

УДК 621.762

doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-24-34

Выбор метода изготовления пористых порошковых изделий фильтрующего назначения

А.Ф. Ильющенко¹, Р.А. Кусин², И.Н. Черняк¹, А.Р. Кусин¹, Е.Н. Еремин³

¹ Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа»

² Белорусский государственный аграрный технический университет

³ Омский государственный технический университет

Selecting a Method for the Manufacture of Porous Powder Filter Products

A.Ph. Plyushchanka¹, R.A. Kusin², I.M. Charniak¹, A.R. Kusin¹, E.N. Eremin³

¹ State Scientific Institution "O.V. Roman Powder Metallurgy Institute"

² Belarus State Agrarian and Technical University

³ Omsk State Technical University

Рассмотрены три метода повышения равномерности распределения свойств по площади порошковых фильтрующих материалов на разных этапах их изготовления. Показано, что гранулирование порообразователем металлических порошков повышает равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации в 2,3–3,5 раза. Сухое радиально-изостатическое прессование обеспечивает высокую равномерность распределения фильтрующих свойств, причем коэффициент вариации коэффициента локальной проницаемости не превышает 0,17. Радиальное обжатие позволяет повысить равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации на 15...22 % по сравнению с таковым для исходных порошковых фильтрующих материалов. Выбор метода определяется формой, размерами и свойствами изготавливаемых изделий и исходных порошков. Рассмотренные методы могут быть использованы в нефтехимическом машиностроении при изготовлении пористых порошковых изделий фильтрующего назначения, применяемых для улавливания частиц катализаторов, фильтров тонкой и грубой очистки топлива и масла.

Ключевые слова: порошковые изделия, фильтрующий материал, сквозные взаимосоединяющиеся каналы, площадь фильтрации

The article considers three methods of increasing the distribution uniformity of properties over the filtration area of powder filter materials at different stages of their manufacturing. It is shown that granulation of metal powders with a pore former increases the uniformity of permeability distribution over the filtration area by a factor of 2.3–3.5. Dry radial isostatic pressing ensures high distribution uniformity of properties, while the coefficient of variation of local permeability does not exceed 0.17. Radial compression allows increasing the uniformity of permeability distribution over the filtration area by 15...22 % compared to that for the original powder filter materials. The selection of the method used in practice is determined by the shape, size and properties of the manufactured products and initial powders. The considered methods can be used in petrochemical engineering for the manufacture of porous powder products for filtering purposes, used to trap catalyst particles, filters for fine and coarse fuel and oil purification.

Keywords: powder products, filter material, pores, end-to-end interconnecting channels, filtration area

Фильтрующие материалы на основе кварцевого песка [1], полимерных материалов [2], природных сорбентов [3], металлических порошков, сеток и волокон [4–8] получили широкое распространение в нефтехимической промышленности. Особенную роль среди них занимают порошковые фильтрующие материалы (ПФМ), изготовленные из металлических порошков [5–7].

Пористые порошковые изделия используют в качестве фильтрующих элементов распределителей газовых или жидкостных потоков [5], при эксплуатации которых осуществляется подвод жидкости или газа к поверхности ПФМ, либо отвод их от нее.

Распределители потоков применяют для улавливания частиц катализаторов, в трубопроводной арматуре при пневмотранспорте сыпучих сред, аэрации жидкостей для их перемешивания или насыщения газами, в качестве элементов пористого охлаждения (или нагрева), газораспределительных решеток для создания кипящего или псевдосжиженного слоя, аэростатических или гидростатических подшипников, в которых отсутствует соприкосновение трущихся поверхностей, огнепреградителей для локализации распространения пламени, глушителей шума и др.

При создании распределителя потока следует стремиться обеспечить стабильное распределение пор по поверхности фильтрации [5]. Это способствует равномерному распределению газа или жидкости по рабочей поверхности и является необходимым и определяющим условием хорошей работоспособности распределителя, а также обеспечивает улавливание загрязнителя требуемого размера, что повышает срок службы фильтра.

