято считать размеры пор и коэффициент гидравлического сопротивления. Именно эти характеристики закладываются в основу выбора пористого металла для практического использования в качестве фильтра или элемента пористого охлаждения. Однако далеко не второстепенное значение имеют прочностные, теплофизические, химические и некоторые другие свойства пористых металлов, особенно при эксплуатации в условиях повышенных давлений и температур, при воздействии агрессивных сред и т. п. Зависимости прочностных и теплофизических свойств металлов от температуры и характеристики структур порового пространства необходимы для расчета параметров конструктивных элементов. При проектировании и изготовлении деталей или узлов из пористых металлов важное значение приобретают их технологические свойства: обрабатываемость, свариваемость, склеиваемость и т. п.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Наличие пор значительно снижает прочность и пластичность металлов. Механические свойства очень чувствительны к форме пор, что вызвано влиянием надрезов на поверхности пор, ослабляющих прочность и особенно снижающих пластичность пористых металлов. Прочность пористых металлов определяется не только прочностными характеристиками материала частиц и пористостью, в равной степени она зависит от режимов спекания и дисперсности частиц исходного порошка. При равной пористости прочность и пластичность тем больше, чем выше температура спекания и дисперснее исходный порошок. Это объясняется совершенной (округлой) формой пор, которая характерна для изделий, изготовленных из более мелких порошков и спеченных при более высоких температурах. На механические свойства пористых металлов существенно влияет количество и величина межчастичных контактов после спекания.

Для оценки механических свойств пористых металлов используются общепринятые характеристики: предел прочности на срез, относительное удлинение, ударная вязкость и т. п. Одно из наиболее распространенных испытаний пористых металлов состоит в исследовании прочности на срез.

Для бронзы, изготовленной из сферических частиц размером от 46 до 600 мкм, предел прочности на растяжение изменяется от 2 до 9 кгс/мм², тогда как предел прочности на срез составляет 3—18 кгс/мм². Для фракций со средним размером частиц 46 мкм соотношение между пределом прочности на растяжение и пределом прочности на срез составляет $\sigma_{ср} = 1{,}8\ \sigma_в$, а для фракции со средним размером частиц 600 мкм $\sigma_{ср} = 2{,}5\ \sigma_в$.

Бронза, изготовленная методом свободной засыпки порошков, имеет предел прочности на растяжение 3—4 кгс/мм² и относительное удлинение до 3%.

Прочность пористых металлов зависит не только от прочностных свойств исходного материала частиц, но и от количества и размеров межчастичных контактов. Увеличение количества и размеров контактов сопровождается ростом прочности металлов. В табл. 17 приведены свойства двух бронзовых фильтров, которые отличаются степенью спекания.

Таблица 17

Характеристики бронзовых фильтров

Характеристики	Фильтр 1	Фильтр 2
Средний размер частиц, мкм	201	174
Средний размер контактов, мкм	39,4	58
Среднее количество контактов на одну частицу	3,17	3,4
Относительная величиина контактов, мкм	0,196	0,332
Предел прочности на срез, кгс/мм²	4,4	10,5

Как видно, из табл. 17, рост величины и количества контактов, происходящий из-за повышения температуры и длительности режима спекания, существенно повышает прочность бронзовых фильтров.

Величина и размеры межчастичных контактов определяются не только режимами спекания, но также формой частиц и удельными давлениями прессования. Влияние формы частиц и пористости на прочность пористых металлов на срез освещено в работе [96]. Для приготовления пористых образцов из порошка электролитического хрома были использованы три фракции частиц со средним размером 200, 300 и 400 мкм. Металлографические исследования показали, что частицы порошка фракции 200 мкм по форме близки к равноосным, а в порошках фракций 300 и 400 мкм преобладают частицы чешуйчатой и пластинчатой формы. После прессования образцы спекали в среде водорода при температуре 1200—1250° С в течение 2 ч. Пористость образцов изменялась от 0,15 до 0,50.

Испытания по определению прочности на срез проводили в направлении прессования. Результаты испытаний приведены на рис. 43. Обращает на себя внимание факт повышения прочности образцов с увеличением размера фракций порошка от 200 до 400 мкм. Это объясняется тем, что при переходе от меньшей фракции к большей, т. е. от практически равноосных частиц к пластинчатым, происходит увеличение размеров межчастичных контактов, поскольку более крупные частицы — пластинки укладываются послойно, перпендикулярно к направлению прессования и среза. Такая ориентация частиц уменьшает долю среза по межчастичным контактам и увеличивает ее по телу частиц.

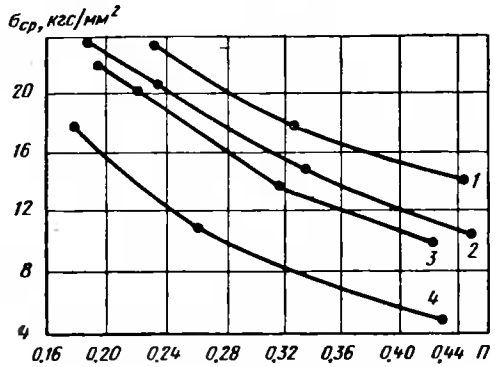


Рис. 43. Зависимость прочности на срез от пористости спеченных (при 1200° С) образцов, изготовленных из частиц электролитического хрома различных фракций:
1 — 400 мкм (температура спекания 1250° С); *2* — 400 мкм; *3* — 300 мкм; *4* — 200 мкм

Прочность образцов, спеченных из порошков фракций 300 и 400 мкм, отличается мало, поскольку порошки почти одинаковы по форме. Повышение температуры спекания образцов из порошка с размером частиц 400 мкм с 1200 до 1250°С способствует увеличению их прочности. В этом случае прочность на срез образцов с пористостью 0,40 из электролитического хрома фракции 400 мкм достигает 15 кгс/мм².

Влияние размеров фракций сферических частиц и удельных давлений прессования на предел прочности на сжатие пористого железа, полученного спеканием при температуре 1200° С, показано в табл. 18. При изготовлении образцов пористого железа в качестве связки использован парафин.

Из табл. 18 видно, что рост размеров фракций сопровождается уменьшением прочности металлов одинаковой пористости. Увеличение давлений прессования и вызванное этим уменьшение пористости приводит к упрочнению материалов.

В работах [83, 84] описаны исследования по определению пределов прочности при растяжении и кручении образцов пористого железа, изготовленного из порошка марки АПЖМ. Пористость исследованных образцов изменялась от 0 до 0,43. Гранулометрический состав порошка АПЖМ приведен ниже:

Размер фракций, мкм	140	90—140	71—90	53—71	53
Содержание фракций, %	0,5	16,85	39,10	23,15	20,40

Таблица 18

Предел прочности на сжатие пористого железа по данным работы [35]

Давление прессования, кгс/см²	Размер частиц, мкм							
	100—200		200—300		300—400		400—600	
	Пористость	$\sigma_{сж}$, кгс/мм²	Пористость	$\sigma_{сж}$, кгс/мм²	Пористость	$\sigma_{сж}$, кгс/мм²	Пористость	$\sigma_{сж}$, кгс/мм²
1000	0,44	7,5	0,43	6,5	0,42	5,0	0,40	4,0
2000	0,37	16,0	0,36	14,5	0,35	13,0	0,33	10,0
3000	0,35	22,5	0,32	20,0	0,30	18,5	0,29	—
4000	0,33	25,5	0,31	23,5	0,29	22,0	0,27	20,0

Полученные двусторонним прессованием в пресс-формах брикеты спекались при температуре 1200° С в среде водорода в течение 2 ч. После механической обработки образцы подвергали отжигу для снятия наклепа в поверхностном слое и восстановления окислов, образовавшихся в материале от окончания спекания до завершения шлифования. Отжиг производили при температуре 900° С в среде водорода в течение 1 ч. Результаты испытаний образцов из пористого железа на разрыв и на кручение приведены в табл. 19 и 20.

Таблица 19

Результаты испытаний пористого железа на разрыв

Пористость	Предел прочности, $\sigma_в$ кгс/мм²	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ кгс/мм²	Относительное удлинение после разрыва δ, %	Остаточное поперечное сужение ψ, %
0	33,0	20,0	30,0	—
0,12	20,8	11,6	9,2	8,75
0,21	14,2	9,5	5,41	5,56
0,31	8,2	5,9	2,60	2,53
0,37	4,9	4,3	1,50	1,48
0,48	3,4	3,2	0,80	0,79

Таблица 20

Результаты испытаний пористого железа на кручение

Пористость	Предел прочности $\sigma_в$, кгс/мм²	Максимальный угол закручивания φ, град	Предел текучести $\tau_{0,3}$, кгс/мм²	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-5}$, кгс/мм²
0	—	—	18,0—22,0	0,08
0,12	18,0	572	7,6	0,062
0,21	13,2	360	6,5	0,043
0,31	7,8	198	4,4	0,034
0,37	5,0	138	3,1	0,017
0,43	3,2	102	2,4	0,014

Сравнение работ разрушения при разрыве и кручении показывает, что энергоемкость пористого железа при кручении существенно больше. Это объясняется большей пластичностью пористого железа при работе на кручение, чем при работе на растяжение.

Как следует из данных табл. 19 и 20, отношение предела текучести к пределу прочности с увеличением пористости также возрастает, приближаясь к единице при пористости около 0,30. Это свидетельствует о том, что для пористости более 0,30 разрушающими являются номинальные растягивающие напряжения. С уменьшением пористости начинает возрастать роль номинальных касательных напряжений, что выражается в снижении отношения $\tau_в/\sigma_в$.

Существенное влияние на прочностные характеристики пористых металлов могут оказать различные добавки, которые в небольших количествах иногда вводят в шихту. В зависимости от свойств и взаимодействия добавок с материалом частиц их воздействие на прочность металлов может быть различным. В работе [99] описано исследование влияния температуры и различных добавок на прочность пористой бронзы. Для получения образцов использовали порошки меди и олова, просеянные через сито № 008. В качестве добавок применяли графит марки КЛ-3 с размером частиц менее 44 мкм и нитрид бора с размером частиц менее 10 мкм. После прессования образцы отжигали при температуре 600° С в среде водорода, а затем допрессовывали и окончательно спекали в среде водорода при температуре 800 ± 10° С в течение 2 ч. Испытания по определению предела прочности при изгибе проводили при температурах 293, 230, 175 и 78 К.

На рис. 44 показаны зависимости предела прочности при изгибе от температуры, из которых следует, что при понижении температуры прочность всех исследованных пористых образцов возрастает на 30—60% по сравнению с прочностью при температуре 20° С. Из рис. 44 видно, что при прочих равных условиях наиболее прочной является пористая бронза и несколько менее прочным — материал, содержащий 3% графита. Материал с содержанием 5% нитрида бора занимает промежуточное место, в то время как добавка 5% графита существенно уменьшает прочность.

На изменение характеристик прочности в зависимости от температуры значительно влияет пористость материала. С понижением температуры прочность увеличивается более резко при меньших значениях пористости. Для узкого диапазона изменения пористости предел прочности линейно зависит от пористости материала.

При исследовании влияния температуры пористого металла на его прочностные характеристики были испытаны образцы пористого железа, изготовленные по одной технологии, но отличающиеся пористостью [98]. В результате опытов установлено, что прочность пористого железа значительно повышается с понижением температуры, причем бóльшее повышение прочности наблюдается у образцов с меньшей пористостью. Предел текучести для материала с пористостью 5% увеличивается со снижением температуры значительнее, чем предел прочности. Предел текучести может достигнуть значения предела прочности данного материала при температуре ниже 78 К.

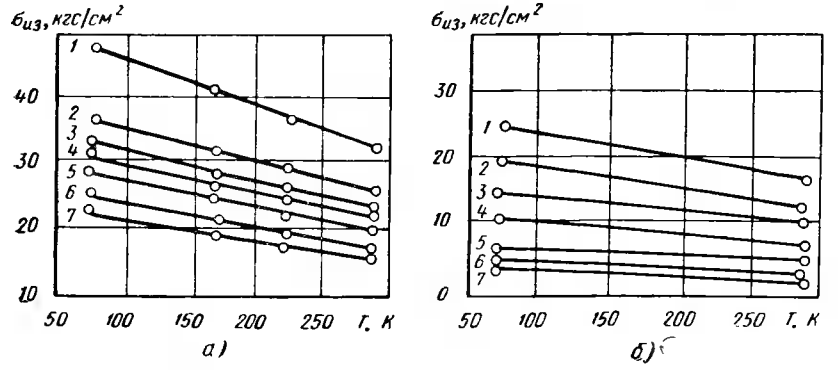


Рис. 44. Зависимость предела прочности при изгибе от температуры:
а — для пористой бронзы, бронзы + 30% графита; *б* — для бронзы + 5% графита, бронзы + +5% нитрида бора; *а*) *1* — бронза, $П$=0,06; *2* — бронза, $П$=0,15; *3* — бронза + 3% графита; $П$=0,045; *4* — бронза, $П$=0,20; *5* — бронза+3% графита, $П$=0,095; *6* — бронза+3% графита, $П$=0,15; *7* — бронза + 3% графита, $П$=0,18; *б*) *1* — бронза + 5% нитрида бора, $П$=0,05; *2* — бронза + 5% нитрида бора, $П$=0,15; *3* — бронза + 5% нитрида бора, $П$=0,19; *4* — бронза + 5% графита, $П$=0,11; *5* — бронза + 5% графита, $П$=0,20; *6* — бронза + 5% графита, $П$=0,22; *7* — бронза + 5% графита, $П$=0,25

На рис. 45 приведены зависимости относительного сужения поперечного сечения от температуры для образцов различной пористости. Как видно, пластические свойства пористого железа ухудшаются с понижением температуры, что выражается в уменьшении относительного сужения поперечного сечения, причем более резкого для образцов малой пористости. У образцов с пористостью 0,25 изменений поперечного сечения при охлаждении не наблюдалось.

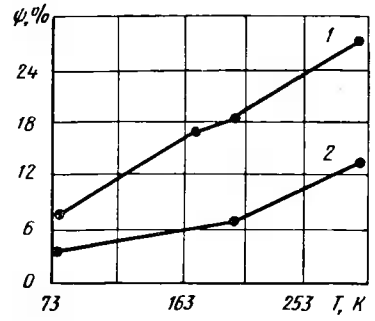


Рис. 45. Зависимость относительного сужения пористого железа от температуры:
1 — $П$ = 0,05; *2* — $П$ = 0,15

Для исследования влияния температуры на прочность металлов различной пористости [100] были выбраны следующие ма-

териалы: сплав железо-никель (10% никеля, остальное — железо), бронза (9% олова, остальное — медь) и бронзографит (9% олова, 3% графита, остальное — медь), технология получения которых описана в работах [98, 99]. Исследовано влияние температуры в диапазоне 293—78 К на предел прочности при растяжении, относительное сужение и относительное удлинение пористых образцов после разрушения.

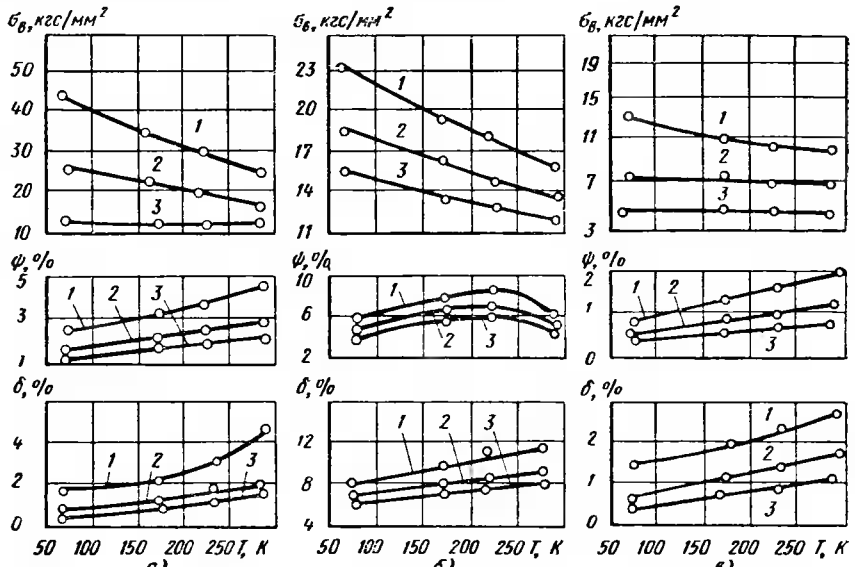


Рис. 46. Зависимость предела прочности и характеристик пластичности от температуры образцов различной пористости:

а — железо-никель (*1* — $П$=0,16; *2* — $П$=0,22; *3* — $П$=0,31); *б* — бронза (*1* — $П$=0,185; *2* — $П$=0,23; *3* — $П$=0,27); *в* — броизографит (*1* — $П$=0,17; *2* — $П$=0,26; *3* — $П$=0,36)

На рис. 46 показаны зависимости механических свойств железо-никеля, бронзы и бронзографита различной пористости от температуры. Для всех материалов при понижении температуры прочность монотонно повышается, причем для образцов малой пористости наблюдается более резкое увеличение прочности.

Пластические характеристики исследованных материалов изменяются неодинаково, своеобразную зависимость от температуры имеют характеристики пластичности пористой бронзы. Относительное сужение при снижении температуры от 230 К сначала возрастает примерно в 1,2—1,6 раза в зависимости от пористости, а при дальнейшем снижении температуры существенно уменьшается. При этом с увеличением пористости материала максимум на кривой относительное сужение — температура сглаживается. Относительное удлинение после разрыва монотонно уменьшается с понижением температуры. При увеличении пористости зависимость относительного удлинения от температуры становится более слабой и близкой к линейной. Пластичность железо-никеля и бронзографита с понижением температуры монотонно снижается, причем для малых значений пористости уменьшение более резкое, чем для больших.

Исследования прочности пористых материалов при повышенных температурах освещены в работе [114]. Испытания на изгиб при температуре до 1100° С проводили с пористым хромом, пористой сталью 20Х23Н18 и пористым сплавом Cr—30 Ni. Образцы из гранулированных порошков хрома и восстановленного порошка нержавеющей стали 20Х23Н18 спекали при температуре 1250° С, из гранулированных порошков сплава Cr — 30 Ni — при 1150° С.

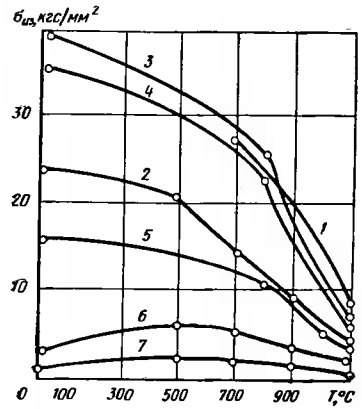


Рис. 47. Зависимость прочности на изгиб от температуры при нагревании пористых металлов:

1 — сплав Cr — 30 Ni, $П$=0,25, фракция — 300 ÷ + 150 мкм; *2* — сплав Cr — 30 Ni, $П$=0,28, фракция — 1000 + 500 мкм; *3* — сталь 20Х23Н18, $П$=0,25, фракция — 300 ÷ + 150 мкм; *4* — сталь 20Х23Н18, $П$=0,28, фракция — 300 ÷ + 150 мкм; *5* — сталь 20Х23Н18, $П$=43, фракция — 300÷+ 150 мкм; *6*—хром, $П$=0,25, фракция—500÷+ 300 мкм; *7*—хром, $П$=0,28, фракция—1000÷+500 мкм

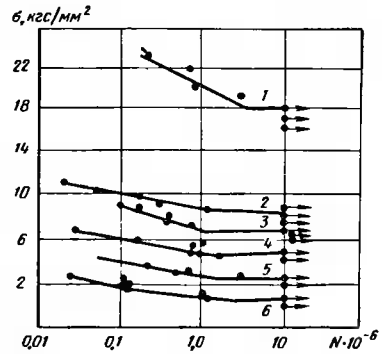


Рис. 48. Кривые усталости пористого железа при консольном изгибе с вращением:

1 — сталь 15, $П$=0; *2* — железо, $П$=0,15; *3* — железо, $П$=0,19; ***4* — железо — $П$=0,28;** *5* — железо, $П$=0,39; *6* — железо, $П$=0,60

Результаты испытаний пористых металлов на изгиб, проведенные на воздухе, приведены на рис. 47. Из графика видно, что у образцов из более мелких гранулированных порошков прочность выше. У образцов хрома наблюдается повышение прочности при температуре 500 и 700° С. Это связано с тем, что хром при низких температурах разрушается хрупко, поэтому после преодоления порога хрупкости (300—400° С) прочность увеличивается. Прочность образцов из сплава Cr — 30 Ni (при одинаковой пористости и фракции порошка) значительно

выше прочности образцов из гранулированного хрома. Вообще, легирование хрома никелем должно разупрочнять хром, но в действительности хром, рекристаллизованный при температуре 1200° С, имеет при комнатной температуре $\sigma_в = 8{,}4$ кгс/мм² и $\delta = 0$, а сплав Cr — 30 Ni, отожженный при 1100° С, имеет $\sigma_в = 100$ кгс/мм² и $\delta = 10\%$. Низкая прочность чистого хрома объясняется тем, что он разрушается, не достигнув предела текучести, т. е. хрупко, разрушению же сплава Cr — 30 Ni предшествует пластическая деформация. Повышение прочности на изгиб сплава Cr — 30 Ni по сравнению с хромом объясняется его более активным и качественным спеканием. При одинаковых пористости и фракции порошка прочность при высокой температуре образцов сплава Cr — 30 Ni лишь незначительно превышает прочность образцов из высоколегированной стали 20Х23Н18.

При исследовании прочностных характеристик пористого нихрома Х20Н80 установлено, что предел прочности на изгиб более чувствителен к изменению пористости, чем предел прочности на срез [19]. Так, с увеличением пористости от 0,10 до 0,30 предел прочности на изгиб уменьшается от 98 до 27 кгс/мм², в то время как предел прочности на срез уменьшается от 45 до 23 кгс/мм². В обоих случаях зависимость предела прочности от пористости линейная. Образцы пористого нихрома изготовлены прессованием порошка нихрома Х20Н80, полученного методом совместного восстановления окислов. Химический состав порошка: 21,3% Cr, 0,07% Si, 0,05% Mn, 0,06% C, 0,05% Ca, Ti — следы, Ni — остальное. Гранулометрический состав: < 50 мкм — 37%, от 50 до 63 мкм — 8%, от 63 до 100 мкм — 21, от 100 до 160 мкм — 20%, от 160 до 250 мкм — 9%, > 250 мкм — 5%. Спекание производили при температуре 1250° С в среде водорода в течение 1—3 ч.

Пористые металлы при эксплуатации могут подвергаться не только простым видам нагружения, но и сложному силовому воздействию. В связи с этим возникает необходимость исследовать прочностные характеристики пористых металлов при циклических и ударных нагрузках. В настоящее время исследования прочности пористых металлов при переменных нагрузках весьма ограничены, однако и они позволяют судить о способности пористых металлов работать в условиях знакопеременных нагрузок.

Для исследования усталостной прочности пористого железа образцы изготовляли из железного порошка марки АПЖМ. После прессования образцы спекали в среде водорода при температуре 1200° С в течение 2 ч. На рис. 48 представлены кривые усталости этих образцов. Для сравнения приведена кривая усталости стали 15. Кривые усталости пористого железа аналогичны кривым усталости стали. На них можно различить два участка: наклонный участок, определяющий число циклов до

разрушения в зависимости от напряжений, и горизонтальный участок, характеризующий достижение предела усталости. Излом усталостных кривых пористого железа находится в пределах $(1 \div 2) \cdot 10^6$ циклов, причем росту пористости от 0,15 до 0,50 соответствует увеличение числа циклов, определяющих положение точки излома (табл. 21).

Таблица 21

Зависимость предела прочности и предела усталости от пористости железа [110]

Пористость	Предел прочности $\sigma_в$, кгс/мм²	Предел усталости σ_{-1}, кгс/мм²	Положение точки излома $N \cdot 10^6$, циклов
0	35,0	17,5	0,5
0,15	19,0	8,75	1,0
0,19	17,0	7,0	1,0
0,28	11,4	4,8	1,7
0,39	6,6	2,7	1,6
0,50	3,5	1,3	2,0

Из данных, приведенных на рис. 48, видно, что наклон участков ограниченной выносливости зависит от пористости, уменьшаясь при увеличении пористости железа. Это хорошо согласуется с представлениями об уменьшении площадки межчастичных контактов при возрастании пористости.

В работе [110] зависимость предела усталости железа от пористости предлагается определять по эмпирической формуле

$$\sigma_{-1} = (\sigma_{-1})_0 \left(1 - \frac{П}{П_н}\right)^{m_1}, \qquad (142)$$

где $(\delta_{-1})_0$ — предел усталости компактного материала; $П_н = 0{,}783$ — пористость свободно насыпанного порошка железа; $m_1 = 2{,}7$ — константа.

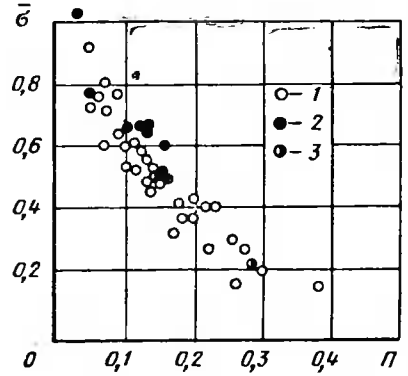


Рис. 49. Зависимость относительного предела усталости железа от пористости:

1 — растяжение-сжатие; *2* — кручение; *3* — изгиб с вращением

Авторы [110] рассмотрели вопрос о влиянии вида напряженного состояния на усталостную прочность железа. На рис. 49 представлена зависимость относительного предела усталости при кручении, растяжении-сжатии и изгибе от пористости железа. Экспериментальные данные показывают, что вид напряженного состояния слабо влияет на характер зависимости относительной усталостной прочности от пористости. В то же время абсолютные значения предела усталости при различных видах напряженного состояния отличаются так же существенно, как и у компактных материалов.

Большое разнообразие видов пористых металлов, а также наличие многих факторов, влияющих на прочностные характеристики пористых металлов, существенно затрудняют теоретическое определение прочности пористых металлов. Однако первые попытки в этом направлении уже сделаны. Так М. Ю. Бальшин [17] для определения предела прочности на растяжение для пористых материалов предлагает зависимость

$$\sigma_{вк} = \sigma_{бк}(1 - П)^{m_2}, \qquad (143)$$

где $\sigma_{вк}$ — предел прочности компактного материала; $m_2 = 3 \div 6$ — константа.

Автор работы [63] считает, что формула (143) содержит принципиальную неточность, поскольку предполагает нулевую прочность лишь при пористости 1,0, тогда как нулевой прочностью на растяжение обладает уже свободно насыпанный порошок. Поэтому предложена иная запись формулы М. Ю. Бальшина (m_3 — константа)

$$\sigma_{вк} = \sigma_{вк}\left(1 - \frac{П}{П_н}\right)^{m_3}. \qquad (144)$$

В работе [110] рассмотрено влияние пористости на прочность металлов. На основе предположения, что разрушение происходит в сечении, максимально ослабленном сферическими порами, и с учетом неоднородности распределения напряжений предложена формула для расчета предела прочности пористого металла в виде

$$\sigma_в = \sigma_{вк}\frac{1 - 1{,}5П}{1 + 1{,}5\beta П}, \qquad (145)$$

где β — параметр, учитывающий неоднородность распределения напряжений по сечению.

При выводе зависимости (145) принимали, что присутствие пор вносит дополнительное «разрыхление» сечения и снижает способность материала сопротивляться действию нагрузок. При $\beta = 2$ теоретические значения прочности, рассчитанные по формуле (145), совпадают с экспериментальными данными для прочности пористого железа, если $П = 0{,}1 \div 0{,}4$. Параметр β должен зависеть от условий спекания (температуры, среды и времени) и характеристик исходных порошков (размер и форма частиц), т. е. должен зависеть от размеров и формы пор. Формула (145) действительна только до пористости 0,66, при $П \geqslant {}^2/_3$ значения прочности обращаются в нуль или становятся отрицательными.

Сравнение расчетных зависимостей (144) и (145) с экспериментальными значениями предела прочности на растяжение для пористого железа приведено в работе [63]. Для исследований были взяты образцы пористого железа, изготовленные прессованием порошка железа марки АПЖМ.

Технология изготовления образцов аналогична принятой в работе [83].

На рис. 50 показаны расчетные и экспериментальные значения предела прочности на растяжение и предела текучести пористого железа. При расчете предела прочности по формулам (144) и (145) принято: $\sigma_{вк} = 35{,}0$ кгс/мм^2; $m_3 = 2{,}5$; $\beta = 2$. Сравнение расчетных и экспериментальных значений предела прочности на растяжение показывает их хорошую сходимость при изменении пористости железа в пределах 0,1—0,5. Хорошую сходимость с расчетными зависимостями имеют и экспериментальные значения предела прочности на растяжение пористого железа, полученные в ряде других исследований.

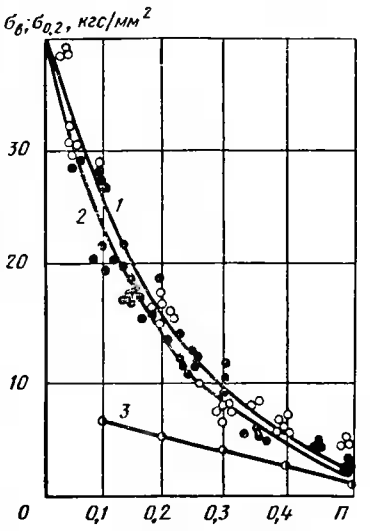


Рис. 50. Зависимость предела прочности на растяжение и предела текучести при остаточном удлинении 0,2% от пористости железа:

светлые кружки — спекание при 1200° С в течение 1 ч; черные кружки — спекание при 1200° С в течение 2 ч; *1* — кривая по формуле (144); *2* — кривая по формуле (145); *3* — предел текучести

Формулы (143)—(145) позволяют определять лишь значение предела прочности на растяжение при изменении пористости металла в нормальных температурных условиях. И. М. Сторожевский [101] предлагает обобщенную зависимость для расчета пределов прочности на растяжение, срез, изгиб и кручение при различных температурных условиях в следующем виде:

$$\sigma = \sigma_{ко}\frac{1 - B_т П^{2/3}}{1 + \beta B_т П^{2/3}}, \qquad (146)$$

где σ — предел прочности пористого металла; $\sigma_{ко}$ — предел прочности компактного металла при нормальной температуре; $B_т$ — параметр, зависящий от формы пор, изменения пористости при разрушении, а также от температуры пористого металла. Температурную зависимость параметра $B_т$ предлагается учитывать по формуле

$$B_т = B_{20} - к(293 - T), \qquad (147)$$

где B_{20} — значение параметра при 20° С; $к = 2{,}79 \cdot 10^{-4}$ — коэффициент; T — температура пористого металла, К.

Экспериментальные значения параметров $B_т$ и β для различных пористых металлов приведены в табл. 22.

Таблица 22

Значения параметров $B_т$ и β для различных металлов

Пористый металл	Вид деформации	$\sigma_{ко}$ или $\tau_{ко}$, кгс/мм²	$B_т$	β
Железо	Срез	36,5	0,15	0,15
	Растяжение	55,0	1,5	1,42
	Кручение	43,4	1,5	1,42
	Изгиб	66,0	1,5	1,42
Никель	Растяжение	36,0	1,25	0,5
Железо—медь—никель (4% Ni, 3% Cu, остальное Fe)		79,0	1,25	0,5
Железо—кремний (2,5% Si, остальное Fe)		44,5	1,39	0
Сталь 12Х18Н9, нормализация от 1300° С	Срез	85,5	1,3	0
Сталь 15Х28, охлаждение в воду от 1200° С		50,0	1,0	0
Сталь 15Х28, охлаждение с муфелем от 1200° С		48,5	1,0	0
Сталь 12Х18Н9, отпуск при 650° С, 1 ч		60,0	1,7	0,75
Сталь 20Х23Н18, отпуск при 700° С, 2 ч		67,4	1,6	0,5
Сталь 20Х23Н18, охлаждение с муфелем от 1200° С,		49,0	1,75	0,75
Сталь 15Х28, нормализация от 1200° С, отпуск 500 и 700° С		40,5	1,45	0,7

На рис. 51 показана зависимость модуля упругости от пористости железа, спеченного из восстановленного порошка при температуре 1200° С в течение 2 и 3 ч. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются формулой

$$E = E_к (1 - П)^{m_4}, \qquad (148)$$

где E и $E_к$ — модули упругости пористого и компактного металлов; $m_4 = 3$ — константа.

Теплопроводность тел при изменении их пористости можно определять по формуле В. И. Оделевского

$$\lambda = \lambda_к (1 - 1{,}5П), \qquad (149)$$

где λ и $\lambda_к$ — коэффициент теплопроводности пористого и компактного металлов.

Формула (149) получена для статистических смесей и действительна лишь до пористости 0,66. Для более пористых тел этим выражением пользоваться нельзя, так как расчетные значения коэффициента теплопроводности обращаются в нуль или становятся отрицательными. Формула (149) справедлива для определения коэффициента теплопроводности пористых тел с совершенными контактами, т. е. для тел, у которых отсутствуют контактные явления, и когда размеры контактов соизмеримы с размерами частиц.

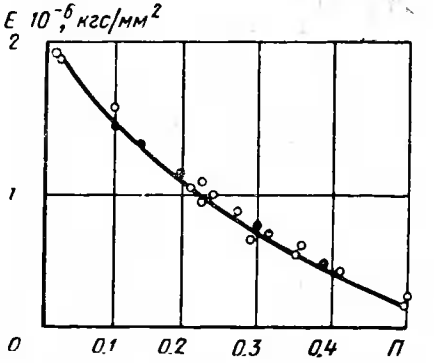


Рис. 51. Зависимость модуля упругости от пористости железа по формуле (148):

светлые кружки — спекание при 1200° С в течение 2 ч; черные кружки — спекание при 1200° С в течение 3 ч

В большинстве случаев пористые металлы в спеченном состоянии не обладают совершенными контактами. Для пористых металлов, изготовленных из сферических порошков, отношение диаметра межчастичного контакта к радиусу частицы составляет 0,2—0,5, тогда как для пористой нержавеющей стали, изготовленной из восстановленных порошков, эта величина колеблется примерно от 0,6 до 0,9. Таким образом, формулу (149) для расчета коэффициента теплопроводности пористых металлов нельзя применять без соответствующей экспериментальной проверки.

Перенос теплоты в пористых телах может осуществляться за счет контактной теплопроводности, конвекции и излучения. В большинстве случаев преобладающим механизмом переноса теплоты в пористых телах является контактная теплопроводность, однако при высоких температурах может существенно повыситься роль излучения. Изменение механизма переноса теплоты может повлиять на сходимость экспериментальных значений коэффициента теплопроводности с рассчитанными по формуле (149).

Явления электропроводности и теплопроводности, имеющие одинаковую физическую сущность, обычно описываются одними и теми же аналитическими зависимостями для компактных

материалов. Эта закономерность сохраняется и для пористых сред, поэтому зависимость (149) может быть использована и для расчета электропроводности металлов при изменении их пористости. Электропроводность металлов, так же как и теплопроводность, во многом определяется совершенством межчастичных контактов.

В работе [72] описано исследование температурной зависимости коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления пористого вольфрама в интервале температур 20—1200° С. Вольфрамовые образцы изготовляли из частиц со средним размером 3 мкм, пористость образцов изменялась от 0 до 0,45. Опытные значения коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления удовлетворительно согласуются с их расчетными значениями, полученными по формуле В. И. Оделевского. Однако совпадение экспериментальных и расчетных значений указанных параметров наблюдается для образцов с пористостью не выше 0,40. Дальнейшее увеличение пористости вольфрама приводит к значительным рассогласованиям расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления.

В результате исследования теплопроводности и электропроводности никеля, железа и стали 14Х17Н2 различной пористости в широком интервале температур получены температурные зависимости коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления образцов различной пористости (рис. 52, табл. 23). Для пористого железа ПЖ2М и ПЖ4М получены

Таблица 23

Температурная зависимость удельного электросопротивления (ρ, мкОм·см) железа, никеля и стали 14Х17Н2 [105]

T, °C	Железо ПЖ4М					Никель					Сталь 14Х17Н2		
	Пористость												
	0	0,22	0,32	0,42	0,50	0	0,22	0,27	0,35	0,4	0,30	0,40	0,50
100	15	24	36	52	80	14	16	21	28	44	160	280	448
200	22	36	54	72	116	20	26	33	42	65	172	292	480
300	32	54	72	96	157	27	35	44	55	84	182	305	506
400	44	72	96	130	208	32	44	53	67	101	192	318	532
500	56	96	122	168	266	37	51	62	77	115	204	332	558
600	70	120	152	215	336	41	57	69	86	127	214	344	580
700	87	150	188	268	416	44	61	75	94	137	224	356	604
800	104	180	228	330	500	47	65	80	101	146	232	368	626
900	111	190	248	344	524	48	67	84	107	154	238	380	640

одинаковые значения коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления. Температурные зависимости показывают, что с увеличением пористости коэффициент теплопроводности всех материалов уменьшается, а удельное электросопротивление растет. Характер температурной зависимости исследуемых параметров металлов различной пористости такой же, как и для соответствующего компактного металла. В температурной зависимости удельного электросопротивления наблюдается нелинейность, особенно заметная у железа, что, очевидно, обусловлено переходом его из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Сравнение экспериментальных значений коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления с расчетными,

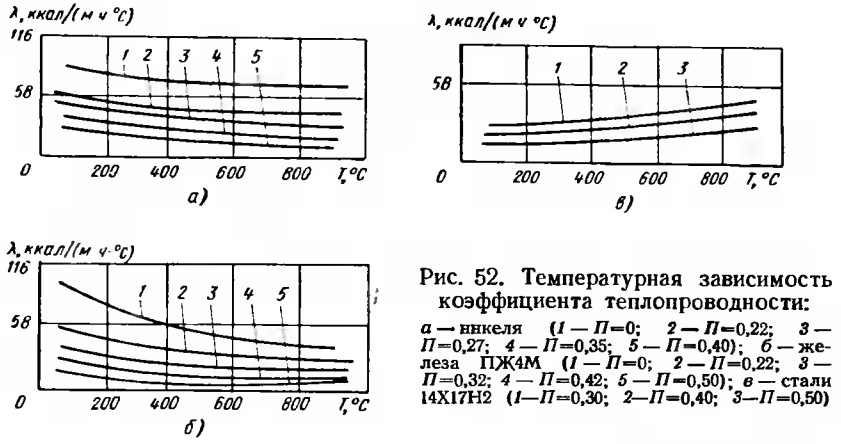


Рис. 52. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности:
а — никеля (*1* — *П*=0; *2* — *П*=0,22; *3* — *П*=0,27; *4* — *П*=0,35; *5* — *П*=0,40); *б* — железа ПЖ4М (*1* — *П*=0; *2* — *П*=0,22; *3* — *П*=0,32; *4* — *П*=0,42; *5* — *П*=0,50); *в* — стали 14Х17Н2 (*1*—*П*=0,30; *2*—*П*=0,40; *3*—*П*=0,50)

полученными по формулам обобщенной проводимости, показало, что наилучшее совпадение с экспериментом дает формула (149).

В работе [5] рассмотрено влияние пористости и температуры железа из сулинского порошка АМ на коэффициент теплопроводности при средней температуре образцов 78,3° С:

Пористость	0,109	0,201	0,259	0,329	0,422	0,556
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°С) .	42,2	34,48	29,74	24,41	16,56	7,06

Экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности и рассчитанные по формуле (149) практически одинаковы. Однако не для всех пористых металлов наблюдается сходимость экспериментальных значений коэффициента теплопроводности с расчетными значениями, полученными по формуле В. И. Оделевского.

В работе [78] рассмотрено исследование температурной зависимости коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления пористости вольфрама и пористого вольфрамомолибдена при изменении температур от 200 до 1200° С. Опыты проводили с образцами, пористость которых изменялась от 0,15 до 0,55. Порошки вольфрама или сплава W—Mo замеши-

вали с технологической связкой (раствор парафина в бензине), после чего прессовали заготовки гидростатическим методом. Заготовки спекали при температуре 2100° С для вольфрама и при 1800° С для сплава W—Mo. Различная пористость образцов достигалась за счет изменения технологических режимов изготовления — количества вводимой связки, давления прессования, температуры и продолжительности спекания. Все образцы изготовляли из порошка с размером частиц до 3 мкм.

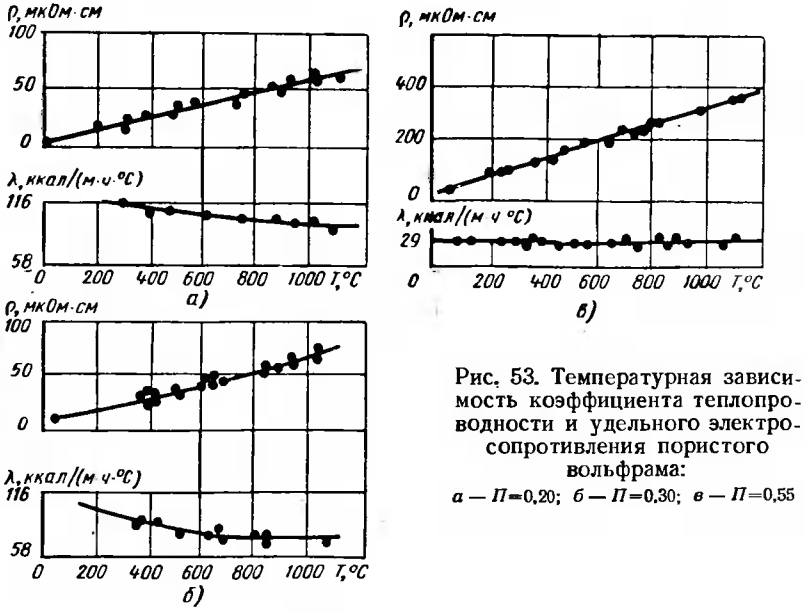


Рис. 53. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления пористого вольфрама:
а — $П$=0,20; *б* — $П$=0,30; *в* — $П$=0,55

Результаты измерения коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления для пористого вольфрама приведены на рис. 53, а для пористого сплава W—Mo — в табл. 24.