Технология изготовления ПФМ, как правило, включает в себя следующие основные этапы: подготовку исходной шихты (или порошка в случае однокомпонентной шихты), формование шихты (методом свободной насыпки в форму или с приложением давления в специальной оснастке), спекание, обработку заготовки (в случае необходимости) и контроль свойств изделия. Очевидно, что влиять на свойства ПФМ можно только на этапах подготовки шихты, ее формования и обработки заготовки.

Цель работы — выбор метода повышения равномерности распределения свойств по площади ПФМ, предназначенных для фильтрации жидкостей и газов, при разработке технологии их изготовления.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Как отмечено ранее, равномерность распределения свойств ПФМ по площади фильтрации можно повысить на этапах технологии изготовления. В связи с этим рассмотрены три метода решения этой задачи.

Гранулирование порошка порообразователем. Регулирование свойств ПФМ при традиционном прессовании металлического порошка ограничено размером его частиц и давлением прессования, а получаемые этим методом изделия имеют относительно невысокие пористость и проницаемость [5].

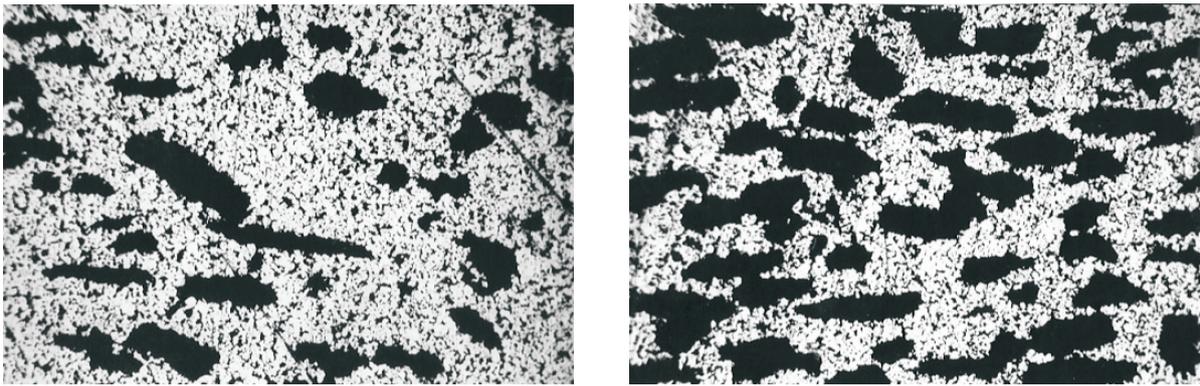
Одним из основных методов создания ПФМ с высокими пористостью и проницаемостью является введение в шихту порообразователей [5], что позволяет создать в материале так называемую бидисперсную структуру [5], состоящую из двух систем пор (сквозных сообщающихся каналов переменного сечения), существенно различающихся по размерам.

Первая система образована крупными порами, появляющимися в результате улетучивания добавок, вторая — мелкими естественными порами между частицами металлического порошка. Крупные поры, размер которых определяется количеством наполнителя и величиной его частиц, распределены в матрице, содержащей мелкие поры с размером, зависящим от величины частиц металлического порошка и давления прессования.

Такие бидисперсные структуры можно разделить на закрытые и открытые. К первым относятся структуры, у которых крупные поры, образованные порообразователем, изолированы друг от друга порошковой матрицей и практически не влияют на средний и максимальный размеры пор (рис. 1, а), ко вторым — у которых крупные поры создают сквозную сообщающуюся систему и полностью определяют средний и максимальный размеры пор (рис. 1, б).

Наиболее часто порообразователь вводят в шихту путем обычного смешивания [5, 9–11]. Однако такой метод не может обеспечить равномерное распределение порообразователя по объему прессовки и, соответственно, свойств ПФМ по поверхности, особенно когда в силу химической природы плотности компонентов смеси в шихте (порообразователя и металлического порошка) различаются в несколько раз [5].

Кроме того, низкая текучесть шихты не позволяет использовать пресс-автоматы для фор-



а

б

Рис. 1. Внешний вид закрытой (а) и открытой (б) бидисперсных структур пористых образцов

мования пористых заготовок. Особый интерес представляет метод [5], в котором шихту с порообразователем гранулируют водным раствором связующего (однопроцентным раствором поливинилового спирта), что улучшает текучесть шихты и дает возможность применить пресс-автоматы для ее формования.