Таблица 24

Коэффициент теплопроводности λ (ккал/(м·ч·°С) и удельное электросопротнвление ρ (мкОм·см) пористых сплавов

Т, °С	0,25% W — 0,75% Mo пористость 0,10		0,50% W — 0,50% Mo пористость 0,20		0,75% W — 0,25% Mo пористость 0,15	
	λ	ρ	λ	ρ	λ	ρ
200	140	12,5	116	15,0	125,2	7,0
400	125	16,5	98,5	21,5	113	16,5
600	113	21,8	83,5	28,5	98,5	26,5
800	102	28,0	73,5	35,5	92,8	35,5
1000	90,5	34,5	59,2	42,2	81,2	44,7
1200	79	41,5	48,8	49,2	76,5	54,0

Как следует из полученных данных, коэффициент теплопроводности уменьшается почти на порядок с увеличением пористости от 0,15 до 0,55.

Согласно полученным данным зависимость коэффициента теплопроводности от пористости W в интервале температур 200—1200° С может быть описана эмпирической формулой

$$\lambda = \lambda_к (1 - 1{,}7П). \qquad (150)$$

Коэффициент теплопроводности компактного сплава W—Mo в зависимости от его состава изменяется примерно аддитивно содержанию компонентов и может рассчитываться по формуле

$$\lambda_{сп} = \eta\lambda_W + (1 - \eta)\lambda_{Mo}, \qquad (151)$$

где $\lambda_{сп}$ — коэффициент теплопроводности сплава; λ_W и λ_{Mo} — коэффициент теплопроводности компактного вольфрама и молибдена; η — содержание вольфрама.

Для приближенных расчетов коэффициента теплопроводности пористого сплава W—Mo получена эмпирическая зависимость

$$\lambda = [\eta\lambda_W + (1 - \eta)\lambda_{Mo}](1 - 1{,}7П). \qquad (152)$$

Расхождения между экспериментальными и рассчитанными по формуле (152) значениями коэффициента теплопроводности составляют 10—15%.

Удельное электросопротивление пористого W и пористого сплава W—Mo растет с повышением температуры тем быстрее, чем выше пористость. Поскольку удельные сопротивления вольфрама и молибдена почти одинаковы и зависимости от температуры у них подобны, то изменения удельного сопротивления с повышением температуры происходят практически одинаково как для пористого W, так и для пористого сплава W—Mo.

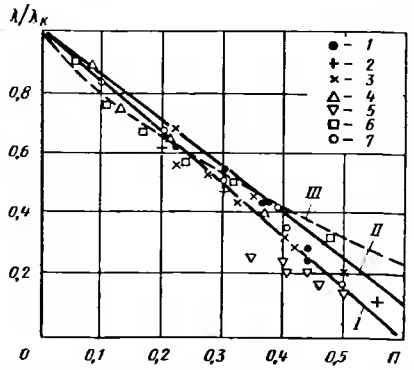


Рис. 54. Зависимость относительного коэффициента теплопроводности от пористости металлов:
I — по формуле (150); *II* — по формуле (149) *III* — по формуле (153); *1* — данные работы (72); *2* — данные работы [78]; *3* — данные работы [105]; *4*— данные работы [10]; *5* — данные работы [104]; *6* — данные работы [62]; *7* — данные работы [5]

Для сравнения на рис. 54 приведены значения относительного коэффициента теплопроводности от пористости металлов, полученные в работах [5, 72, 78, 105]. Как видно из рис. 54, расхождение между значениями коэффициента теплопроводности, рассчитанными по формулам (149) и (150), невелико, особенно для металлов малой пористости (менее $П$=0,3).

Существенное отличие от зависимостей (149) и (150) имеют значения коэффициента теплопроводности пористого молибдена [10] и особенно пористого титана [104].

В работе [10] рассмотрено исследование тепло- и электропроводности компактного и пористого молибдена в диапазоне температур 400—1200 К. Пористость образцов молибдена со-

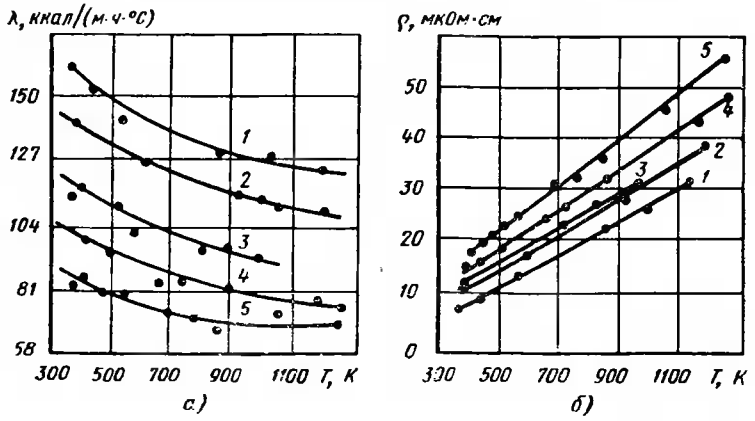


Рис. 55. Зависимость коэффициента теплопроводности (*а*) и удельного электросопротивления (*б*) пористого молибдена от температуры:

1 — П=0; 2 — П=0,088; 3 — П=0,12; 4 — П=0,21; 5 — П=0,36

ставляла 0,088; 0,12; 0,21 и 0,36. На рис. 55 приведены температурные зависимости коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления исследованных образцов. Как и следовало ожидать, теплопроводность с увеличением пористости молибдена уменьшается, а удельное электросопротивление растет, причем характер температурных зависимостей такой же, как и для компактного материала. Для расчета коэффициента теплопроводности пористого молибдена авторы рекомендуют формулу В. И. Оделевского, справедливую для матричной системы (плоская задача):

$$\lambda = \lambda_к \frac{1-П}{1+П}. \qquad (153)$$

Удовлетворительно согласуются с формулой (153) и экспериментальные значения коэффициента теплопроводности пористого железа, полученные в работе [62]. В работе [62] исследована теплопроводность образцов пористого железа, изготовленных прессованием порошка ПЖ1М1 (ГОСТ 9849—61) с последующим спеканием в среде осушенного водорода при температуре 1150° С в течение 2 ч. Пористость образцов изменялась от 0,24 до 0,48. Коэффициент теплопроводности пористого железа

определен в интервале температур 20—250° С. Результаты опытов приведены для сравнения на рис. 54.

Изучено влияние пористости и температуры на теплопроводность и электропроводность пористого титана [104]. Исследования проводили на образцах диаметром 10 и высотой 25 мм при изменении пористости от 0,30 до 0,50. Образцы изготовляли из порошка электролитического титана двух фракций: первая с размером зерна 1000—250 и вторая — меньше 250 мкм. Образцы спекали в остроосушенном аргоне при температуре 1100° С в течение 2 ч. Как и для других металлов, коэффициент теплопроводности увеличивается с уменьшением пористости, причем характер температурной зависимости для пористого и компактного титана одинаков. Теплопроводность пористого титана определена до температуры 850° С. Выше показано, что зависимость коэффициента теплопроводности от пористости металлов в широком интервале изменения пористости и температуры удовлетворительно описывается формулами В. И. Оделевского. Однако для исследованных образцов пористого титана, как видно из рис. 54, ни одна из формул обобщенной проводимости не подходит.

Исследованием изменения удельного электросопротивления в зависимости от температуры компактного и пористого титана установлено, что как и теплопроводность, электропроводимость убывает с ростом пористости [104]. Характер зависимости электропроводимости от температуры для образцов, изготовленных из порошков различных фракций, неодинаков. В частности, для образцов из более крупного порошка кривые температурной зависимости удельного электросопротивления идут более круто, чем для образцов из мелкодисперсного порошка. Электросопротивление, так же как и теплопроводность, определяли только до температуры 850° С, так как при этой температуре Ti дополнительно спекается, что вызывает необратимые изменения физических параметров образцов. Как известно, при температуре 882° С в титане происходят $\alpha \rightleftarrows \beta$-фазовые превращения, которые в разной степени влияют на исследованные свойства. В частности, электропроводимость испытывает при этой температуре существенные изменения, а коэффициент теплопроводности в области фазового перехода заметно не изменяется.

Зависимость удельного сопротивления от пористости Ti не подчиняется известному соотношению В. И. Оделевского. Это, по-видимому, объясняется тем, что для приготовления образцов Ti использованы крупнозернистые порошки (1000—100 мкм), не обеспечивающие в процессе спекания достаточно однородную структуру.

Дополнительной иллюстрацией существенного влияния структуры пористого металла на его проводимость являются экспериментальные данные, полученные в работе [96], где изучено удельное электросопротивление пористых образцов, изготовленных из порошков электролитического хрома. Для приготовления

пористых брикетов и пористых цилиндров были использованы три фракции порошка хрома со средним размером частиц 200, 300 и 400 мкм. Металлографические исследования показали, что частицы порошка фракции 200 мкм относительно близки к равноосным, а в порошках фракций 300 и 400 мкм преобладают частицы чешуйчатой и пластинчатой формы. Образцы спекали в среде водорода при температуре 1200—1250°С и выдержке в течение 2 ч. Пористость полученных образцов изменялась от 0,15 до 0,50.

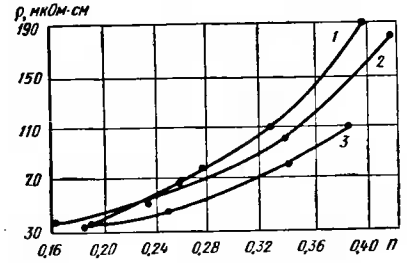


Рис. 56. Зависимость удельного электросопротивления от пористости образцов, изготовленных из частиц электролитического хрома различных фракций:
1 — 200 мкм; *2* — 400 мкм; *3* — 300 мкм

На рис. 56 представлены результаты измерения удельного электросопротивления хрома при различных значениях пористости. Обращает внимание более низкое удельное электросопротивление образцов, изготовленных из частиц размером 300 мкм, в сравнении с образцами из порошка 200 мкм. Зависимость удельного электросопротивления от размера и формы частиц для спеченных образцов свидетельствует о наличии контактного электросопротивления, т. е. о несовершенстве межчастичных контактов, которое наблюдается при спекании в интервале температур 1200—1250°С столь крупных порошков металла с высокой температурой плавления. Уменьшение удельного электросопротивления образцов из более крупного порошка связано с уменьшением контактного сопротивления из-за продольного расположения частиц — чешуек фракции 300 мкм при прессовании.

Величина относительного электросопротивления, в какой-то степени характеризующая относительный размер межчастичных контактов, не превышала в опытах 0,53.

По экспериментальным значениям коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления в ряде работ [10, 72, 78, 105] рассчитаны значения числа Лоренца для пористых металлов. Очевидно, его значение не должно зависеть от пористости, если поры не принимают участия в тепло- и электропереносе. Это предположение подтверждается экспериментально, поскольку зависимость числа Лоренца от температуры в диапазоне 20—900° С практически отсутствует для всех исследованных пористых и компактных металлов. Это свидетельствует о том, что в процессе нагрева тепловые и электрические контакты между частицами не изменяются. Оба эти обстоятельства позволяют вычислять коэффициент теплопроводности и удельное электросопротивление металлов любой пористости и при любой температуре, зная для них только значение числа Лоренца и температурную зависимость удельного электросопротивления в компактном состоянии или какой-то одной пористости. Благодаря этому отпадает необходимость в проведении громоздких экспериментов по определению температурной зависимости коэффициента теплопроводности пористых металлов.

В работах [5, 9] рассмотрен вопрос о влиянии пористости и температуры на теплоемкость пористых металлов. Авторы, считая теплоемкость аддитивным свойством, предлагают зависимость для расчета теплоемкости пористого металла определять по известной теплоемкости компактного материала и его пористости в виде

$$C = C_к(1 - П), \qquad (154)$$

где C и $C_к$ — теплоемкость пористого и компактного металлов. Экспериментальных данных, подтверждающих зависимость (154), автору, к сожалению, найти не удалось.

Экспериментальные исследования [78 и 104], результаты которых приведены на рис. 57, 58, показывают, что коэффициент

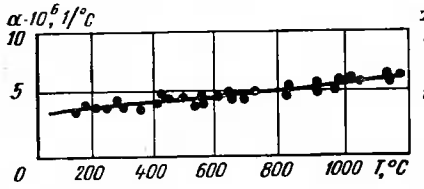


Рис. 57. Температурная зависимость коэффициента термического расширения пористого вольфрама

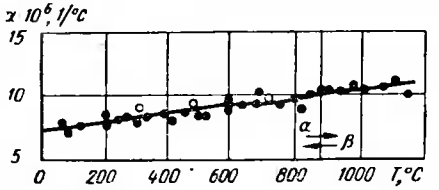


Рис. 58. Температурная зависимость коэффициента термического расширения компактного (светлые кружки) и пористого (черные кружки) титана

термического расширения пористых металлов не зависит от пористости и слабо зависит от температуры, линейно увеличиваясь с ее ростом. Температурные зависимости коэффициента термического расширения компактного и пористого металла одинаковы.

В работе [104] показано, что влияние $\alpha \rightleftarrows \beta$-фазового превращения титана на коэффициент термического расширения невелико. Авторы считают, что возможные изменения коэффициента термического расширения из-за фазового превращения укладываются в точность эксперимента, составляющую 5%.

3. ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Агрессивные жидкости и газы, а иногда и твердые частицы, могут оказывать коррозионное воздействие на поверхность пор и межчастичные контакты пористых металлов. Коррозионное

разрушение пористых металлов отличается от коррозионного разрушения компактного тела того же химического состава. В отличие от компактного тела, где коррозионное разрушение, как правило, происходит на поверхности, коррозия пористого металла протекает по всему поровому объему. Из общих соображений следует, что коррозионная стойкость пористых металлов вследствие более развитой поверхности ниже, чем у компактных. Поверхность пор, как правило, неоднородна, что также способствует более интенсивной коррозии.

При коррозионных испытаниях пористых металлов возникают затруднения в выборе показателя коррозии. Применяемый для беспористых металлов метод оценки изменения массы образца при коррозии оказывается для пористых объектов весьма неточным из-за трудности удаления продуктов коррозии из пор. В настоящее время в практике коррозионных испытаний высокопористых образцов чаще всего применяют метод измерения электросопротивления или механической прочности образцов. Оба метода основаны на решающем влиянии на свойства пористых металлов состояния контактов между частицами порошка, составляющими пористое тело. Зная, например, удельное электросопротивление пористого образца, можно вычислить относительную электропроводность металла и по характеру ее изменения при коррозии оценить ресурс работы пористого металла в коррозионной среде. Эти методы оценки коррозионной стойкости пористого металла использованы в работах [13, 81] и ряде других.

Таблица 25

Срок службы фильтров из нержавеющей стали в растворах кислот и щелочей по данным работы [9]

Среда	Концентрация, %	Срок службы
HNO_3	68	20 лет
HNO_3	10	30 лет
H_2SO_4	96	1,3 года
H_2SO_4	10	3 недели
HCl	37	5 ч
HCl	1	4 недели
HPO_3	85	20 лет
HPO_3	10	40 недель
NaOH	40	10 лет

Коррозионная стойкость пористых фильтров из нержавеющей стали характеризуется данными, приведенными в табл. 25.

В пассивирующих средах (HNO_3, концентрированные HPO_3 и H_2SO_4, NaOH) срок службы пористой нержавеющей стали, изготовленной из распыленных порошков, довольно велик и исчисляется десятками лет.

Исследование коррозионной стойкости пористых нержавеющих сталей 20Х23Н18, 14Х17Н2, 12Х18Н9 и 12Х18Н10Т, изготовленных из восстановленных порошков, проведено в работе [9]. В качестве критерия оценки коррозионной стойкости сталей принято изменение удельного электросопротивления. Помимо этого, калориметрическим и объемным методами определено количество железа, перешедшего в раствор. В результате опытов

установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью из исследованных обладает аустенитная сталь 20Х23Н18. Самую низкую коррозионную стойкость проявили образцы стали 12Х18Н10Т. Коррозионная стойкость сталей 14Х17Н2 и 12Х18Н9 примерно одинакова. Самым агрессивным оказался 10%-ный раствор H_2SO_4. Растворимость пористых нержавеющих сталей в растворах NaOH и в воде невелика.

Таблица 26

Прочность пористых образцов до испытаний и после испытаний в течение 2000 ч в различных средах

Среда	Предел прочности на срез, кгс/мм²			
	11Х12Н2	12Х23Н18	12Х18Н9	12Х18Н10Т
До коррозионного испытания	22	20	23	18
10%-ная HNO_3	8	15	8	5,5
50%-ная HNO_3	14	16	19	17
Концентрированная HNO_3	15	12,5	13	4,5
10%-ный NaOH	21	18	22,5	11,5
H_2O	19,5	16	21	10,5

В табл. 26 приведены показатели прочности образцов, прошедших коррозионные испытания [9]. Наиболее низкой прочностью обладают образцы пористых металлов после испытаний в 10%-ном и концентрированном растворах HNO_3. Пребывание образцов в растворе NaOH и в воде, за исключением стали 12Х18Н10Т, не повлияло существенно на изменение прочности. Измерить прочность образцов, испытывавшихся в растворе H_2SO_4 не удалось: после 500—1000 ч образцы практически рассыпались. По результатам опытов автор работы [9] считает, что при определении ресурса работы пористых металлов из несферических частиц в агрессивных средах следует ограничиться предельными значениями отношения радиуса межчастичного контакта к радиусу частиц, равными 0,4—0,5 от начальной величины этого отношения. В противном случае прочность образцов будет катастрофически снижаться.

В табл. 27 показано влияние режимов термической обработки на изменение удельного электросопротивления в результате травления пористых сталей 12Х18Н10Т, 14Х17Н2 (восстановленные порошки) и 12Х18Н9С2 (распыленный порошок). Данные табл. 26 показывают, что, как и для компактных сталей, режимы термической обработки существенно влияют на стойкость пористых нержавеющих сталей против коррозии. Для стали 14Х17Н2 самым благоприятным оказывается закалка образцов, а для остальных — нормализация. Механические свойства пористых образцов, обработанных таким образом, оказались выше примерно на 20%.

Таблица 27

Влияние режимов термической обработки в среде водорода на изменение удельного электросопротивления после травления пористых образцов в водном растворе 20%-ной HNO_3 + 1%-ный NaF

Режим термообработки после спекания	Удельное электросопротивление, мкОм·см								
	12Х18Н10Т, пористость 0,40			12Х18Н9С2, пористость 0,35			14Х17Н2, пористость 0,40		
	После термообработки	После травления	Δρ, %	После термообработки	После травления	Δρ, %	После термообработки	После травления	Δρ, %
Охлаждение с печью с $T = 1200°$ С	232	250	8	290	378	30	240	377	57
Нормализация с $T = 1200°$ С	246	252	2	390	390	0	227	280	24
Закалка в воду $T = 1000 \div 1100°$ С . .	232	260	12	317	317	3	241	278	15
Отжиг при $T = 650°$ С	246	930	280	394	394	230	—	—	—

Коррозионная стойкость пористых хрома, никеля, сплава Cr—30 Ni и нержавеющей стали 20Х23Н18 при воздействии 10%-ными растворами HNO_3, H_2SO_4 и HCl кислот в условиях комнатных температур исследована в работе [114]. Пористость всех образцов составляла 0,35. Стойкость против коррозии оценивали по увеличению электросопротивления пористых образцов при травлении в течение 25 ч. В результате опытов (рис. 59) установлено, что у легко пассивирующихся материалов (Cr, сплав Cr—30 Ni и сталь 20Х23Н18) электросопротивление после травления в HNO_3 практически не увеличилось, образцы же из Ni интенсивно растворялись в HNO_3. В растворе H_2SO_4 образцы из гранулированных порошков хрома растворялись очень быстро, у образцов из мелких порошков Cr и Ni значительно увеличилось электросопротивление после травления, образцы же из гранулированных порошков сплава Cr—30 Ni и мелкого порошка стали 20Х23Н18 показали хорошую стойкость. Испытаниями установлено, что все исследованные материалы интенсивно растворяются в 10%-ной соляной кислоте.

Исследования коррозионной стойкости пористой бронзы показали, что в растворах серной, соляной и азотной кислот, а также в растворах поваренной соли и едкого натра образцы пористой бронзы не уступали по стойкости в указанных средах компактной бронзе. Только в концентрированной H_2SO_4 скорость коррозии пористой бронзы оказалась выше.