Однако этот метод также не решает проблемы получения ПФМ с повышенной равномерностью распределения свойств ПФМ по поверхности фильтрации при прессовании металлических порошков с порообразователем.

Повышение равномерности распределения свойств ПФМ было достигнуто путем перевода порообразователя в растворенное состояние, засыпки его в подготовленный раствор металлического порошка, сушки при периодическом перемешивании, размола образовавшихся кон-

гломератов и просеивания через сита или, другими словами, путем гранулирования металлического порошка порообразователем [5, 12, 13].

Это обеспечило возможность использования пресс-автоматов, лучшие условия для хранения и транспортирования шихты. Кроме того, при таком методе гранулирования отсутствует необходимость в определенных параметрах влажности шихты для ее прессования.

Рассмотрены открытые бидисперсные структуры. Приведены результаты, полученные при гранулировании порошка электролитического никеля марки ПНЭ-1. В качестве порообразователя использовали карбамид. Растворителем являлась дистиллированная вода. На рис. 2 приведена микрофотография полученных гранул порошка электролитического никеля марки ПНЭ-1.

Установлено, что объемное отношение порообразователя к металлическому порошку должно находиться в диапазоне 0,5...1,2, а размер гранул — удовлетворять условию $H/3 > D_{гр} > 3D_ч$, где H — толщина материала в направлении фильтрации; $D_{гр}$ и $D_ч$ — средний размер гранул и частиц порошка.

При объемном отношении менее 0,5 и более 1,2 не удастся равномерно распределить порообразователь среди металлического порошка, что ухудшает гомогенность смеси и, соответственно, равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации.

При $D_{гр} \geq H/3$ существенно нарушается регулярность укладки гранул, что также ухудшает равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации. При $D_{гр} \leq 3D_ч$ структура пористого материала начинает приближаться к структуре материала, полученного

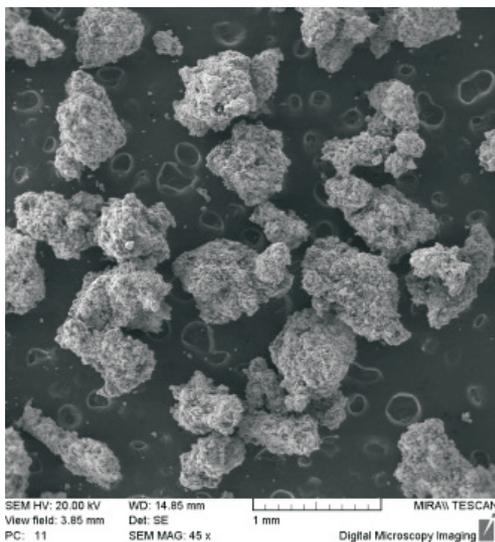


Рис. 2. Микрофотография полученных гранул порошка электролитического никеля марки ПНЭ-1

Таблица 1

Характеристики экспериментальных образцов

| Метод изготовления | Соотношение порообразователя (карбамида) и металлического порошка | Пористость, % | Толщина образца, мм | Средний размер гранул, мкм | Средний размер частиц порошка, мкм | Предел прочности при срезе, МПа | Коэффициент вариации распределения проницаемости по площади фильтрации |
|--|---|---------------|---------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--|
| Гранулирование порошка порообразователем | 1,0 | 0,62 | 3 | 472,5 | 60 | 50,40 | 0,12 |
| | 0,4 | 0,48 | 3 | 472,5 | 60 | 67,10 | 0,24 |
| | 0,5 | 0,51 | 3 | 472,5 | 60 | 64,0 | 0,16 |
| | 1,2 | 0,68 | 3 | 472,5 | 60 | 42,20 | 0,18 |
| | 1,3 | 0,70 | 3 | 472,5 | 60 | 38,67 | 0,21 |
| | 1,0 | 0,61 | 3 | 150,0 | 60 | 52,0 | 0,22 |
| | 1,0 | 0,62 | 1 | 472,5 | 60 | 48,4 | 0,24 |
| Смешивание | 1,0 | 0,59 | 3 | – | 60 | 40,20 | 0,42 |

смешиванием порошков и порообразователя, а следовательно, ухудшается равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации.