В работе [13] изучалась коррозионная стойкость пористых титановых образцов в соляной и серной кислотах, а также в едком натре. Как известно, Ti обладает невысокой коррозионной

стойкостью в растворах соляной и серной кислот. Многочисленными работами показано, что в этих кислотах Ti сохраняет устойчивость лишь до концентрации кислоты 5% при температуре 20° С. В более концентрированных кислотах титан быстро растворяется. Поэтому для исследований были использованы

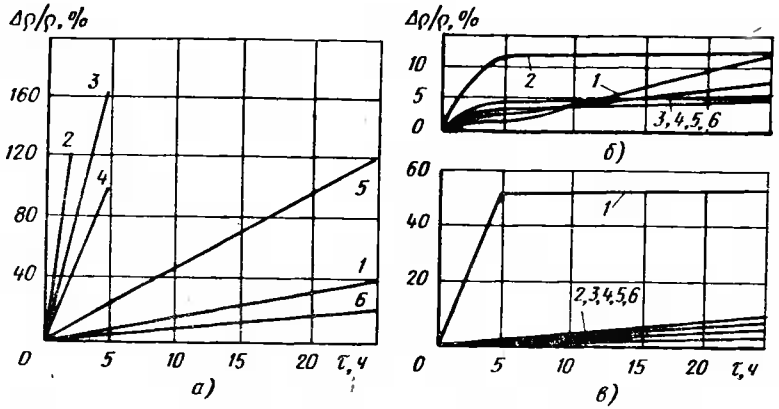


Рис. 59. Зависимость увеличения удельного электросопротивления пористых металлов от времени травления в 10%-ных растворах соляной (*а*), серной (*б*) и азотной (*в*) кислот:

1 — никель карбонильный; *2* — хром фракции < 5 мкм; *3* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 1000÷+500 мкм; *4* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 500÷+300 мкм; *5* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 300÷+150 мкм; *6* — сталь 20Х23Н18 фракции < 40 мкм

пористые титановые образцы, подвергнутые азотированию и изготовленные из порошка титана, легированного палладием.

Результаты исследований показали, что пористые титановые образцы, изготовленные из электролитического порошка марки ТЭР-155 с размером частиц — 100 ÷ + 250 мкм пористостью 0,30, имеют невысокую коррозионную стойкость в растворах 40%-ной H_2SO_4 и 20%-ной HCl кислот при температуре 20° С. Пористые образцы, азотированные при температуре 850° С в течение 30 мин, практически не отличаются по коррозионной стойкости от неазотированных. Азотирование пористых образцов при температуре 850° С в течение 8 ч существенно повышает их устойчивость против действия 20%-ной HCl. После 600 ч испытаний удельное электросопротивление образцов увеличилось незначительно, их поверхность оставалась блестящей. Стойкость азотированных образцов в 40%-ной H_2SO_4 практически не отличалась от стойкости пористых образцов из чистого титана.

Легирование поверхности частиц порошка титана 2; 0,2 и 0,1% палладия, производимое из раствора $PdCl_2$, пассивирует материал образцов в растворе 20%-ной HCl и они не корродируют в ней при температуре 20° С и выдержке до 600 ч. Об-

разцы, содержащие 0,05% Pd, начинают корродировать после 400 ч выдержки в кислоте. В растворе 40%-ной H_2SO_4 пассивное состояние образцов достигается введением в порошок Ti от 2 до 0,2% Pd. Дальнейшее уменьшение добавки палладия до 0,1 и 0,05% снижает коррозионную стойкость образцов. Все исследованные образцы пористого титана полностью коррозионно устойчивы в растворе 30%-ного едкого натра.

Дальнейшие исследования, выполненные в работе [15], показали, что легирование палладием эффективно защищает пористый титан в растворах HCl и H_2SO_4 лишь при температуре 20° С. При повышении же температуры коррозионная стойкость пористого палладированного титана быстро снижается. Так, например, в 20%-ном растворе HCl при температуре 100° С образцы размерами 4×5×40 мм, содержащие 0,2% Pd, полностью растворяются за 30—40 мин.

В настоящее время считается, что эффективным способом защиты Ti от коррозии в горячих растворах неокислительных кислот (HCl, H_2SO_4, HPO_3) является легирование его металлами, изменяющими его анодные характеристики, прежде всего Mo.

В работе [15] рассмотрена технология получения и свойства пористого сплава Ti—Mo, предназначенного для работы в горячих растворах неокислительных кислот. Рассмотрены две технологии изготовления пористых изделий из сплава Ti—30Mo. Первая из них предусматривает спекание спрессованных образцов в среде аргона при температуре 1200° С и выдержке в течение 2 ч. После спекания образцы помещали на 2 ч в 20%-ный раствор HCl, нагретый до 100° С. Частицы сплава Ti—30 Mo получены механическим дроблением ленты и имеют размер от 100 до 1000 мкм. Способ укрупнения тонких порошков прокаткой и последующим дроблением ленты имеет существенные недостатки, главный из которых состоит в малом выходе (не более 20%) порошка укрупненной фракции.

В другом варианте технологии для получения порошков необходимой крупности применяли диффузионное насыщение порошка электролитического титана с размером частиц 250—1000 мкм молибденом из твердой фазы. Для этого смесь порошков Ti и Mo нагревали в среде аргона заданное время, после чего спек дробили и частицы порошка Mo, не спекшиеся с частицами Ti, отсеивали. Из обработанного таким способом порошка Ti прессовали и спекали пористые образцы. Температура спекания 1200° С, выдержка 2 ч. Свойства пористого сплава Ti—30 Mo до и после испытаний в 20%-ном растворе HCl при температуре 100° С в течение 2 ч приведены в табл. 28.

Как следует из табл. 28 свойства сплава Ti-30Mo до и после испытаний в 20%-ном растворе HCl практически не изменились, что позволяет рекомендовать их для работы в условиях горячих растворов неокислительных кислот.

Таблица 28

Свойства пористого сплава Ti — 30Mo

Способ получения порошка	Размер частиц, мкм	Пористость	После спекания			После обработки *НС*		
			Удельное сопротивление, мкОм·см	Прочность на срез, кгс/мм²	Газопроницаемость, л/мин·см², при перепаде 0,1 кгс/см²	Удельное сопротивление, мкОм·см²	Прочность на срез, кгс/мм²	Газопроницаемость, л/мин·см² при перепаде 0,1 кгс/см²
Дроблением прокатанной ленты	—1000÷+500	0,3	140	12,5	8,5	140	12,5	8,3
	—500÷+300	0,28	135	18,0	5,5	134	18,0	5,3
	—300÷+100	0,30	130	22,0	3,5	130	22,0	3,2
Термодиффузионное насыщение Mo	—1000÷+250	0,48	183	5,5	8,2	185	5,5	8,2

При использовании пористых металлов в условиях высоких температур важным свойством является их окалиностойкость. На рис. 60 приведена кинетика окисления при температуре 500°С пористых нержавеющих сталей. Пористость образов сталей 20Х23Н18, 15Х28, 12Х18Н10Т и 14Х17Н2, изготовленных из восстановленных порошков, составляла 0,35—0,40; пористость образцов стали 12Х18Н9С2, изготовленных из расплавленного порошка —0,3. Наиболее окалиностойкими оказались образцы стали 12Х18Н9С2, очевидно, в силу малой пористости и содержания в стали Si, повышающего окалиностойкость. Удельное электросопротивление пористых образцов в результате окисления повышалось незначительно (на 1—4%), а проницаемость снижалась примерно на 10%.

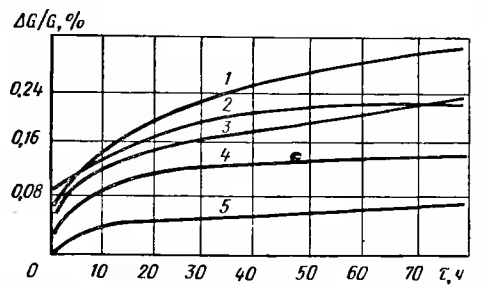
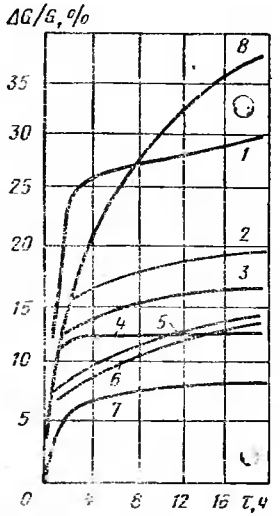


Рис. 60. Зависимость привеса от времени окисления нержавеющих сталей на воздухе при 500° С:
1 — 20Х23Н18; *2* — Х30; *3* — 12Х18Н10Т; *4* — 14Х17Н2; *5* — 12Х18Н9С2

При исследовании окалиностойкости нержавеющих сталей одинаковой пористости и зернистости было отмечено [9], что различная окалиностойкость может быть обусловлена не столько химическим составом, сколько состоянием межчастичных контактов. Так, образцы из стали 14Х17Н2 при пористости 0,4 (фракция порошка —150÷+100 мкм) оказались более ока-

линостойкими, чем образцы аналогичной зернистости и пористости из стали 12Х18Н10Т.

Относительная величина межчастичных контактов для стали 14Х17Н2 составляла 0,92, а для стали 12Х18Н10Т — 0,73. В опытах было установлено, что легирование пористой нержавеющей стали фосфором и бором, а также добавки в засыпку при спекании галоидных солей (NH_4F и NH_4Cl) улучшают окалийностойкость при температуре 400—500°С, очевидно, вследствие повышения величины межчастичных контактов.



Железные пористые образцы с большой пористостью начинают окисляться на воздухе при более низких температурах, чем менее пористые. Предельная температура начала окисления образцов с пористостью 0,30 составляет 100—120°С, а более плотных 150—170°С.

Рис. 61. Зависимость привеса пористых металлов от времени окисления на воздухе при 1100° С:
1 — хром фракции — 300 ÷ + 150 мкм; *2* — хром фракции — 500 ÷ + 300 мкм; *3* — хром фракции — 1000 ÷ + 500 мкм; *4* — сплав Cr — 30 Ni фракции 5 мкм; *5* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 300 ÷ + 150 мкм; *6* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 500 ÷ + 300 мкм; *7* — сплав Cr — 30 Ni фракции — 1000 ÷ + 500 мкм; *8* — сталь 20Х23Н18 фракции — 300 ÷ ÷ + 150 мкм

Изучена окалиностойкость пористых образцов из хрома, сплава Cr—30Ni, никеля и нержавеющей стали 20Х23Н18 [114]. Образцы пористостью 0,35 подвергали окислению на воздухе при температуре 1100° С в течение 20 ч. На рис. 61 показаны зависимости привеса образцов от времени окисления. Видно, что с уменьшением размера частиц порошка привес увеличивается из-за роста поверхности пор образцов. На образцах из хрома и сплава Cr — 30Ni замечено резкое уменьшение скорости окисления после 1 ч окисления, на образцах стали 20Х23Н18 скорость окисления уменьшается со временем значительно меньше. Образцы хрома фракции 300—150 мкм в первый период окисления (до 8 ч) дают привес больше, чем образцы из порошка стали 20Х23Н18 той же фракци. Однако при последующем окислении образцы из стали 20Х23Н18 дают больший привес, чем образцы из хрома. Это свидетельствует о том, что пленка окислов на образцах стали 20Х23Н18 имеет значительно меньшие защитные свойства при высокой температуре, чем окисная пленка хрома и в сплаве Cr — 30Ni. Сталь 20Х23Н18 теряет устойчивость против окисления в области температур 1100—1200° С, когда в окисном слое наступает разрыхление из-за рекристаллизации основного окисла.

Влияние температуры окисления и пористости на окалиностойкость пористого нихрома в воздушной среде при температурах от 800 до 1100° С в течение 10 ч рассмотрено в работе [19]. Установлено, что интенсивное окисление, сопровождающееся образованием на поверхности тонкой защитной пленки окислов, развивается в первые 3—4 ч. При дальнейшем увеличении длительности окисления процесс насыщения металла кислородом замедляется. С увеличением температуры окисления окалиностойкость нихрома уменьшается по линейной зависимости. Так, с повышением температуры от 800 до 1100° С привес образцов с пористостью 0,1 увеличивается от 0,20 до 25 мг/см². Объемное окисление при этом не обнаружено. С увеличением пористости от 0,1 до 0,2 при температуре 1000° С окалиностойкость нихрома снижается примерно в 2,5 раза. Дальнейшее увеличение пористости выше 0,2 сопровождается объемным окислением образцов, что приводит к резкому ухудшению окалиностойкости.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Конструктивно пористые детали обычно имеют простейшие формы: пластины, цилиндры, кольца, конуса, трубы и т. д. Не все способы изготовления пористых деталей позволяют получить точные сопрягаемые размеры и необходимую геометрическую форму. Поэтому для изготовления пористых деталей требуется их механическая обработка, которая не должна нарушать пористую структуру и влиять на проницаемость рабочих поверхностей изделий.

Для обработки пористых металлов резанием обычно используют резцы, оснащенные пластинками из твердого сплава. Как показывают исследования по обработке резанием пористых железографитовых подшипников, можно подобрать соответствующие режимы резания, которые только незначительно снижают проницаемость пористого металла. Для композиции Fe + 3% С пористостью 0,3 проницаемость снижалась на 10% после обработки резанием по следующему режиму: скорость резания 80 м/мин; подача 0,12 мм/об; радиус закругления режущих кромок равен нулю; передний угол 15°. Во всех случаях увеличение скорости резания, уменьшение подачи, использование резцов с отрицательными передними углами и с радиусом закругления, отличным от нуля, приводило к уплотнению поверхностных слоев и к уменьшению проницаемости деталей в десятки раз.

Если при изготовлении пористых деталей точность составляет ±1% по длине и ±0,5% по диаметру и высоте, то при калибровании точность существенно повышается.

Пористые детали должны обладать способностью к сопряжению с непроницаемыми деталями, а в некоторых случаях и друг с другом. Выбор способа соединения пористых металлов (сварка, пайка, склеивание, завальцовка и т. д.) зависит от их свойств и условий эксплуатации.

Наиболее распространенным способом соединения пористых металлов является сварка. При сварке металлов из порошков низкоуглеродистой стали и никеля применяют ацетилено-кислородное пламя. В качестве присадочного материала при сварке низкоуглеродистой пористой стали используют проволоку Св-0,8; Св-0,8А и Св-15 (ГОСТ 2246—70) диаметром 1—1,5 мм, а при сварке пористого никеля и монель-металла применяют никелевую проволоку НП того же размера. Процесс сварки несложен, однако при сварке пористые металлы соприкасаются с газами пламени, а вне пламени с окружающей средой, что приводит к окислению поверхности пор, а следовательно, и к снижению прочности пористого металла. Для восстановления прочностных свойств рекомендуется нагрев металлов до температуры 1000° С в течение 2—3 ч в среде водорода [81].

Газовая сварка пористой стали 12Х18Н10Т в связи с большим содержанием хрома в этой стали приводит к образованию тугоплавких окислов хрома, мешающих процессу сварки и требующих дополнительной операции по их восстановлению. В настоящее время для соединения пористых элементов из нержавеющей стали применяют аргоно-дуговую сварку с плавящимся или неплавящимся электродом. В качестве присадочной используют проволоку Св12Х18Н10Т диаметром 1—1,5 мм. Аргоно-дуговая сварка обеспечивает высокое качество соединений.

Исследование режимов сварки пористой стали 14Х17Н2 [91] показало, что аргоно-дуговую сварку с неплавящимся вольфрамовым электродом изделий пористостью 0,4—0,6 удалось проводить только с присадкой проволоки типа Св-06 12Х18Н10Т. Сварку изделий пористостью 0,3 и менее можно вести без присадки. Ориентировочные режимы аргоно-дуговой сварки приведены в табл. 29.

Таблица 29

Режимы аргоно-дуговой сварки пористой нержавеющей стали 14Х17Н2 [91]

Толщина стали, мм	Пористость	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч
5	0,30	70—80	8—9	18—22
5	0,46	80—100	10	18

Сталь 14Х17Н2 можно сваривать плавящимся электродом в среде углекислого газа. Удовлетворительное качество шва получается при использовании проволоки диаметром 0,6—0,7 мм. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 30.

Испытания образцов на разрыв после сварки показали, что разрушение, как правило, происходит по сварному шву, однако прочность соединений отличается от прочности пористого металла всего на 10—30%. Стойкость сварной нержавеющей стали

Таблица 30

Режим сварки пористой стали 14Х17Н2 плавящимся электродом в углекислом газе

Толщина стали, мм	Пористость	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Толщина стали, мм	Пористость	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч
2	0,3	30—35	16—17	17—18	4	0,3	50—60	16—17	17—18
	0,4	30—35	15—16	16—18		0,4	45—50	16—17	16—17
	0,5	25—30	15—16	16—17		0,5	35—40	15—16	15—16
	0,6	25—30	15—16	16—17		0,6	30—35	15—16	14—15
3	0,3	40—50	16—17	17—18	5	0,3	60—70	15—16	17—18
	0,4	35—40	16—17	16—17		0,4	50—55	15—16	17—18
	0,5	30—35	15—16	15—16		0,5	40—45	15—16	16—17
	0,6	25—30	15—16	14—15		0,6	35—40	15—16	15—16

против межкристаллитной коррозии повышается после отжига при 1200° С за 1 ч в среде водорода с последующей нормализацией.

Пайку пористой низкоуглеродистой стали и пористой бронзы производят с припоями ПОС-30 или ПОС-40. Для пайки нержавеющей стали применяют серебряный припой. Процесс пайки пористых металлов аналогичен пайке компактных металлов, однако необходимо учитывать, что припой может легко затекать в поры, не создавая плотного шва. Поэтому перед пайкой кромки пористого металла необходимо подвергнуть механической обработке с тем, чтобы в месте пайки закрыть поры. Качество пайки зависит от выбора припоя, подготовки металлов к пайке и охлаждения их после пайки.

Если к узлам соединения пористых металлов предъявляются невысокие прочностные требования, то можно применять склеивание или завальцовку; для склеивания рекомендуется использовать клей ПЭФ-2/10 [81]. Основы технологии применения клея сводятся к следующему: жидкий клей наносят на горизонтальные площадки пористого металла, предварительно обезжиренные этиловым спиртом. Слой клея подсушивают при комнатной температуре в течение 30 мин. Затем две пористые детали соединяют в специальном приспособлении под давлением и сушат при 130—150° С. Возможно затекание клея в поры.

Метод завальцовки разработан для фильтрующих элементов, имеющих форму чечевиц [81]. Для соединения двух деталей применяют проставку из латуни, алюминия, жести, нержавеющей стали и т. п., полученную из листа толщиной 0,5 мм. Завальцовку ведут в специальной пресс-форме при давлении 150 кгс/см^2 с обжатием под углом 45°. Метод завальцовки позволяет получать надежное соединение фильтрующих элементов с наиболее стабильными гидравлическими характеристиками.

Глава VI

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Проницаемые пористые металлы находят все более широкое применение в различных отраслях отечественной промышленности. Фильтрующие элементы из пористых металлов используются для очистки жидкостей и газов от загрязнений в авиационной, автотракторной, химической, нефтяной, пищевой, машиностроительной и ряде других отраслей промышленности. Высокая коррозионная стойкость, удовлетворительные прочностные характеристики, возможность получения высокой тонкости очистки, способность к регенерации позволяют использовать пористые металлы для очистки от примесей агрессивных сред, а также применять пористые фильтры в системах с высокими тепловыми и механическими нагрузками, в том числе и динамического характера.

Пористые металлы используют в камерах сгорания, газовых турбинах, высокотемпературных нагревателях для организации пористого охлаждения, обеспечивая равномерное распределение охлаждающей жидкости или газа по защищаемой поверхности. Варьируя проницаемостью пористого металла или геометрическими размерами пористой детали, можно осуществить программный подвод охлаждающей жидкости на защищаемую поверхность при постоянных параметрах системы подачи.

В космической технике используют в качестве ионизаторов тугоплавкие пористые металлы и их сплавы. В последние годы пористые металлы получают все более широкое применение в электрохимии, в частности в химических источниках тока и хемотронных приборах [122].

Сочетание ряда свойств — малого размера пор, высокой газопроницаемости и значительной механической прочности — делает пористые металлы наиболее подходящим материалом для изготовления огнепреградителей применительно к быстрогорящим газовым смесям, таким как кислород-водород или ацетилен-кислород.

В ГДР, ЧССР, США, Австрии, Англии, ФРГ, Японии металлические пористые фильтры из бронзы, нержавеющей стали и никеля широко применяют в авиационной, химической, машиностроительной и пищевой промышленности.

1. ПОРИСТЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИХ ВИДЫ И СВОЙСТВА

Стремление обеспечить малые утечки рабочего тела и высокую точность работы машины или отдельного агрегата, как правило, приводит к малым зазорам в сопрягаемых деталях. Современные двигатели имеют зазоры в подвижных соединениях не более 20 мкм, а в отдельных случаях зазоры не превышают 10—12 мкм.

Жидкость гидросистемы при эксплуатации засоряется продуктами истирания сопрягаемых деталей, продуктами разложения масла и другими примесями. При наличии в жидкости примесей, по размерам превышающих размеры зазоров между сопряженными деталями гидромашины, появляется опасность отказа в работе соответствующего агрегата вследствие заклинивания деталей. Поэтому надежность и долговечность работы агрегатов во многом зависит от чистоты жидкости в гидросистемах.

Среднее количество частиц загрязнений различных размеров, находящихся в каждом кубическом сантиметре объема поставляемой промышленностью жидкости, приведено ниже:

Размер частиц, мкм	$3^{\pm 1}$	5^{+3}_{-1}	10^{+3}_{-2}	15^{+3}_{-2}	25^{+10}_{-3}
Число частиц . . .	2000—8000	800—4500	400—1500	200—600	200—600

Из этих данных следует, что в жидкости содержится большое количество частиц, соизмеримых с размерами зазоров в гидроагрегатах. Нормальная работа гидросистем возможна лишь при очистке жидкостей от загрязнений с помощью фильтров, устанавливаемых перед нагнетающими устройствами, а в отдельных случаях и перед гидроагрегатом.