Перевод порообразователя в раствор позволяет связать его с металлическим порошком и гомогенизировать смесь, в результате чего порообразователь равномерно распределяется по объему засыпки, что приводит к повышению стабильности распределения проницаемости по площади фильтрации.

В табл. 1 приведены характеристики экспериментальных образцов в виде диска диаметром 30 и толщиной 3 мм, полученных путем гранулирования порообразователем (карбамидом) порошка никеля ПНЭ-1 и смешивания шихты того же состава.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что изготовление образцов путем гранулирования порошка порообразователем по сравнению с традиционным методом, позволяет повысить равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации в 2,3–3,5 раза (равномерность распределения проницаемости оценивали с помощью коэффициента вариации [14–16] распределения коэффициента локальной проницаемости по площади фильтрации) [5, 13].

Сухое радиально-изостатическое прессование. Этот метод предполагает прессование порошка в эластичной оболочке под действием всестороннего сжатия [5, 17–20]. Он основан на использовании деформирующего элемента, выполненного из высокоэластичного материала,

обладающего способностью полностью восстанавливать геометрию после больших деформаций. Такое прессование обеспечивает не только большой ресурс работоспособности, но и равномерное перераспределение порошка в формуемых заготовках. Этим методом в большинстве случаев изготавливают трубчатые изделия.

Для реализации сухого радиально-изостатического прессования предназначено универсальное устройство, схема которого приведена на рис. 3 [5]. Основными элементами устройства являются эластичный вкладыш 6, армированный стальными элементами 1, предусматривающими возможность монтажа уплотняющих элементов, и корпус 2, в центральное отверстие которого с кольцевым зазором (рабочей полостью) 3 помещен эластичный вкладыш.

Прессование порошка 5 осуществляется в форме, состоящей из формообразующего стержня (оправки) 7, эластичной оболочки 4 и фланца 8, предотвращающих высыпание порошка. Герметичный кольцевой зазор заполняют рабочей жидкостью, как правило, маслом. Центральное отверстие эластичного вкладыша образует рабочую камеру устройства, определяющую габаритные размеры используемой формы для прессования.

Размеры и форма прессуемого изделия определяются соответствующими параметрами формы для прессования. При создании высокого давления в рабочей полости устройства эластичные вкладыш и оболочка благодаря реологическим свойствам материала, из кото-

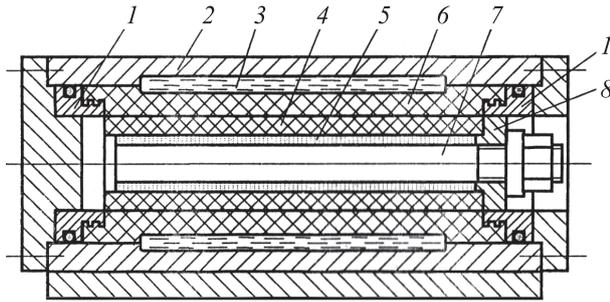


Рис. 3. Схема устройства для радиально-изостатического прессования

рого они изготовлены, равномерно перераспределяют давление на наружную поверхность уплотняемой заготовки, напрессовывая ее на оправку по всей длине. После сброса давления форму с изделием извлекают, и процесс повторяется.

В табл. 2 приведены результаты измерения коэффициента вариации коэффициента локальной проницаемости двух образцов: двухслойного фильтрующего элемента для тонкой очистки воды, изготовленного из титанового порошка фракций минус 80...плюс 40 и минус 400...плюс 315 мкм, имеющих коэффициент проницаемости $26,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ и средний размер пор 12 мкм, и диспергаторов озонородной смеси, выполненных из титанового порошка фракции минус 400...плюс 315 мкм с коэффициентом проницаемости $110,0 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ и средним размером пор 75 мкм. На каждом образце проводилось по пятьдесят измерений.