Для тонкой очистки жидкостей или газов от примесей широко применяют различного рода фильтровальные бумаги и фибры, специальные сорта войлока и фетра, металлические сетки обычного и саржевого плетения, фторопластовые, нейлоновые и другие пористые материалы.

Длительная эксплуатация фильтрующих элементов из бумаги, фибры, войлока и фетра показала, что при воздействии высоких давлений и повышенных температур жидкостей от фильтрующего элемента может отделяться ворс и клей, применяемый для склеивания фильтрующих элементов. Такие фильтрующие элементы имеют непродолжительный ресурс работы.

Фильтровальные ткани обладают высокой тонкостью очистки жидкостей и стойки в кислотах. Термостойкость фильтровальных тканей ограничена и составляет в зависимости от состава 70—150° С. Наибольшей термостойкостью до 200° С обладают фторопластовые ткани. Несмотря на ряд преимуществ (высокая тонкость очистки, тепловая и химическая стойкость) фильтро-

вальные ткани имеют ограниченное применение из-за низкой прочности материала.

Сетчатые фильтры обладают тонкостью очистки до 15—20 мкм, однако при значительных перепадах давления на фильтре полотно сетки начинает деформироваться, ячейки, образующие проходные сечения, теряют свою форму, что приводит к местному увеличению размеров проходных отверстий. Сетки с размерами ячеек менее 40 мкм не обладают достаточной прочностью.

Для устранения эффекта увеличения размеров проходных сечений сеток применяют либо саржевое плетение, либо спекание узлов сетки после плетения. Сетки со спеченными узлами обычно прокатывают для обеспечения однородности размеров пор в диапазоне 2—1000 мкм в зависимости от плотности плетения и размеров проволоки. Применение синтерированных сеток (сетки со спеченными узлами) исключает деформацию проходных отверстий сетки, однако прочность сетки остается недостаточной.

Фильтрующие элементы, изготовленные из сеток саржевого плетения, имеют размеры ячеек до 20 мкм. Вследствие однослойного строения сетки и отклонения размеров ячейки от номинального значения они обеспечивают худшую очистку, чем фильтрующие элементы из бумаги, войлока и подобных материалов.

Таким образом, вопрос тонкой очистки жидкостей и газов в гидро- и пневмосистемах нельзя считать решенным.

Кроме обеспечения заданной тонкости фильтрации, фильтры должны надежно работать в широком диапазоне температур и давлений жидкостей и газов. В современных машинах температура рабочих тел может изменяться от — 268 до 3000° С. Уровень давления рабочих жидкостей может достигать нескольких сотен атмосфер, что предъявляет высокие требования к прочностным характеристикам фильтроэлементов. Пусковые и остановочные режимы работы характеризуются наличием гидроударов в системах, что предъявляет к фильтрующим элементам дополнительные требования по динамической прочности.

Жидкости, используемые в системах, особенно в химической промышленности, могут оказывать сильное коррозионное воздействие на фильтрующий элемент, поэтому материалы, применяемые для фильтров, должны обладать высокой коррозионной стойкостью.

Этому комплексу требований в наибольшей степени отвечают фильтрующие элементы, изготовленные из пористых металлов. Изменением размеров частиц и технологических режимов можно обеспечить высокую тонкость очистки жидкостей и газов (до 3—5 мкм). Пористым металлическим фильтрам свойственны достаточно высокая прочность и пластичность, что позволяет им выдерживать большие перепады давления в статических и динамических условиях работы. В зависимости от применяемого

материала можно обеспечить необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость и теплопроводность. Металлические пористые фильтры хорошо сопротивляются резким колебаниям температур, хорошо регенерируются, несложны в изготовлении. Металлические пористые материалы технологичны: их можно сваривать, паять, прокатывать, а в ряде случаев, подвергать механической обработке на металлорежущих станках. Фильтрующие элементы можно изготовить любой формы и размеров.

Промышленность СССР выпускает фильтрующие элементы из пористой бронзы [81] для тонкой очистки жидкости АМГ-10, предназначенные для серийного фильтра ФГ-11 производительностью до 30—40 л/мин. В качестве материала фильтрующего элемента применяют оловянистую бронзу, обладающую коррозионной стойкостью в жидкости АМГ-10.

При изготовлении фильтрующих элементов из бронзы порошок прессуют в металлических прессформах при удельном давлении до 3 тс/см². Перед прессованием в порошок вводят наполнитель — парафин. Прессовки спекают в среде водорода при температуре 400° С для выгорания парафина, а затем при температуре 850—870° С. Характеристика пористых фильтров, изготовленных из порошка фракций $-90 \div +71$ мкм, следующая: производительность по воздуху (при $\Delta P = 600$ мм вод. ст.) 12 л/мин, $d_{\text{п ср}} = 21$ мкм, разрушающее давление 30 кгс/см², тонкость очистки 8—12 мкм.

Пористые фильтрующие элементы из бронзы находят широкое применение для очистки газов от примесей. Особое значение имеют бронзовые пористые фильтрующие элементы, применяемые в кислородно-дыхательной аппаратуре для обеспечения дыхания человека во время высотных полетов, под водой, а также в других случаях, связанных с недостатком воздуха для дыхания. Фильтрующие элементы таких приборов должны выдерживать значительные перегрузки, вибрацию, длительное воздействие температуры ±60° С, кратковременное воздействие повышенных температур, достигающих 400—500° С, не должны корродировать в условиях 98% влажности кислорода при температуре +20° С.

Пористые фильтрующие элементы из бронзы успешно эксплуатируются в двигателях ЯАЗ-204 и др.

Из порошка железа или малоуглеродистой стали, предварительно хромированного в течение 5 ч, получен пористый металл для фильтрующих элементов, работающих в жидких средах: вода, бензин, керосин и масло [73]. Хромирование порошков существенно повышает коррозионную стойкость и прочность фильтрующих элементов. Перед спеканием в атмосфере водорода порошки прессовали при давлении около 2,0 тс/см². Для получения пористости, равной 0,5—0,6, и улучшения формуемости порошков в шихту добавляли 5—7% парафина. Спекание проводили по следующему режиму: медленный нагрев до

$T = 400°$ С в течение 4—6 ч для удаления парафина, затем нагрев до 1200° С и выдержка при этой температуре в течение 2 ч. Характеристики пористого железа в зависимости от давления прессования и размера фракций порошка приведены в табл. 31.

Таблица 31

Характеристики пористых фильтрующих элементов из железа

Размер фракций, мкм	Давление прессования, тс/см²	Пористость	Предел прочности при сжатии, кгс/мм²	Предел прочности при изгибе (кгс/мм²) при T, °С	
				20	400
—850÷+500	2,0	0,388	17,7	—	—
—500÷+300	2,0	0,394	18,6	—	—
—300÷+200	2,0	0,362	47,8	12,8	6,1
—200÷+150	2,0	0,384	53,5	—	—
—150÷+125	2,0	0,378	67,3	—	—
—150÷+125	0,5	0,510	6,16	3,46	0,802
—150÷+125	0,25	0,566	2,1	1,32	—

Тонкость очистки пористого железа определена при фильтрации специально загрязненной воды и воздуха через фильтрующие элементы. Результаты определения тонкости очистки в зависимости от давления прессования и размера фракций приведены в табл. 32, из которой следует, что с увеличением размера

Таблица 32

Тонкость очистки пористых фильтров из железа

Давление прессования, тс/см²	Размер фракций, мкм	Количество частиц, обнаруженных в фильтрате, %		Давление прессования, тс/см²	Размер фракций, мкм	Количество частиц, обнаруженных в фильтрате, %	
		<6 мкм	>6 мкм			<6 мкм	>6 мкм
10	—75÷+53	88,8	11,2	20	—150÷+125	73,8	26,2
20	—75÷+53	90,0	10,0	10	—200÷+150	64,5	35,5
10	—125÷+75	75,3	24,7	20	—200÷+150	66,6	33,4
20	—125÷+75	81,9	18,1	5,0	—150÷+125	58,0	42,0
10	—150÷+125	70,6	29,4				

фракций тонкость очистки уменьшается. Также уменьшается тонкость очистки с уменьшением давления прессования.

Характеристики отечественных фильтров, изготовленных из порошка нержавеющей стали 12Х18Н10, приведены в табл. 33.

Выксунский металлургический завод [121] выпускает пористую коррозионностойкую фильтровальную ленту марки Х18Н15 — ПМ (ФНС-5) в соответствии с ЧМТУ1-892—70. Ленту изготовляют прокаткой высоколегированного порошка марок

Таблица 33

Характеристики фильтрующих элементов из нержавеющей стали 12Х18Н9

Размер частиц порошка, мкм	Размер фильтрующего элемента, мм	Пористость	Производительность		Размер пор, мкм		Тонкость фильтрации, мкм	Разрушающее давление, кгс/см²
			по воздуху при $\Delta P = 600$ мм вод. ст., м³/мин	по дизельному топливу при $\Delta P = 1$ кгс/см², л/мин	максимальный	средний		
—1000÷+800	50×4	0,36	0,13	12	190	127	55—65	21
	40×34×50	0,44	0,87	86	265	198	85—90	18
—400÷+315	50×3	0,36	0,09	8	116	73	20—30	24
	40×34×50	0,41	0,6	60	136	107	30—40	42
—200÷+100	50×3	0,34	0,014	—	31	21	10—15	58
	40×34×50	0,37	0,076	8	39	29	15—20	60
—100÷+63	50×3	0,30	0,008	—	26	19	10—15	41
	40×34×50	0,34	0,052	5	36	25	15—20	44

ПХ18Н15-1, ПХ18Н15-2, ПХ18Н15-3 с последующим спеканием в среде водорода. Лента предназначена для тонкой очистки от механических примесей жидких и газообразных веществ: керосина; жидкостей АМГ-10 и 7-50С-3; масел типа РМ, ЛЗМ, 36/1; газов — воздуха, азота, кислорода, фреона, гелия, водорода и т. п.

Кроме ленты ФНС-5 Выксунский завод [121] освоил выпуск пористых лент ФНС-10, ПНС-20, ПНС-30 и ПНС-40, получаемых прокаткой порошка нержавеющей стали, а также титановых пористых лент марки ПТ. Характеристики пористых лент приведены в табл. 34.

По мнению авторов работы [89], целесообразно применение пористых металлов для очистки агрессивных газов в металлургической и химической промышленности, так как они обеспечивают высокую тонкость очистки и способны регенерироваться непосредственно в процессе эксплуатации. Трубчатые фильтрующие элементы для опытов были изготовлены методом мундштучного прессования порошка стали 14Х17Н2, обладающей высокой окалиностойкостью (температура начала интенсивного окисления 700—800° С). Пористые трубы спекали в защитной среде при температуре 1200—1250° С в течение 2—2,5 ч. Фильтрующие элементы имели достаточную механическую прочность: при пористости 0,60—0,65 предел прочности на изгиб составляет 7 кгс/мм², предел прочности на разрыв — 1 кгс/мм², предел прочности на радиальный разрыв — более 25 кгс/мм².

Таблица 34

Характеристики пористых лент

Марка	Тонкость фильтрации, мкм	Толщина листа[1], мм	Материал частиц	Пористость	Пропицаемость по керосину см³/(см²·мин)	Предел прочности, кгс/мм²
ФНС-5	5	0,14—0,20	Х18Н15	0,35—0,38	10—15	7—10
ФНС-10	10	0,20—0,31	Х18Н15	0,38—0,42	12—15	7—10
ПНС-20	20	0,30—0,50	Х18Н15	0,42—0,45	15—20	7—9
ПНС-30	30	0,40—0,60	Х18Н15	0,44—0,48	20—25	5—7
ПНС-40	40	0,40—0,75	Х18Н15	0,45—0,50	25—35	4—5
ПТ	—	0,35—0,80	Ti	0,30—0,35	10—12	7—10

[1] Длина ленты 100—700 мм, ширина 60—220 мм.

Промышленные испытания, проведенные на 480-тонной мартеновской печи завода им. Дзержинского, показали высокую надежность работы пористых фильтров при температуре до 350° С. При этой температуре пыль на фильтре не спекалась, поэтому при регенеративной продувке сжатым воздухом пыль легко удалялась и восстанавливалась прежняя пропускная способность фильтра. Тонкость очистки составила 3—4 мкм.

Особое значение имеют пористые фильтры, изготовленные из порошка титана. При нагреве до температур 500—600° С титан покрывается прочной и плотной окисной пленкой, которая защищает его от дальнейшего окисления даже при воздействии концентрированной HNO_3 при температуре кипения. Толщина окисной пленки невелика. Высокая стойкость титановых фильтров сочетается с хорошими массовыми характеристиками.

Для очистки агрессивных водных растворов кислот (кроме плавиковой, соляной, серной и ортофосфорной), органических и кремнеорганических жидкостей, а также жидких металлов в пределах температур до 900° С в работе [115] предложен пористый титановый фильтр. Для изготовления пористых фильтрующих элементов использованы различные фракции порошка из частиц дендритной формы. Прессовки спекали в вакууме при температуре 1000—1050° С в течение 2 ч. Исследование механических свойств фильтрующих элементов показало, что в зависимости от пористости (0,3—0,55) твердость составляет *HB* 11—16, а предел прочности на растяжение $\sigma_в = 2 \div 15$ кгс/мм².

В результате опытов по фильтрации расплавленного магния (680—710° С) через титановый пористый фильтр установлено, что его фильтрация подчиняется закономерностям, справедливым для жидкостей.

Выбор оптимальных технологических режимов изготовления и определения характеристик пористых титановых фильтров

проведены авторами работы [14]. Для получения высокопористых фильтрующих элементов в порошок титана вводили двууглекислый аммоний в количестве до 40% масс. В качестве исходного взяты порошки электролитического (фракции 1000÷+250; —250; —100 мкм) и восстановленного (фракция 56 мкм) титана. Влияние температуры спекания и количества наполнителя на пористость фильтрующих титановых элементов показано в табл. 35. Выдержка при спекании составляла 2 ч. Как видно

Таблица 35

Пористость титановых фильтрующих элементов

Содержание двууглекислого аммония, % масс	Пористость при температуре спекания (°С) и размере фракций (мкм)					
	1050 и 250	1200 и 250	1050 и 100	1150 и 100	900 и 56	1000 и 56
20	0,54	0,52	0,50	0,44	0,50	0,46
30	0,58	0,57	0,56	0,51	0,57	0,51
40	0,69	0,66	0,67	0,64	0,69	0,67

из табл. 35, максимальная пористость достигает 0,70. Дальнейшее увеличение пористости (до 0,80) приводит к снижению предела прочности титана на срез до значений 0,2—0,5 кгс/мм².

Таблица 36

Характеристики пористых титановых фильтров для медицинской промышленности

Характеристика	Форма фильтра		
	Диск		Труба
Размер фильтра, мм	∅=50, l=5	∅=45, l=4,5	∅=23/11, l=6, h=100
Метод получения порошка	Электролиз	Восстановление	
Размер частиц порошка, мкм	56—300	<56	<56
Режим спекания: температура, °С	1100	1100	1000
время, ч	2	2	2
Пористость	0,30	0,25	0,50
Тонкость очистки, мкм	>5	<5	>5

Примечание. Защитная среда — аргон.

Прочность на срез титана с пористостью 0,6—0,7 составляет 1—3 кгс/мм².

Высокая коррозионная стойкость пористого титана и возможность достижения тонкости очистки, равной 5 мкм, позволили использовать пористые титановые фильтры в медицине для очистки инъекционных растворов [106]. Характеристики пористых титановых фильтров приведены в табл. 36.

В работе [107] приведены свойства пористых фильтрующих элементов из титана, полученных прокаткой. Пористые титановые фильтры применяли для тонкой очистки проб в хроматографах, используемых для анализа сложных смесей в химической и нефтехимической промышленности. Фильтрующие элементы рекомендуется использовать для отделения агрессивных суспензий от тонких взвесей. Испытания в промышленных условиях показали, что титановые фильтры обеспечивают тонкость очистки до 5 мкм. Результаты исследования тонкости очистки пористых титановых фильтров приведены в табл. 37.

Таблица 37

Тонкость очистки титановыми фильтрами

Толщина листов, мм	Пористость	Количество частиц, прошедших через фильтр (%) при размере частиц, мкм	
		До 3	3—5
0,51	0,407	98,98	1,02
0,41	0,440	96,20	3,80
0,39	0,468	98,68	1,32
0,43	0,490	99,60	0,40

Характеристики трубчатых фильтров диаметром 57 мм, изготовленных для химической промышленности из пористого листового титана толщиной 0,4—0,65 мм пористостью 0,40—0,45, приведены в работе [108]. Продольное соединение листа выполнено роликовой сваркой. Максимальный размер пор, определенный методом вытеснения жидкости из пор, составляет 5,5—6,0 мкм. Фильтры задерживали до 96—98% частиц твердой фазы размером менее 4 мкм.

Авторы работы [82] рекомендуют использовать изделия из пористого вольфрама для фильтрации расплавленных металлов, агрессивных газов и жидкостей при повышенных температурах, а также в качестве конструктивного материала при организации пористого охлаждения. Характеристики фильтрующих элементов приведены в табл. 38.

Пористые фильтры в США используют в авиационной и ракетной технике, обеспечивая надежную работу гидросистем и топливной аппаратуры двигателей [128]. Применение пористой нержавеющей стали позволило повысить температуру и давление фильтруемой жидкости по сравнению с бумажными и тефлоновыми фильтрами, уменьшить массу и габариты фильтров по сравнению с бронзовыми.

В табл. 39 приведены основные характеристики пористых фильтрующих элементов [128], изготовленных спеканием по-

Таблица 38

Характеристики фильтрующих элементов из пористого вольфрама

Температура спекания, °С	Выдержка, ч	Содержание Ni, %	Пористость	Производительность по воздуху при ΔP=600 мм вод. ст., л/мин	Размер пор, мкм		Разрушающее давление, кгс/см²
					средний	максимальный	
1500	0	0,2 0,5	0,369 0,367	0,093 0,088	128 127	154 150	300 267
1500	1	0,2 0,5	0,350 0,368	0,097 0,002	129 124	160 149	367 332
1500	2	0,2 0,5	0,367 0,356	0,092 0,092	129 126	159 151	280 357
1600	0	0,2 0,5	0,388 0,381	— 0,097	— 135	— 165	9,6 38
1600	1	0,2 0,5	0,378 0,367	0,101 0,096	136 135	175 167	54 92
1600	2	0,2 0,5	0,374 0,370	0,098 0,097	135 135	170 165	88 117
1700	0	0,2 0,5	0,367 0,366	0,105 0,101	142 149	186 199	352 663
1700	2	0,2 0,5	0,372 0,369	0,097 0,099	157 136	212 193	223 761
1800	0	0,2 0,5	0,369 —	0,123 —	142 —	175 —	— 693
1800	2	0,2 0,5	0,359 0,368	0,100 0,101	142 149	186 229	150 442

рошков нержавеющей стали, которые могут работать в диапазоне температур от —270 до 500° С. Для пористых листов, изготовленных из порошков на основе Ni и Co, максимальная рабочая температура может быть повышена до 800° С.

Серийное применение пористые фильтры для очистки жидкостей и газов находят в Японии [119]. Для их изготовления применяют сферические порошки на основе меди и несферические порошки нержавеющей стали. Основной метод получения порошков — распыление расплавленного металла. Фильтры из пористой бронзы изготовляют в основном методом свободной насыпки. Из порошков нержавеющей стали фильтрующие элементы изготовляют методом прессования в пресс-формах и прокаткой порошка без наполнителя с удельным давлением

Таблица 39

Свойства пористых листов из нержавеющей стали, выпускаемых промышленностью США

Характеристика образцов	Марки пористых изделий						
	C	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*X*
Размер частиц, мкм	—	150—300	75—150	75—150	35—75	20—60	—
Размер пор, мкм	165	65	35	20	10	5	15
Пористость	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,20
Толщина, мм:							
минимальная	—	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75	—
максимальная	12	12	12	9	6	6	3
Предел прочности на разрыв, кгс/мм²	4,2	6,3	10,5	10,5	10,5	10,5	17,5
Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, кгс/см²	—	0,7	1,05	1,75	1,9	2,1	—
Расход воды при перепаде давления 0,07 кгс/см² ($l = 1{,}5$ мм), м³/(м²·мин)	18,4	2	2,12	0,49	—	0,122	0,102

0,8 тс/см². Толщина прокатанной ленты составляет 0,3—3,0 мм. Элементы из порошков нержавеющей стали спекают в среде водорода при температуре 1150—1300° С в течение 45—60 мин. Свойства фильтрующих элементов, серийно выпускаемых пред-

Таблица 40

Свойства фильтрующих элементов

Свойства	Материал изделия	
	бронза	нержавеющая сталь
Химический состав	4—12% Sn	Ni 8—11; Cr 18—20% или Ni 10—14%; Cr 16—18% Mo 2—3%
Пористость	0,33—0,43	0,40—0,50
Прочность на растяжение, кгс/мм²	3—10	1,4—2,5
Прочность на сжатие, кгс/мм²	2,5—3,5	3,0—7,0
Относительное удлинение, %	1—6	0,5—7
Допускаемая рабочая температура, °С	—160÷+300	—160÷+500
Тонкость фильтрации, мкм	2—200	—

приятиями Японии из порошков бронзы и нержавеющей стали, приведены в табл. 40.