В настоящей работе приведены результаты исследований на примере мелкодисперсного несферического никелевого порошка в состоянии поставки и некоторых фракций несферических порошков титана и сферического порошка бронзы, выделенных рассевом порошка с помощью металлических сит. Гранулометрический состав фракции определяется диапазоном частиц порошка по размерам ячеек сит: число после слова «минус» характеризует размер

ячейки сита, через которое порошок данного фракционного состава «просеялся», число после знака «плюс» — на котором порошок был задержан.

Анализ полученных результатов показывает, что изделия, полученные сухим радиально-изостатическим прессованием, обладают высокой равномерностью распределения свойств по площади изделий: коэффициент вариации [14–16] коэффициента локальной проницаемости не превышает 0,17 [5].

Радиальное обжатие спеченных осесимметричных заготовок. Этот метод обеспечивает повышение проницаемости при заданной тонкости очистки [5]. Исследования выполняли на образцах в виде дисков диаметром до 30 мм и толщиной 1,5...3,0 мм, изготовленных из порошков оловянно-фосфористой бронзы БрО10Ф1.

Экспериментально установлено, что радиальное обжатие цилиндрических заготовок со степенью радиальной деформации сжатия $\epsilon = 0,7...1,1\%$ обеспечивает повышение равномерности распределения пор по размерам ПФМ d , мкм, на 26...29 % и распределения коэффициента локальной проницаемости по площади фильтрации на 15...22 %. На рис. 4 приведены дифференциальные кривые распределения пор по размерам ПФМ, спеченных из порошков с частицами фракции минус 400...плюс 315 мкм при разной степени деформации.

Анализ дифференциальных кривых распределения пор по размерам ПФМ показывает, что при степени деформации $\epsilon = 0,9\%$ пик кривой 2 незначительно смещается в область меньших величин пор, причем его высота, пропорциональная относительному количеству пор средней величины, возрастает более чем на 15 % по сравнению с пиком кривой 1 для исходного образца.

Сравнение микроструктур исходного образца (рис. 5, а) и образца, подвергнутого радиаль-

Таблица 2

Значения коэффициента вариации коэффициента локальной проницаемости образцов из ПФМ

| Вид образца | Среднее значение коэффициента локальной проницаемости $\bar{k} \cdot 10^{13}, \text{ м}^2$ | Среднеквадратичное отклонение $\bar{\sigma} \cdot 10^{13}, \text{ м}^2$ | Коэффициент вариации коэффициента локальной проницаемости δ |
|---|--|---|--|
| Фильтрующий элемент тонкой очистки воды | 26,1 | 4,284 | 0,17 |
| Диспергатор озонородной смеси | 110,0 | 15,680 | 0,14 |

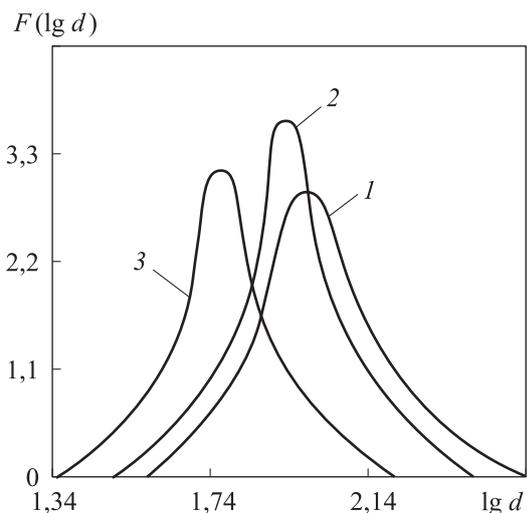


Рис. 4. Дифференциальные кривые распределения пор по размерам ПФМ, спеченных из порошков с частицами фракции минус 400...плюс 315 мкм при степени деформации $\varepsilon = 0$ (1), 0,9 (2) и 4,0 % (3)

ному обжатию со степенью деформации $\varepsilon = 0,9\%$ (рис. 5, б), свидетельствует о том, что в этом случае ПФМ имеет более упорядоченную структуру.