Отдельные фильтрующие элементы соединяют пайкой, аргоно-дуговой сваркой; изделия, изготовленные из мелких фракций,— при помощи резьбовых соединений. Для работ при низких температурах фильтрующие элементы соединяют свинцовооловянистым припоем, в области высоких температур и давлений — серебряными или цинковыми припоями или аргонодуговой сваркой. Фильтрующие элементы применяют для очистки жидкостей и газов от механических примесей, для очистки газов от масел, для отделения водяных паров от газов и т. п. Для повышения стойкости фильтрующих элементов из бронзы поверхности пор покрывают 100%-ным Ni.

Фирма Маратон (ФРГ) изготовляет фильтры из бронзы, хромоникелевой стали (18%Cr, 10%Ni, 2%Mo, остальное Fe) и нейзильбера (65%Cu, 12%Ni, остальное Zn). Некоторые свойства фильтрующих материалов приведены в табл. 41. Раз-

Таблица 41

Свойства фильтрующих материалов

Свойства	Оловянистая бронза	Хромоникелевая сталь	Нейзильбер
Пористость	0,3—0,4	0,5—0,6	0,3—0,4
Предел прочности на растяжение, кгс/мм²	4—6	3—5	1,5—3,5
Относительное удлинение, %	4—6	2—5	2—4
Относительная осадка при сжатии, %	15	5	15
Коэффициент теплопроводности при T=20° С, ккал/(м·ч·°С)	18,0	5,4	11,6
Удельная теплоемкость при T=20°С, ккал/(кг·°С)	0,082	0,12	0,093
Температура плавления, °С	980—1000	1290—1300	1030—1040

мер пор в указанных материалах может изменяться в широких пределах (1—100 мкм). Фильтры из бронзы и нейзильбера начинают окисляться на воздухе при температуре выше 200°С а из хромоникелевой стали — свыше 400° С.

Практика исследования фильтрующих способностей пористых металлов показывает, что из-за сложной конфигурации пор по длине и в поперечном сечении максимальный размер частиц загрязняющих примесей, прошедших через фильтр, всегда меньше максимального размера пор. В работе [9] приведены опытные данные, характеризующие тонкость очистки жидкостей. Пористые элементы были изготовлены из сферических частиц различного размера, а именно: 354, 216, 100, 51,5 и 20 мкм. Во всех случаях отношение максимального размера пор к максимальному размеру частиц загрязнителя, прошедших через фильтр, составляло 2,3—2,4. Близкое отношение максимального размера пор к максимальному размеру прошедших через фильтр частиц загрязнителя (около 3) для пористого железа и пористой нержавеющей стали получено в работе [117].

В табл. 42 приведены результаты измерения размеров пор и тонкости очистки для пористых образцов из восстановленного порошка нержавеющей стали [95]. Как и для пористого сплава Ni — 30Mo, наблюдается соотношение $d_{микр} > d_{п\,max} > d_{пг}$. Максимальный размер прошедших через фильтр частиц значительно меньше величины максимального размера пор, что объясняется извилистостью и шероховатостью поровых каналов. Однако, если для фильтров из сферических порошков, как показано в работе [9], отношение максимального размера пор к максимальному размеру прошедших через фильтр частиц не зависит от крупности порошка и равно примерно 2,35, то для пористых фильтров из нержавеющей стали это отношение увеличивается с уменьшением размера частиц порошка. Для образцов пористостью 0,55 из порошка фракции —300÷+160 мкм это отношение равно 2; для фракции —150÷+70 мкм — 3, а для фракции <40 мкм — 4. По-видимому, увеличение отношения максимального размера пор к максимальному размеру прошедших через фильтр частиц происходит из-за увеличения удельной поверхности пор образцов, изготовленных из более мелких частиц.

Таблица 42

Максимальный размер частиц, прошедших через фильтр, мкм

Фракция порошка нержавеющей стали, мкм			Максимальный размер пор, мкм
—300÷+160	—150÷+70	<40	
10	7	4	13
12	8	5	20
20	13	—	43

Сопоставляя результаты работ [9, 95, 117], можно утверждать, что во всех случаях отношение максимального размера частиц загрязнителя, прошедших через фильтр, к максимальному размеру пор будет меньше 0,5, причем это отношение будет уменьшаться с уменьшением крупности частиц и с переходом от сферической формы частиц к произвольной.

Определенным подтверждением факта влияния размеров фракций исходного порошка на тонкость очистки являются результаты исследований авторов работы [74]. Тонкость очистки в зависимости от размера фракций исходного порошка была определена на фильтрующих элементах, изготовленных из округлого порошка фракций: 63; 100; 200; 300; 400; 600; 800 и 1000 мкм с удельным давлением прессования 3,0 тс/см². Результаты опытов приведены на рис. 62.

Влияние размера фракций несферических порошков и толщины пористых фильтров на тонкость очистки освещено в работе [53]. Образцы прессовали из частиц восстановленного железа размером <40, —160÷+100, —360÷+280 мкм и спекали в среде водорода при температуре 1100° С. Тонкость очистки жидкости АМГ-10 определяли как наименьший размер частиц, задерживаемых фильтром. На рис. 63 представлены результаты исследования тонкости очистки фильтров пористостью

0,55 и толщиной от 2 до 8 мм. Из графиков видно, что толщина фильтра не оказывает значительного влияния на тонкость очистки. Последняя повышается только для образцов, изготовленных из порошка самой крупной фракции; для образцов же из более

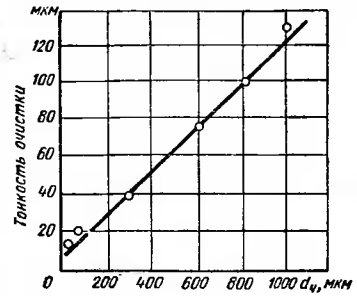


Рис. 62. Зависимость тонкости очистки от размера фракции порошка

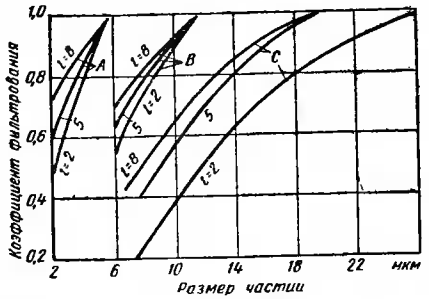


Рис. 63. Зависимость коэффициента отфильтровывания от размеров частиц загрязнителя:

A — образцы из частиц < 40 мкм; *B* — образцы из частиц — 160 ÷ + 100 мкм; *C* — образцы из частиц — 300 ÷ + 280 мкм

мелких порошков она не меняется. Однако с увеличением толщины повышается коэффициент отфильтрования для более мелких частиц. Поскольку толщина образца сильно влияет на проницаемость и незначительно на тонкость очистки, авторы работы [53] рекомендуют толщину фильтра выбирать из соображений прочности и технологичности. Фильтры, изготовленные из

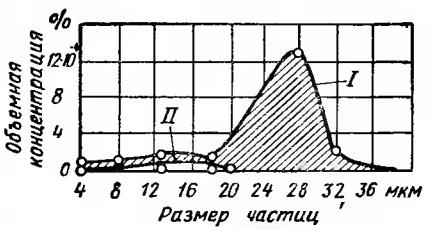


Рис. 64. Распределение по размерам частиц загрязнений в рабочей жидкости:

I — нефильтрованной; *II* — после фильтрации

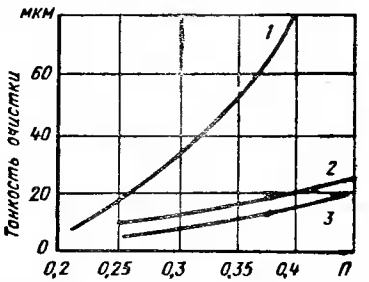


Рис. 65. Зависимость тонкости очистки от пористости фильтра:

1 — фракция — 1000 ÷ + 250 мкм; *2* — двухслойный фильтр; *3* — фракция менее 250 мкм

карбонильного никелевого порошка, рекомендуется делать толщиной 1 мм, пористостью 0,6—0,8.

На рис. 64 показано распределение частиц по размерам в рабочей жидкости до фильтра (*I*) и после серийного фильтра (*II*),

используемых в гражданской авиации [33]. Заштрихованная площадь определяет объем загрязнений, задержанных фильтром за один проход жидкости. Таким образом, на фильтр приходится большая грязевая нагрузка. Тонкость очистки серийного фильтра (в жидкости после фильтрования присутствуют частицы размером до 20 мкм) не отвечает современным требованиям. Создание однослойных пористых фильтров с высокой тонкостью очистки связано с проблемой снижения ресурса работы их, поскольку такие фильтры быстрее забиваются как из-за преобладания поверхностного механизма фильтрации, так и более быстрой закупорки мелких пор.

Для решения задачи тонкой очистки с повышенной грязеемкостью предложен двухслойный фильтр, изготовленный из несферических порошков [32]. Оба слоя фильтроэлемента имели пористость 0,50, но были изготовлены из порошков разных фракций, что обеспечивало различные размеры пор слоев фильтрующего элемента. Опыты показали, что если фильтр обращен к потоку жидкости слоем с большими размерами пор, то он обладает значительно большей грязеемкостью, чем фильтроэлемент, обращенный к потоку слоем с меньшими размерами пор. Слой грубой очистки работает в условиях объемной фильтрации, как фильтр предварительной очистки, и значительно снижает нагрузку на слой тонкой очистки.

В работе [14] описано исследование тонкости очистки пористых титановых фильтров в зависимости от их пористости. Результаты опытов (рис. 65) показали, что тонкость очистки двухслойных фильтров (слой тонкой очистки из частиц размером менее 250 мкм, защитный — из частиц размером $-1000 \div +250$ мкм) практически не отличается от тонкости очистки фильтров, изготовленных из порошка размером частиц менее 250 мкм, и намного лучше по тонкости очистки однослойных фильтров из порошка размером $-1000 \div +250$ мкм.

Для максимального удовлетворения противоречивых требований по тонкости очистки и проницаемости необходимо создавать фильтры высокой пористости из мелких порошков. Учитывая, что грязеемкость фильтрующих элементов возрастает с увеличением пористости, слой тонкой очистки рекомендуется выполнять с пористостью до 0,75. Такую пористость имел слой тонкой очистки фильтрующего элемента, предложенного в работе [33]. Слой тонкой очистки изготовлен из порошка карбонильного никеля с размерами частиц около 5 мкм при применении наполнителя (40% масс. хлористого аммония). Слой грубой очистки получен из фракций несферических порошков восстановленного железа в трех вариантах: $-380 \div +280$ мкм; $-280 \div +150$ и $-150 \div +100$ мкм. Толщина защитного слоя постоянна и равна 2,5 мм, пористость 0,55. Толщина слоя тонкой очистки 1,0 мм.

Опыты по очистке рабочих жидкостей АМГ-10 показали, что наилучшими характеристиками по проницаемости обладает

двухслойный фильтр с защитным слоем из частиц размером $-280 \div +150$ мкм; в то же время слой грубой очистки из частиц размером $-380 \div +280$ мкм практически не защищал слой тонкой очистки, а слой из частиц $-150 \div +100$ мкм достаточно быстро забивался, что приводило к снижению проницаемости двухслойного фильтрующего элемента.

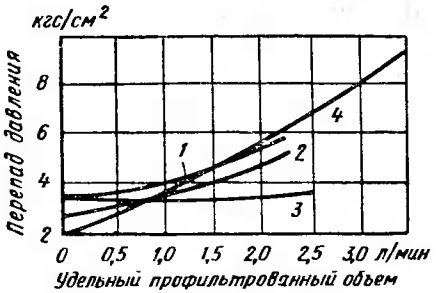


Рис. 66. Зависимость перепада давления от удельного профильтрованного объема для различных фильтров:
1 — двухслойный фильтр, расположенный тонкой фракцией навстречу потоку; *2* — фильтр тонкой очистки из карбонильного никеля; *3* — двухслойный фильтр, расположенный грубой фракцией навстречу потоку; *4* — фильтр из материала ФНС-5

Грязеемкость двухслойных фильтров исследовали на жидкостях, слитых из гидросистемы самолетов. Для сравнения исследовали грязеемкость фильтроматериала тонкой очистки ФНС-5. Результаты эксперимента [66] показывают, что сопротивление двухслойного материала при расположении защитным слоем навстречу потоку практически не увеличивается за время опыта, тогда как сопротивление фильтроэлемента из материала ФНС-5 возросло в 3,6 раза.

В работе [31] предложена конструкция двухслойных фильтров, изготовленных методом послойного прессования. В качестве тонкого слоя выбран порошок фракции 63 мкм, второй слой изготовлен из частиц фракций 100, 200, 300 и 600 мкм. Характеристики двухслойных фильтров приведены в табл. 43. Фильтрующие элементы из порошков низкоуглеродистой стали получены методом прессования с последующим спеканием в среде водорода при температуре 1200 ± 10°С в течение 3 ч. Как видно из табл. 43, наилучшие характеристики имеет фильтрующий элемент из порошков фракции 63 и 300 мкм.

Таблица 43

Характеристики двухслойных фильтров

Фракция порошка, мкм	Проницаемость по топливу ТС-1 (при ΔP= 0,5 кгс/см²), м³/(м²·мин)	Тонкость фильтрации, мкм
63	0,51	5
63—100	0,96	5
63—200	1,33	5
63—300	1,91	5
63—660	1,50	5

При эксплуатации пористые фильтрующие элементы забиваются, что приводит к снижению их пропускной способности и увеличению гидравлического сопротивления. Для восстановления пропускной способности фильтрующие элементы подвергают очистке (регенерации) от

образовавшегося осадка и очистке пор от попавших в них частиц загрязнений.

Основными способами регенерации фильтров являются следующие:

а) механическая очистка противотоком; при этом способе очистки газ или жидкость пропускают через фильтр в направлении, противоположном направлению движения рабочего потока жидкости или газа;

б) химическая очистка растворителями, в которых растворяются частицы загрязнителя, накопившиеся в порах фильтрующих элементов;

в) термическая очистка — нагревание фильтрующих элементов в струе горячего газа, в результате чего происходит сгорание частиц загрязнений;

г) ультразвуковая очистка путем помещения фильтрующих элементов в моющую жидкость, в которой возбуждаются ультразвуковые колебания.

Наиболее простым и удобным способом регенерации является очистка противотоком. При этом способе очистки фильтр обычно не демонтируют. Реагентом в большинстве случаев служит очищенная рабочая среда. Обычно регенерацию производят при перепаде давления на фильтре на 0,5—1,0 кгс/см² больше перепада давления на рабочем режиме. Основной недостаток этого способа — уменьшение пропускной способности фильтрующих элементов после каждой последующей регенерации. Регенерировать фильтр противодавлением можно до 4—5 раз, после чего производительность фильтрующих элементов снижается до такой степени, что их дальнейшее использование невозможно. Ниже приведена зависимость пропускной способности пористого фильтра от числа регенераций:

Число регенераций фильтра	Одна	Две	Три
Относительная пропускная способность, %	95	89	84

Химическую очистку, как правило, применяют совместно с механической, продавливая растворители через фильтр в направлении, обратном рабочему потоку жидкости или газа. Химическая очистка имеет ограниченное применение, так как материал фильтрующих элементов может вступать в реакцию с растворителем.

Термическая очистка имеет также ограниченное применение, поскольку требуется демонтаж фильтра и повторный контроль его характеристик.

Повышение эффективности регенерации можно достичь применением ультразвуковой регенерации, разработанной в СКТБ-МФ [74]. Испытания по очистке фильтрующих элементов показали, что ультразвуковой способ регенерации обеспечивает практически 100%-ную очистку фильтра от загрязнений.

Для ультразвуковой очистки применяют как низкочастотные ультразвуковые колебания порядка 20 кГц, так и колебания частотой до 100—300 кГц.

Выбор способа регенерации фильтров зависит от свойств примесей. Если примеси металлического происхождения, то можно применять механическую и химическую очистку. Неорганические примеси (окислы, песок, силикаты) не растворяются даже в крепких кислотах, поэтому в этом случае применяют механическую и ультразвуковую очистку. Органические примеси (органическая пыль, кусочки тканей, графит, сажа) удаляют механической, химической и термической очисткой.

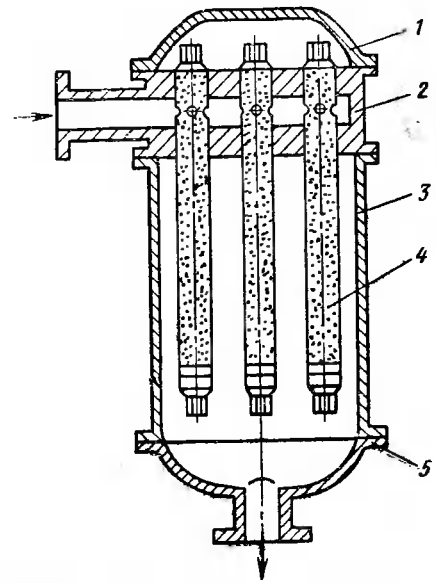


Рис. 67. Фильтр с трубчатыми фильтрующими элементами из пористого металла:
1 — крышка; *2* — опорный блок; *3* — корпус; *4* — фильтрирующий элемент; *5* — днище

Конструктивные схемы фильтров с металлическими пористыми фильтрующими элементами показаны на рис. 67—69. Принципиальное отличие конструкций фильтров состоит в форме фильтрующих элементов, которые можно выполнять в виде пластин, дисков, труб, конусов и т. п. Основная задача, решаемая при проектировании фильтров, состоит в обеспечении минимальных габаритов и массы фильтра при максимальной площади фильтрации и заданной тонкости очистки.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Для проектирования фильтра обычно задают следующие параметры: расход фильтруемого вещества и его свойства, допустимый перепад давления на фильтре, давление и температуру вещества на входе в фильтр, тонкость очистки, время работы фильтра и время воздействия фильтруемого вещества на пористый фильтрующий элемент (для выбора материала фильтра). В соответствии с указанными параметрами определяют материал, геометрические размеры (толщина и площадь фильтрации) и форму фильтрующего элемента.

Выбор материала фильтрующего элемента производят на основе сведений по коррозионной или окалийной стойкости пористого металла в фильтруемом веществе, а также исходя из прочностных и технологических характеристик пористого металла.

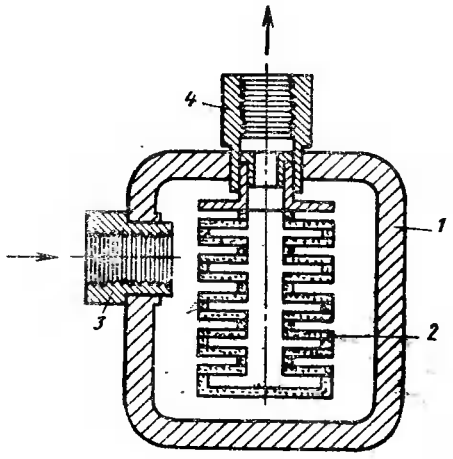


Рис. 68. Фильтр с дисковыми фильтрующими элементами из пористого металла:
1 — корпус; *2* — фильтрующий элемент; *3* — входной патрубок; *4* — выходной патрубок

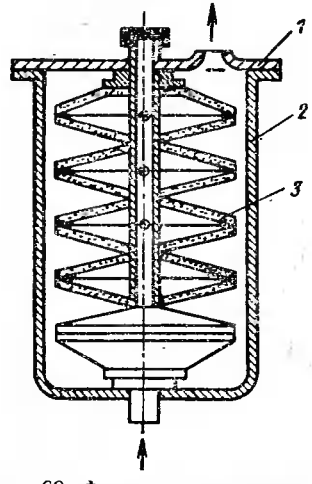


Рис. 69. Фильтр с тарельчатыми фильтрующими элементами из пористого металла:
1 — крышка; *2* — корпус; *3* — фильтрующий элемент

Последовательность расчета гидравлических характеристик пористых фильтрующих элементов состоит в следующем.

1. По заданной тонкости очистки определяют максимальный допустимый размер пор по соотношению

$$\frac{d_{\text{п max}}}{d_{\text{ч о}}} = 2 - 4, \qquad (155)$$

где $d_{\text{чо}}$ — требуемая тонкость очистки.

Соотношение (155) получено с учетом результатов исследований, проведенных в работах [9, 95, 117]. Как отмечалось выше, численное значение отношения максимального размера пор к наибольшему размеру частиц, прошедших через фильтр, зависит от формы и размеров частиц, из которых получен пористый фильтрующий элемент. Для пористых металлов, изготовленных из сферических порошков, это отношение близко к 2 и практически не зависит от размера частиц. Для пористых металлов, полученных из порошков с произвольной формой частиц, отношение максимального размера пор к тонкости очистки изменяется от 2 до 4 в зависимости от формы и размера частиц. Однако в настоящее время нет достаточных рекомендаций по выбору указанного отношения в зависимости от формы и размеров частиц, поэтому целесообразно во всех случаях принимать отношение максимального размера пор к тонкости очистки, равное 2.

2. Значение максимального размера пор, а также вид пористого металла (бронза, сталь, вольфрам и т. д.) позволяют найти средний размер пор и средний размер фракции частиц, из которых должен быть получен пористый металл для фильтрующих элементов.