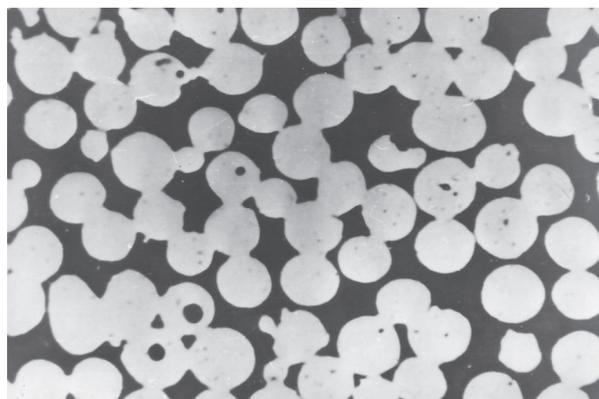
Дальнейшее увеличение степени деформации характеризуется появлением значительных пластических деформаций, возникающих на периферии образца и распространяющихся вглубь с увеличением радиальной деформации.

Анализ дифференциальных кривых распределения пор по размерам ПФМ, показывает, что пик кривой 3 (см. рис. 4) еще больше смещается в область мелких пор, а его высота уменьшается. То есть в пористом материале наблюдается возрастание количества мелких пор за счет пор средней величины, что не способствует повышению однородности порораспределения.

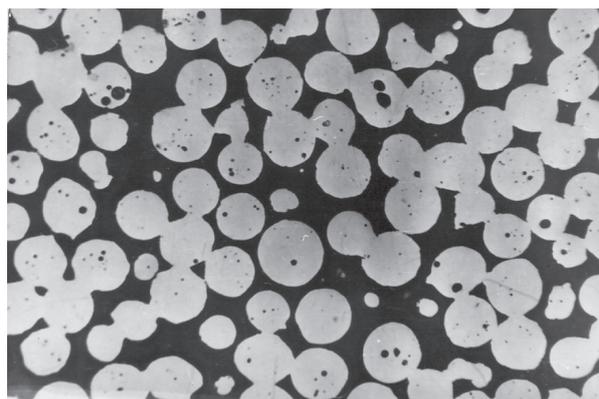
При степени деформации $\varepsilon = 4,0\%$ внешние частицы сильно деформируются, а часть их материала затекает в поры боковой поверхности. В то время как в центральной части образца существует зона с большой пористостью, что также не способствует повышению равномерности порораспределения (рис. 5, в).

В табл. 3 приведены значения коэффициента вариации [14–16] коэффициента локальной проницаемости δ , равного отношению среднеквадратичного отклонения $\bar{\sigma}$ к среднему значению коэффициента локальной проницаемости \bar{k} (определяли по пятидесяти измерениям коэффициента \bar{k} в различных точках образца, по методике, изложенной в работе [5]).

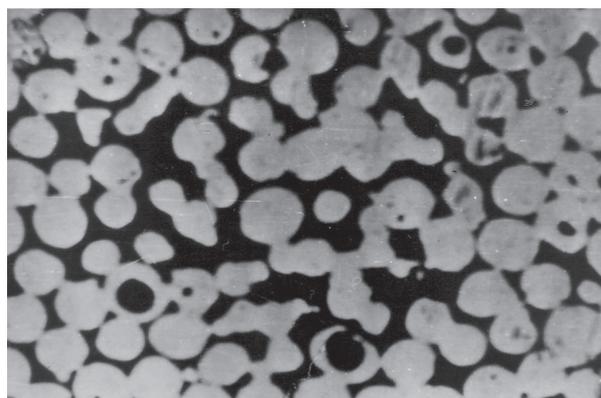
Анализ результатов исследований свидетельствует, что образцы из ПФМ, подвергнутые радиальному обжатию с оптимальной степенью деформации ($\varepsilon = 0,9\%$) имеют более равномерное распределение проницаемости по площади фильтрации. В этом случае коэффициент вариации коэффициента локальной проницаемости



a



б



в

Рис. 5. Микроструктуры различных образцов для порошка с частицами фракции минус 315...плюс 250 мкм при увеличении $\times 30$: *a* — исходного; *б* и *в* — подвергнутых радиальному обжатию со степенью деформации 0,9 и 4,0 % (в центральной части образца)