Для расчета необходимо задавать значение пористости фильтрующих элементов в пределах 0,2—0,7, отдавая предпочтение значениям пористости 0,3—0,5, поскольку эти значения пористости соответствуют удовлетворительным прочностным характеристикам пористых металлов и высокой пропускной способности.

Размер фракций подбирается по экспериментальным зависимостям вида (25), (37), полученным для пористых металлов, изготовленных из порошков определенного фракционного состава. Размеры фракций порошков, применяемых в практике изготовления пористых металлов, изменяются обычно от 3 до 1000 мкм.

По технологическим и прочностным соображениям назначается толщина пористого фильтрующего элемента. Обычно $l \geqslant 0{,}25$ мм.

3. По допустимому перепаду давления на фильтрующем элементе, известному давлению на входе в фильтр и характеристикам пористого металла определяется скорость движения фильтруемого вещества в порах по критериальным зависимостям вида (129), полученным экспериментально для данного пористого металла. В расчете плотность и вязкость фильтруемого вещества определяют по средним давлению и температуре, по толщине пористого элемента. Обычно принимают

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{вх}} - \frac{\Delta P_{\text{доп}}}{2}; \qquad (156)$$

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{вх}}. \qquad (157)$$

Если для выбранного пористого металла нет критериальной зависимости вида (129), справедливой для всех режимов течения, то для предварительного расчета надо использовать критериальные зависимости, полученные для переходной области течения жидкости в порах. Затем по значению критерия Рейнольдса необходимо уточнить режим течения жидкости в порах и сделать пересчет, если критериальная зависимость выбрана неправильно.

5. По значению скорости фильтруемого вещества в порах и заданному расходу вещества определяется площадь рабочей поверхности фильтруемого элемента по формуле

$$F_{\Phi} = \frac{G}{W_{\text{п}} \Pi g \rho}, \qquad (158)$$

где F_{Φ} — площадь рабочей поверхности фильтрующего элемента; G — секундный расход фильтруемого вещества через фильтр; ρ — плотность фильтруемого вещества.

Если поверхность фильтрующего элемента не соответствует условиям компоновки и ее необходимо уменьшить, то целесообразно увеличить допустимый перепад давления на фильтре или уменьшить толщину фильтрующего элемента.

3. ПОРИСТОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Современные двигатели различных типов работают при высоких параметрах рабочего тела. Температура рабочего тела в ряде случаев превышает 3000° С, а давление достигает десятков, а иногда и сотен атмосфер. Скорости движения рабочего тела также высоки, что обуславливает высокое тепловое и эрозионное воздействие рабочего тела на стенки камер сгорания, лопатки турбин и другие элементы конструкции двигателей.

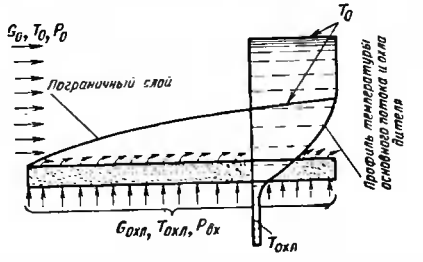


Рис. 70. Схема пористого охлаждения

Одним из наиболее эффективных способов защиты конструкций от теплового воздействия считается пористое охлаждение, которое предусматривает изготовление деталей из пористых металлов, через поры которых во время работы подается охладитель (газ или жидкость) на поверхность, соприкасающуюся с нагретым рабочим телом. Принципиальная схема пористого охлаждения показана на рис. 70. Охладитель под действием перепада давления $P_{вх}$—P_0 поступает на внутреннюю поверхность камеры сгорания и создает пристеночную зону с пониженной температурой. Температура пористой стенки оказывается ниже температуры непроницаемой стенки, работающей в тех же условиях, что и пористая стенка, по двум причинам: снижается тепловой поток от рабочего тела к стенке из-за уменьшения температуры газа в пристеночной зоне (внешняя тепловая защита); часть тепла, поступившего в пористую стенку, отбирается охладителем при движении его в порах стенки (внутренняя тепловая защита).

Температурный режим работы пористого охлаждения зависит от количества охладителя, проникающего через поры. Расход охладителя определяется перепадом давления на пористом

элементе и его гидравлическим сопротивлением. Для расчета гидравлического сопротивления пористой стенки необходимо знать изменение температуры охладителя по толщине пористой стенки, чтобы правильно выбрать значения физических констант охладителя.

Расчет профиля температуры пористой стенки обычно ведут при условии, что коэффициент теплоотдачи в порах, отнесенный к единице объема пористого тела, велик и представляет собой величину, стремящуюся в бесконечность, т. е. $\alpha_V \to \infty$. Это допущение позволяет считать, что по толщине пористого тела температура охладителя практически равна температуре пористой стенки.

Исходными данными для расчета гидравлического сопротивления пористой стенки являются: вид охладителя, его свойства и начальная температура; материал пористой стенки, его свойства и толщина; уровень тепловых потоков от рабочего тела в пористую стенку и параметры рабочего тела.

Удельный расход охладителя определяется из уравнения теплового баланса по формуле

$$j = \frac{q}{C_{\text{р}} (T_2 - T_{\text{охл}})}, \qquad (159)$$

где q — удельный тепловой поток от рабочего тела к пористой стенке; $C_{\text{р}}$ — удельная теплоемкость охладителя; T_2 — температура пористой стенки со стороны рабочего тела; $T_{\text{охл}}$ — начальная температура охладителя.

Температура пористой стенки со стороны камеры сгорания определяет работоспособность конструкции и обычно задается, исходя из уровня допустимых температур для конкретного пористого металла.

Удельная теплоемкость охладителя зависит от его температуры и в первом приближении определяется по среднеарифметической температуре

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_2 + T_{\text{охл}}}{2}. \qquad (160)$$

Профиль температуры пористой стенки охладителя определяется по формуле

$$\frac{T - T_{\text{охл}}}{T_2 - T_{\text{охл}}} = e^{-\frac{jC_{\text{р}}l}{\lambda_{\text{ст}}}\left(1 - \frac{x}{l}\right)}, \qquad (161)$$

где T — температура пористой стенки в сечении x; $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности пористой стенки; x — толщина стенки от входа до рассматриваемого сечения.

Полагая $x = 0$, из соотношения (161) можно определить температуру пористой стенки со стороны входа охладителя. Расчет профиля температур пористой стенки проводят методом после-

довательных приближений, поскольку физические константы C_p и $\lambda_{ст}$ зависят от температуры. Обычно для обеспечения 2%-ной погрешности в значении температуры пористой стенки на входе достаточно выполнить четыре-пять приближений.

На рис. 71 приведены результаты расчета профиля температур пористой стенки и охладителя при условии, что в качестве охладителя используется воздух с начальной температурой 20°С; удельный тепловой поток равен 10^6 ккал/(м^2××ч·°О); материал пористой стенки — нержавеющая сталь толщиной 3 мм; допустимая температура пористой стенки 800°С.

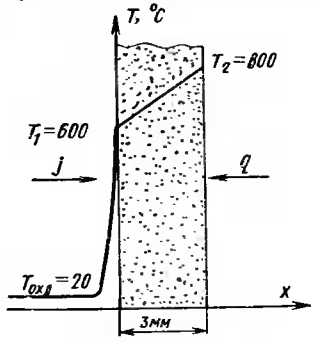


Рис. 71. Распределение температуры охладителя и пористой стенки по направлению потока охладителя

Профиль температуры со стороны входа охладителя в пористую стенку рассчитан по формуле

$$\frac{T - T_{охл}}{T_1 - T_{охл}} = e^{\frac{jC_p x}{\lambda_г}}, \qquad (162)$$

где T — температура охладителя в сечении x; $\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности воздуха; x — расстояние от пористой стенки до рассматриваемого сечения в охладителе.

Результаты расчетов показывают, что температура охладителя на входе в поры существенно отличается от начальной температуры охладителя. Поэтому для правильного определения гидравлического сопротивления пористой стенки физические константы охладителя плотность и вязкость в критериальных зависимостях необходимо вычислять по средней температуре охладителя в порах, т. е. при $T_{ср} = \frac{T_1 + T_2}{2}$, а не по температуре, рассчитанной по формуле (160).

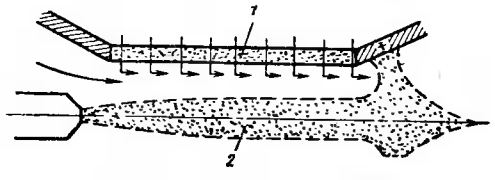


Рис. 72. Схема стабилизированного источника плазмы (*2*) с пористым охлаждением (*1*)

Пористое охлаждение используется при высоких температурах газового потока. Так, при температуре газового потока 3000°С удается с помощью пористого охлаждения снизить температуру стенки до 800°С и ниже при расходе охладителя в несколько раз меньше, чем при регенеративном охлаждении.

Пористое охлаждение можно эффективно использовать для тепловой защиты стенок стабилизирующего канала электродуговых нагревателей (рис. 72). Теоретические исследования [7] показали, что нагреватель с пористым охлаждением имеет преимущества перед нагревателем с водяным регенеративным охлаждением в тех случаях, когда необходимо получить максимальную температуру вплоть до 60 000° С в ядре газовой струи ограниченного размера.

4. ДРУГИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Кроме рассмотренных выше областей применения пористые металлы используют в качестве ионизаторов в ионных двигателях; огнепреградителей для гашения быстрогорящих газовых смесей; деталей корпусов самолетов для ввода газов или жидкостей в пограничный слой или отсоса пограничного слоя; пористых электродов в химических источниках тока; смесительных элементов и т. п.

Пористый вольфрам и пористый сплав вольфрама с рением использовали для ионизаторов цезиевого двигателя как элемент поверхностной ионизации [66]. Результаты исследований показали, что 50%-ное уменьшение проницаемости для пористых ионизаторов, изготовленных из порошков вольфрама с частицами диаметром от 3,5 до 4,0 мкм, достигается за 2000 ч при температуре ионизатора около 1200° С. Ресурс работы ионизатора, изготовленного из частиц размером 6 и 7 мкм, в тех же условиях составил 10 000 ч.

Особое внимание при разработке пористых ионизаторов уделяется способам соединения ионизатора с конструктивными элементами двигателя. Узлы соединения не должны изменять свойств пористого пространства и нарушать ионизационные характеристики поверхности пор. Наиболее распространенными способами соединения пористых тугоплавких металлов с несущими металлическими конструкциями являются электродуговая сварка в инертной среде высокой чистоты и пайка. Сварка дает хорошие результаты на материалах с пористостью ниже 0,28, а использование пайки ограничено из-за диффузии припоя в конструкцию ионизатора, что приводит к изменению ионизационных характеристик поверхности пор.

Разработан [44] новый способ соединения вольфрамового или танталового ионизатора высокой пористости с тонкой несущей конструкцией из монолитного тантала (рис. 73). На боковую поверхность пористого ионизатора *1* наносится методом осаждения паров тонкий слой тантала *2*, после чего покрытие сваривают с несущей конструкцией *3*. Для соединения несущей конструкции из тантала с покрытием применяют электродуговую сварку в химически инертной среде или сварку лазерным

лучом. Механические испытания показали высокую прочность соединения.

Использование пористых металлов в качестве огнепреградителей основано на возможности гашения пламени при прохождении узких капилляров. Гасящее действие пористых тел основано на интенсивной теплоотдаче от газа к развитой поверхности пор. Исследованы пористые огнепреградители, изготовленные из порошков нержавеющей стали 14Х17Н2 [52]. Экспериментально показано, что критическое значение критерия Пекле для ацетиленокислородного пламени равно 65, а для водородно-кислородного пламени $Re_{кр}=60$. Ранее теоретически показано, что для огнепреградителей других типов (сетки, насадки шариков и т. д.) критическое число Пекле также равно 65:

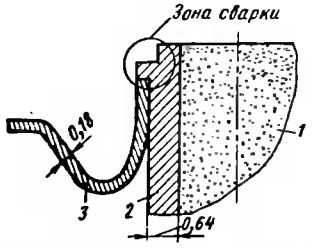


Рис. 73. Схема узла соединения пористого ионизатора:
1 — ионизатор (70% W + 30% Та), *П*=0,17; *2*—покрытие из тантала; *3* — несущая оболочка из тантала

$$Re_{кр}=\frac{v_п d_{п\,max} C_p P}{RT\lambda}, \qquad (163)$$

где $v_п$ — нормальная скорость распространения пламени горючей смеси; C_p, λ — удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности газовой смеси; P, T, R — давление, температура и газовая постоянная смеси.

На основании проведенных исследований разработаны [102] надежные конструкции сухих предохранительных затворов для природного газа на пропускную способность 5 и 20 м³/ч. Основные характеристики предохранительных затворов приведены в табл. 44.

Таблица 44

Характеристики предохранительных затворов с пористыми вставками из бронзы

Наименование	ЗСС-1-60	ЗСС-2-60
Пропускная способность, м³/ч	20	5
Перепад давления на затворе, кгс/см²	0,35	0,35
Давление перед затвором, кгс/см²:		
максимальное	1,0	1,0
минимальное	0,45	0,45
Габариты, мм:		
диаметр	185	90
высота	440	138
Масса, кг	16,5	1,9

Один из методов борьбы с обледенением самолетов состоит в подводе подогретого воздуха или специально испаряющейся жидкости через пористые пластины, расположенные на передних кромках крыльев и хвостового оперения. Для этой цели, по данным работы [128], использовали пористую бронзу и нержавеющую сталь. В последнем случае применяли пластины (пористость 0,15—0,20, толщина 0,6—1,2 мм), через которые подавали нагретый до 350° С воздух от компрессора. При посадке и взлете самолетов для улучшения характеристик крыла применяли отсос пограничного слоя воздуха через пористые материалы.

Пористые металлы можно использовать для подачи компонентов топлива в камеру сгорания жидкостного ракетного двигателя. Для повышения эффективности смешения топлива горючее и окислитель подаются через последовательно чередующиеся пористые вставки. Преимуществами данной конструкции головки камеры сгорания являются: простота регулирования тяги за счет варьирования перепада давления на пористых вставках; отсутствие системы охлаждения головки камеры сгорания, так как пористые вставки охлаждаются компонентами топлива при движении их в порах [123].

В работе [130] предлагается использовать пористые головки в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей, что позволит уменьшить размеры и массу камер сгорания, а также повысит стабильность процесса горения. Эти эффекты достигаются за счет малого размера пор, что обеспечивает быстрое испарение и смешение компонентов топлива.

Одним из способов регулирования тяги жидкостных ракетных двигателей считается насыщение компонентов топлива газами перед впрыском в камеру сгорания. Смешение газов и жидкостей в таких двигателях происходит при вдуве газов через вставку, изготовленную из пористых металлов. Конструктивная схема смесителя показана на рис. 74 [123].

При изготовлении аккумуляторных пластин из серебра, алюминия и других материалов используют такие их свойства, как пористость и проницаемость. Анодные пластины, изготовленные методом порошковой металлургии, при незначительных размерах обладают очень большой активной массой и удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к аккумуляторным пластинам.

Пористые платиновые электроды получают все более широкое распространение в электрохимии, в частности в химических источниках тока. Нормальная работа таких устройств во многом зависит от структуры пористого электрода, в том числе от количества, размера и формы пор. Некоторые характеристики пористых платиновых электродов приведены в табл. 45.

Дальнейшее расширение областей применения пористых металлов определяется усовершенствованием старых и созданием

Таблица 45

Характеристики пористых платиновых электродов [87]

Размер ячейки, мкм	Максимальная температура термообработки, °С	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность порошка, м²/г	Средний размер пор, мкм
—	1000	52	0,120	10
600	1500	60	0,053	30
100	1000	—	0,102	—
200	1500	170	0,045	50
—	1000	350	0,140	70
630	1500	500	—	150

новых высокоэкономичных и технологичных видов пористых металлов, обладающих высокой стабильностью характеристик как в процессе изготовления изделий, так и при их эксплуатации.

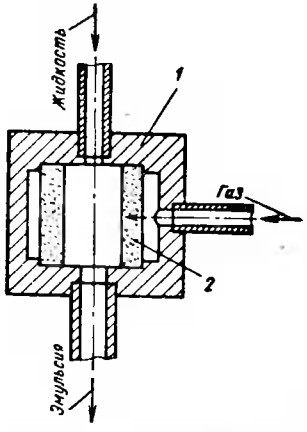


Рис. 74. Схема пористого смесителя:
1 — корпус; *2* — пористая вставка

В ряде исследований рассматриваются возможности создания пористых металлов путем напекания порошков на металлическую сетку, которая в данном случае используется как укрепляющая подложка. Такой синтез порошковой и сетчатой технологии весьма перспективен, поскольку позволяет получать тонкие изделия высокой прочности, которые допускают гибку, гофрирование и т. п.

В настоящее время разработаны пористые сетчатые материалы, полученные прессованием или прокаткой металлических сеток с последующим спеканием или сваркой. Американские фирмы выпускают сетчатые пористые металлы из нержавеющей стали и жаропрочных сплавов в виде листов размером до 1800×600 мм и толщиной 0,38—3,2 мм. Изготовляют цилиндры диаметром до 460 мм и длиной до 600 мм, конусы и турбинные лопатки. Характеристики сетчатых пористых металлов довольно высоки. При температурах 20, 800 и 900°С прочность пористого материала из нержавеющей стали составляет соответственно 26,2; 15,4 и 9,4 кгс/мм² при удлинении 8,7; 5,5 и 0,8%. Проницаемость и тонкость очистки сетчатых пористых металлов также высоки. Разрабатываются пористые материалы и из тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, тантала, ниобия). Эти материалы предназначены для изготовления ионизаторов, катодов, охлаждаемых сопл ракетных двигателей, фильтрации расплавленных металлов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдулвагабов А. И.** О пределе применимости линейного закона фильтрации.— «Азербайджанское нефтяное хозяйство», 1960, № 9, с. 29—32.
2. **Абдулвагабов А. И.** О режиме движения жидкостей и газов в пористой среде.— «Известия вузов. Нефть и газ», 1961, № 2, с. 79—85.
3. **Агте К., Оцетек К.** Металлокерамические фильтры. М., Судпромгиз, 1959, 136 с.
4. **Акопян Л. А., Касаткин А. Г.** Гидродинамика слоя зернистого материала. — «Химическая промышленность», 1955, № 2, с. 30—33.
5. **Аксенов Г. И., Заббаров Р.** О теплофизических константах пористых металлокерамических материалов.— «Порошковая металлургия», 1967, № 6, с. 39—43.
6. **Амаглобели И. П.** О нижнем пределе применимости основного закона фильтрации. Труды Грузинского Политехнического института им. Ленина Тбилиси, изд-во ГПИ им. Ленина, 1966, № 4 (109), с. 123—132.
7. **Аидерсон, Эккерт.** Пористое охлаждение стабилизированного электродугового нагревателя.— «Ракетная техника и космонавтика». Т. 5, 1967, № 4, с. 113—122.
8. **Андриевский Р. А., Федорченко И. М.** Изменение открытой и закрытой пористости при спекании пористых тел.— «Украинский химический журнал». Т. 26, вып. 5, 1960, с. 616—620.
9. **Андриевский Р. А.** Пористые металлокерамические материалы. М., «Металлургия», 1964, 187 с.
10. **Аинщенко Л. М., Гусев И. Т., Чижов В. Н.** Зависимость коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления пористого молибдена от температуры.— «Физика и химия обработки материалов», 1970, № 6, с. 120—125.
11. **Аравин В. И., Нумеров С. Н.** Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М., Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953, 616 с.
12. **Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Федорченко И. М.** Исследование свойств порошков и спекаемости пористых брикетов из электролитического и восстановленного титана.— «Порошковая металлургия», 1968, № 5, с. 28—35.
13. **Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Федорченко И. М.** Исследование стойкости пористого титана в некоторых агрессивных средах.— «Порошковая металлургия», 1968, № 12, с. 59—64.
14. **Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Гатушкин А. А.** Металлокерамические фильтры из титана.— «Порошковая металлургия», 1969, № 10, с. 93—99.
15. **Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Федорченко И. М.** Технология получения и свойства пористых материалов из сплавов титан — молибден.— «Порошковая металлургия», 1970, № 12, с. 39—42.
16. **Ахматов А. С.** Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963, 472 с.
17. **Бальшин М. Ю.** Порошковая металлургия. М., Машгиз, 1948, 286 с.
18. **Башта Т. М.** Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. М., Оборонгиз, 1961, 475 с.
19. **Белицкий М. Е.** Разработка технологии изготовления и изучение некоторых свойств спеченного нихрома Х20Н80.— «Порошковая металлургия», 1965, № 9, с. 59—64.
20. **Белов С. В.** Определение средних размеров пор спеченных пористых металлов.— «Известия вузов. Машиностроение», 1966, № 1, с. 158—163.
21. **Белов С. В.** Исследование вида пор прессованных пористых металлов.— «Известия вузов. Машиностроение», 1966, № 2, с. 143—147.
22. **Белов С. В., Картуесов О. Г., Поляев В. М.** О пределе применимости закона ламинарной фильтрации в пористых металлах.— «Известия вузов. Машиностроение», 1971, № 2, с. 79—83.
23. **Белов С. В., Поляев В. М., Картуесов О. Г.** О пределе применения закона ламинарной фильтрации в пористых металлах.—«Известия вузов. Машиностроение», 1971, № 3, с. 72—75.

24. **Белов С. В., Картуесов О. Г., Поляев В. М.** Коэффициенты потерь давления в пористой среде при ламинарном течении жидкости в порах.— «Известия вузов. Машиностроение», 1971, № 4, с. 79—84.

25. **Белов С. В., Картуесов О. Г., Слепцова Н. П.** Гидравлическое сопротивление пористого железа.— «Порошковая металлургия», 1972, № 1, с. 71—76.

26. **Белов С. В., Павлихин Г. П.** О некоторых особенностях фильтрации жидкостей через пористые металлы.— «Известия вузов. Машиностроение», 1972, № 6, с. 70—76.

27. **Белянин П. Н., Черненко Ж. С.** Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. М., «Машиностроение», 1964, 294 с.

28. **Беркман А. С.** Пористая проницаемая керамика. М., Госстройиздат, 1959, 172 с.

29. **Беркман А. С., Мельникова И. Г.** Пористая проницаемая керамика. Л., Стройиздат, 1969. 141 с.

30. **Богачева А. В.** Пневматические элементы систем автоматического управления. М., «Машиностроение», 1966, 240 с.

31. **Владимирская С. И., Павловская Е. И., Чернопятова А. П.** Двухслойные фильтры. Сб. статей «Металлокерамические фильтры» Под ред. В. И. Рощупкина, вып. I (II). М., «Машиностроение», 1965, с. 20—25.

32. **Гатушкин А. А., Солонин С. М.** Исследование фильтрующих свойств двухслойных металлокерамических фильтров.— «Порошковая металлургия», 1966, № 7, с. 32—37.

33. **Гатушкин А. А., Солоиин С. М.** Двухслойные фильтры для тонкой очистки жидкости.— «Порошковая металлургия», 1969, № 7, с. 36—40.

34. **Гидростатическое** прессование порошков стали.— «Порошковая металлургия», 1969, № 7, с. 13—17.

Авт.: Меерсон Г. А., Исланкина А. Ф., Мельников В. Н., Гольдман Л. Д.

35. **Гликман Л. С., Рощупкин В. И., Павловская Е. И.** Металлокерамические фильтры для задержания песка при добыче нефти.— «Нефтяное хозяйство», 1959, № 12, с. 30—36.

36. **Голдобеев В. И., Дружиин С. А.** О выборе определяющего размера для пористых металлов. Труды КАИ. Казань, изд-во КАИ. Вып. 66, 1961, с. 63—72.

37. **Дергач Ю. И.** Зависимость для определения фильтрационной способности крупнозернистой среды.— «За технический прогресс». 1966, № 2, с. 37—39.

38. **Дерягин Б. В.** Измерение удельной поверхности пористых и дисперсных тел по сопротивлению течению разреженных газов. Доклады АН СССР. Т. 53, 1946, № 7, с. 627—630.

39. **Дмитриев В. Д.** Определение предельных значений чисел Рейнольдса для разных режимов движения жидкостей и газов при фильтрации.— «Водоснабжение и санитарная техника», 1969, № 4, с. 9—12.

40. **Дружинин С. А.** О расчете внутреннего теплообмена при пористом охлаждении.— «Теплоэнергетика», 1961, № 9, с. 73—77.

41. **Дружинин С. А.** О равномерности проницаемости пористых металлов.— «Порошковая металлургия», 1966, № 7, с. 97—101.

42. **Дубровский А. П., Исаев П. А.** Исследование газопроницаемости пористых материалов.— «Порошковая металлургия», 1966, № 1, с 46—49.

43. **Дубровский А. П., Михалев В. И., Петруничев В. А.** Свойства сферического порошка вольфрама.— «Порошковая металлургия». 1969, № 6, с. 1—4.

44. **Дьюи.** Новый метод соединения пористых тугоплавких металлов.— «Ракетная техника и космонавтика». Т. 7, 1969, № 7, с. 232—233.

45. **Ермаков В. В.** Гидравлический привод металлорежущих станков. М., Машгиз, 1963, 324 с.

46. **Жаворонков Н. М., Фурмер И. Э.** Гидросопротивление зернистого слоя при малых скоростях. Труды МХТИ им. Менделеева. М., изд-во «Советская наука». Вып. XVII, 1952, с. 91—95.

47. **Железовский В. А., Шахов Ф. Н.** Состояние потока, протекающего через пористые перегородки. В сб. статей НИИХИММАШ. М., Машгиз. Вып. 5, 1950, с. 55—73.

48. **Ильин Ю. В.** Течение газа через пористые металлические перегородки.— «Известия вузов. Авиационная техника», 1959, № 1, с. 65—73.

49. **Исследование** гидравлических характеристик пористых металлов при низких температурах.— «Химическое и нефтяное машиностроение», 1971, № 11, с. 13—14.

Авт.: Белов С. В., Лебедев М. Е., Картуесов О. Г., Попов А. Ю.

50. **Исследование** закономерностей течения воздуха через пористые материалы из дендритных порошков.— «Порошковая металлургия», 1967, № 12, с. 64—69.

Авт.: Федорченко И. М., Пугин В. С., Дыбан Е. П., Страдомский М. В., Максимов Е. А.

51. **Исследование** кинетики пропитки пористых металлокерамических тел.— «Физика и химия обработки материалов», 1968, № 2, с. 101—110.

Авт.: Борок Б. А., Голиков И. Н., Горяев Г. А., Дзнеладзе Ж. И., Кунин Л. Л., Лобашев Б. П.

52. **Исследование** пористых металлокерамических огнепреградителей для локализации ацетилено-кислородного и водородно-кислородного пламени.— «Порошковая металлургия», 1967, № 9, с. 18—22.

Авт.: Стрижевский И. И., Солонин С. М., Пугин В. С., Федорченко И. М., Сидорина И. Ю.

53. **Исследование** фильтрующих свойств пористых материалов из несферических частиц.— «Порошковая металлургия», 1968, № 7, с. 49—54.

Авт.: Гатушкин А. А., Головко Ю. С., Солонин С. М., Пугин В. С.

54. **Ишкин И. П., Каганер М. Г.** Исследование свойств керамических фильтров по размерам пор.— «Кислород», 1949, № 2, с. 35—45.

55. **Ишкин И. П., Каганер М. Г.** Гидравлическое сопротивление пористых сред.— «Кислород», 1952, № 3, с. 8—21.

56. **Каминский Я. А.** Движение жидкостей и газов в пористом металлокерамическом материале.— «Порошковая металлургия», 1965, № 8, с. 55—61.

57. **Карев В. Н.** Потери напора при внезапном расширении трубопроводов.— «Нефтяное хозяйство», 1952, № 11, с. 55—59 и № 12, с. 47—50.

58. **Карев В. Н.** Потери напора при внезапном сужении трубопровода и влияние местных сопротивлений на нарушение потока.— «Нефтяное хозяйство», 1953, № 8, с. 50—56.

59. **Коллеров Д. К.** Гидродинамика поровой среды.— «Химическая промышленность», 1959, № 2, с. 163—169.

60. **Коллиз Р.** Течение жидкостей через пористые среды. М., «Мир», 1964, 350 с.

61. **Конев Ф. А., Андриевский Р. А., Федорченко И. М.** Металлокерамические фильтры для фильтрации воздуха и воды. — «Порошковая металлургия». 1965, № 11, с. 85—88.

62. **Кононенко В. И., Барановский В. М., Дущенко В. П.** Исследование теплопроводности пористого металлокерамического железа.— «Порошковая металлургия», 1968, № 3, с. 19—22.

63. **Красовский А. Я.** Некоторые закономерности деформирования и разрушения пористых металлокерамических материалов на основе железа «Порошковая металлургия», 1964, № 4, с. 1—9.

64. **Котяхов Ф. И.** О режимах фильтрации в пористой среде. Труды академии нефтяной промышленности. «Вопросы разведки и добычи нефти и газа». М.—Л., Гостоптехиздат. Вып. 1, 1954, с. 278—290.

65. **Кукота Ю. П., Пршедромирская Е. М., Слепцов В. М.** Газопроницаемость пористых материалов и тугоплавких соединений.— «Порошковая металлургия», 1965, № 11, с. 32—40.

66. **Кэркпатрик, Мендельсон.** Разработка пористых материалов для ионизаторов.— «Ракетная техника и космонавтика». Т. 5, 1967, № 3, с. 215—221.

67. **Ла Шанс, Кускевич, Томпсон.** Пористые вольфрамовые ионизаторы с высокими характеристиками, спеченные из порошка с калиброванным зерном сферической формы.— «Ракетная техника и космонавтика», 1965, № 8, с. 158—168.

68. **Левкоева Н. В.** О влиянии числа Рейнольдса на величину коэффициентов сопротивления диафрагм.— «Известия вузов. Авиационная техника», 1959, № 2, с. 105—112.

69. **Леднева Н. С.** Критическое значение числа Рейнольдса при фильтрации. В сб. «Санитарная техника». Л., изд-во ЛИСИ, 1963, с. 21—23.

70. **Лейбензон Л. С.** Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.—Л., Гостехиздат, 1947, 244 с.

71. **Ломизе Г. М.** Фильтрация в трещиноватых породах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951, 127 с.

72. **Малько П. И., Немченко В. Ф., Львов С. Н.** Расчет тепло-и электропроводности пористого вольфрама по формулам обобщенной проводимости.— «Порошковая металлургия», 1968, № 7, с. 55—59.

73. **Материалы** для изготовления металлокерамических фильтров. М., изд-во филиала ВИНИТИ, 1959, 15 с.

Авт.: Алексеева Ф. Н., Винокуров В. И., Глебова Р. Д., Раковский В. С.

74. **Металлокерамические** фильтры, применяемые в нефтяной и газовой промышленности. М., изд. ЦНИИТЭнефтегаз, 1964, 71 с.

75. **Минц Д. М., Шуберт С. А.** Гидравлика зернистых материалов. М., Минкоммунхоз РСФСР, 1955, 112 с.

76. **Михайлов Г. М., Николаев А. М.** Обобщенная закономерность гидравлики неподвижного зернистого слоя.— «Известия вузов. Химия и химическая технология». Т. VI, 1963, № 5, с. 861—864.

77. **Муллокандов Р. Н.** Гидравлическое сопротивление слоя сферических частиц при изотермическом и неизотермическом воздушном потоке.— Журнал технической физики. Т. XVIII, вып. 8, 1948, с. 1051—1062.

78. **Некоторые** тепловые и электрические свойства пористых вольфрамовых и вольфрамомолибденовых катодных материалов.— «Порошковая металлургия», 1966, № 5, с. 89—95.

Авт.: Львов С. Н., Малько П. И., Невская Л. В., Немченко В. Ф.

79. **Никитин Г. А., Чирков С. В.** Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. М., Транспорт, 1969, 183 с.

80. **Определение** локальной пористости проницаемых металлокерамических материалов.— «Порошковая металлургия», 1968, № 8, с. 78—83.

Авт.: Дыбан Е. П., Максимов Е. А., Пугин В. С., Страдомский М. В.

81. **Павловская Е. И., Шибряев Б. Ф.** Металлокерамические фильтры. М., «Недра», 1967, 164 с.

82. **Павловская Е. И., Горячева З. В.** Некоторые вопросы изготовления пористых изделий из вольфрама.— «Порошковая металлургия», 1968, № 4, с. 37—46.

83. **Писаренко Г. С., Трощенко В. Т., Красовский А. Я.** Исследование механических свойств пористого железа при растяжении и кручении.— Порошковая металлургия», 1965, № 6, с. 42—48.

84. **Писаренко Г. С., Трощенко В. Т., Красовский А. Я.** Исследование механических свойств пористого железа при растяжении и кручении.— «Порошковая металлургия», 1965, № 7, с. 88—96.

85. **Плаченов Т. Г.** Ртутная порометрическая установка ПМ-3. Л., изд. Ленинградского технологического ин-та им. Ленсовета, 1968, 22 с.

86. **Полубаринова — Кочина П. Я.** Теория движения грунтовых вод. М., Гос. изд. техн-теорет. лит., 1952, 676 с.

87. **Пористые** платиновые электроды.— «Порошковая металлургия», 1971, № 9, с. 88—93.

Авт.: Дмитренко В. Е., Трофимова А. А., Лаврентьев М. И., Новиков Г. Ф., Артемьева М. Б.

88. **Потапова Н. П.** Исследование воздействия ультразвука на течение чистой жидкости через пористые перегородки.— В сб. «Акустика и ультразвук». Киев, изд-во «Техника», 1966, № 2, с. 70—76.

89. **Применение** металлокерамических фильтров для очистки проб дымовых газов мартеновских печей.— «Порошковая металлургия», 1965, № 10, с. 99—106.

Авт.: Федорченко И. М., Коробко М. И., Пугин В. С., Мартынюк Г. Ф., Корниенко П. А., Киселев Ю. Е.

90. **Роза С. Н.** Осадка гидротехнических сооружений на глинах с малой влажностью.— «Гидротехническое строительство», 1950, № 9, с. 25—30.

91. **Сварка** пористой высоколегированной стали Х17Н2.— «Порошковая металлургия», 1964, № 4, с. 91—96.

Авт.: Каховский Н. И., Понизовцев А. М., Андриевский Р. А., Солонин С. М.

92. **Свойства** понизаторов из пористого вольфрама.— «Ракетная техника и космонавтика». Т. 3, 1965, № 6, с. 75—92.

Авт.: Уилсон, Шварцкопф, Сил, Хон.

93. **Семенов Г. А.** К вопросу о гидравлическом сопротивлении шаровой насадки.— В сб. трудов Поволжского лесотехнического ин-та им. Горького. Йошкар-Ола, Маргиз, 1956, № 50, с. 137—150.

94. **Слепцова Н. П., Солонин С. М., Чернышев Л. И.** Пористые проницаемые материалы из никельмолибденового сплава.— «Порошковая металлургия», 1968, № 12, с. 35—41.

95. **Солонин С. М., Слепцова Н. П. Чернышев Л. И.** Определение размеров пор фильтровых материалов из несферических порошков. «Порошковая металлургия», 1971, № 1, с. 38—44.

96. **Солонин С. М., Акименко В. Б.** Пористые материалы из электролитического хрома.— «Порошковая металлургия», 1971, № 7, с. 34—38.

97. **Степочкин Б. Ф.** Некоторые обобщения в гидравлике зернистого слоя. «Известия вузов. Химия и химическая технология». Т. II., 1959, № 3, с. 460—466.

98. **Сторожевский И. М., Руденко В. М.** Исследование прочности металлокерамических материалов при низких температурах.— В сб. «Термопрочность материалов и конструкционных элементов». Киев, изд-во «Наукова думка». Вып. 3, 1965, с. 43—48.

99. **Сторожевский И. М. Филатова Н. А.** Исследование закономерностей изменения прочности при изгибе иекоторых металлокерамических материалов на основе меди.— «Порошковая металлургия», 1965, № 5, с. 63—70.

100. **Сторожевский И. М., Филатова Н. А.** Исследование характеристик прочности и пластичности металлокерамических материалов в области низких температур.— «Порошковая металлургия», 1966, № 7, с. 69—72.

101. **Сторожевский И. М.** Об изменении прочности металлокерамических материалов при растяжении, срезе, изгибе и кручении в зависимости от пористости.— «Порошковая металлургия», 1968, № 9, с. 75—80.

102. **Стрижевский И. И., Тесменицкий Д. И.** Сухие металлокерамические предохранительные затворы для природного газа.— «Сварочное производство», 1961, № 9, с. 36—38.

103. **Сычева А. М., Егоров Н. Н.** Сопротивленне слоя крупной насадки при неизотермическом потоке.— «Химия и технология топлив и масел», 1963, № 8, с. 10—16.

104. **Тепловые** и электрические свойства пористого титана. «Порошковая металлургия», 1970, № 8, с. 35—38.

Авт.: Малько П. И., Аренсбургер Д. С., Пугин В. С., Немченко В. Ф., Львов С. Н.

105. **Тепло- и электропроводность** пористых никеля, железа и стали Х17Н2. — «Порошковая металлургия», 1969, № 1, с. 62—66.

Авт.: Малько П. И., Немченко В. Ф., Львов С. Н., Пугин В. С.

106. **Титановые** металлокерамические фильтры для очистки инъекционных растворов.— «Порошковая металлургия», 1971, № 9, с. 85—87.

Авт.: Фастовская А. Я., Слепцова Н. П., Корниенко П. А., Пугин В. С.

107. **Тихонов Г. Ф., Сорокин В. К.** Изготовление пористого титана прокаткой порошка.— «Порошковая металлургия», 1969, № 2, с. 107—109.

108. **Тихонов Г. Ф., Сорокин В. К.** Изготовление тонкостенных трубчатых фильтров из пористых листов титана.— «Порошковая металлургия», 1970, № 11, с. 97—99.

109. **Требин Г. Ф.** Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. М., Гостоптехиздат, 1959, 157 с.

110. **Трощенко В. Т., Красовский А. Я.** Прочность пористого железа при повторно-переменных нагружениях.— «Порошковая металлургия», 1965, № 5, с. 87—92.

111. **Троянский С. В., Харитоненко Г. Н.** О ламинарном и турбулентном движении подземных вод.— В сб. «Вопросы горного дела». М., «Недра», 1967, с. 187—191.

112. **Федоров И. М.** Коэффициент испарения, теплоотдачи и сопротивления при сушке зернистых материалов с продувкой воздуха через слой.— В сб. «Современные проблемы сушильной техники». Под ред. Лурье М. Ю. М.— Л., Госэнергоиздат. Вып. II, 1941, с. 64—91.

113. **Федорченко И. М., Андриевский Р. А.** Основы порошковой металлургии. Киев, изд-во АН УССР, 1961, 420 с.

114. **Федорченко И. М., Солонин С. М.** Высокотемпературная прочность и коррозионная стойкость пористых материалов из гранулированных порошков Cr и Cr — 30Ni. «Порошковая металлургия», 1968, № 2, с. 94—98.

115. **Химически** стойкие металлокерамические фильтры из отходов губчатого титана.— «Порошковая металлургия», 1964, № 4, с. 86—90.

Авт.: Крамник В. Ю. Семенов Ю. Н., Арутюнов Э. А., Морозов В. Н., Демченко О. Я.

116. **Шейдеггер А. Э.** Физика течения жидкостей через пористые среды. М., Гостоптехиздат, 1960, 249 с.

117. **Шибряев Б. Ф.** К вопросу зависимости размера пор и тонкости фильтрации металлокерамических фильтров от фракционного состава сферического порошка.— «Порошковая металлургия», 1963, № 4, с. 61—66.

118. **Шибряев Б. Ф.** О зависимости неравномерного распределения свойств по высоте металлокерамических фильтрующих элементов от технологии их изготовления. — «Порошковая металлургия», 1966, № 5, с. 74—79.

119. **Шибряев Б. Ф., Горячева З. В.** Производство металлокерамических фильтров в Японии.— «Порошковая металлургия», 1969, № 2, с. 94—99.

120. **Шишенко Р. И.** Гидравлика глинистых растворов. Баку, Азнефтеиздат, 1951, 136 с.

121. **Шмелев Л. С.** Промышленное освоение производства пористых лент из порошка нержавеющей стали и титана.— «Порошковая металлургия», 1971, № 1, с. 93—94.

122. **Шефер У. М.** Перспективы применения металлокерамических материалов в космонавтике. В сб. «Новое в порошковой металлургии». Перев. с англ. М., «Металлургия», 1970, с. 136—148.

123. **Реферативный** журнал «Авиационные и ракетные двигатели». Вып. 34, № 11. М., ВИНИТИ, 1967, с. 24—25.

124. **Arthur G.** Porosity and permeability changes during the sintering of copper powder. Journal of the institute of metals. v. 83, 1955, N 7, p. 329—336.

125. **Green L., Duwer P.** Fluid flow through porous metals. Journal of Applied Mechanics. v. 18, 1951, № 1, p. 39—45.

126. **Greenberg D.,B. Weger E.** An investigation of the viscous and inertial coefficients for the flow of gases through porous sintered metals with high pressure gradients. „Chemical Engineering Chemistry". V. XII, 1960, N 1, p. 8—19.

127. **Grootenhuis P.** The frow of gases through porous metal compacts. „Engineering". V. 167, 1949, N 4340, p. 291—292.

128. **Pall D. B.** Filtration of fluid catalyst fines from effuent gases. „Industrial and Engineering Chemistry". v. 45, 1953, N 6, p. 1197—1202.

129. **Potet P.** Filter aus Sintermetall, „Technische Rundschau". 1960, N 2, p. 25—31.

130. **Stengel R. F.** Stacked micro — orifice modules feed rocket fuel and oxidizer. „Design News". v. 22, 1967, N 3, p. 32—33.

Сергей Викторович Белов

ПОРИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор издательства *Н. П. Ошерова*
Технический редактор *Н. В. Тимофеенко*
Обложка художника *А. В. Проценко*
Корректор *А. А. Снастина*

Сдано в набор 19/XI 1975 г. Подписано к печати 26/II 1976 г. Т-03385 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 11,5 Уч.-изд. л. 12,3 Тираж 9000 экз. Заказ № 1760 Цена 63 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва Б-78, 1-й Басманный пер., 3,

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

63 коп.

МАШИНОСТРОЕНИЕ