Таблица 3

Значения коэффициента вариации коэффициента локальной проницаемости образцов из ПФМ, подвергнутых радиальному обжатию

| Размер частиц порошка, мкм | ε , % | $\bar{k} \cdot 10^{12}$, м ² | $\bar{\sigma} \cdot 10^{12}$, м ² | δ |
|----------------------------|-------------------|--|---|----------|
| Минус 160...плюс 125 | 0,0 | 9,24 | 0,832 | 0,090 |
| | 0,9 | 9,08 | 0,663 | 0,073 |
| | 4,0 | 6,88 | 0,977 | 0,142 |
| Минус 315...плюс 250 | 0,0 | 41,72 | 4,225 | 0,102 |
| | 0,9 | 40,11 | 3,490 | 0,087 |
| | 4,0 | 29,27 | 4,713 | 0,161 |
| Минус 400...плюс 315 | 0,0 | 77,21 | 9,729 | 0,126 |
| | 0,9 | 75,64 | 7,413 | 0,098 |
| | 4,0 | 55,30 | 8,295 | 0,150 |

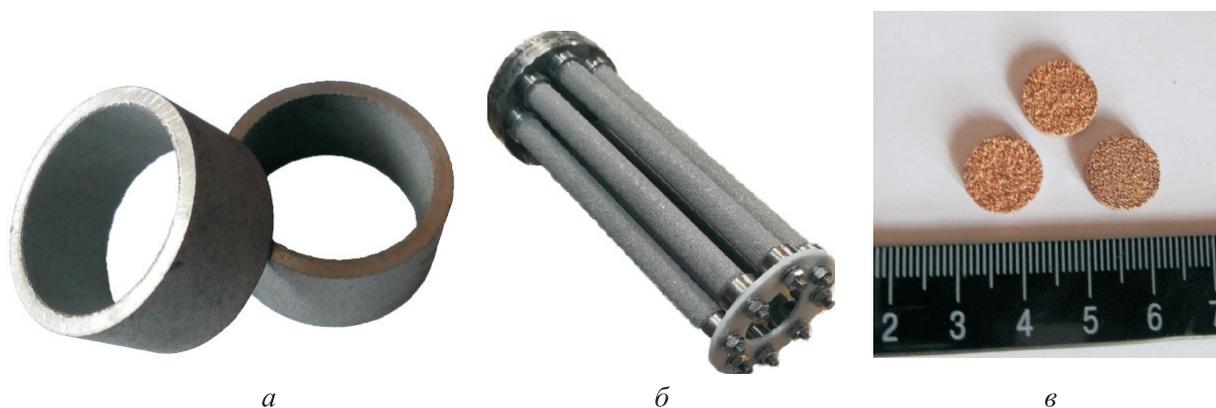


Рис. 6. Внешний вид фильтроэлементов для улавливания частиц катализаторов (а), тонкой очистки топлива (б) и защиты полости гидроцилиндра от загрязнения (в)

меньше на 15...22 %, чем у недеформированных ПФМ, и на 35...49 %, чем у образцов, подвергнутых обжатию со степенью деформации $\varepsilon = 4,0$ %.

Следует отметить, что рассмотренные методы изготовления изделий фильтрующего назначения можно использовать при применении исходных порошков любого размера с учетом некоторых особенностей порошковой металлургии. Например, гранулирование порошков порообразователем целесообразно осуществлять для мелкодисперсных порошков (так как его применяют для увеличения пропускной способности ПФМ), а радиально-изостатическое прессование — для длинномерных трубчатых изделий из несферических порошков.

Возможно и комбинирование различных методов (например, использование радиально-изостатического прессования при формовании гранулированных порошков или радиального

обжатию заготовок в виде диска, выполненных из гранулированных порошков).

Рассмотренные методы можно применять в любой отрасли, например в нефтехимическом машиностроении при изготовлении пористых порошковых изделий фильтрующего назначения для улавливания частиц катализаторов (гранулирование порообразователем мелкодисперсных порошков никелевых и коррозионно-стойких сталей), тонкой и грубой очистки топлива (сухое радиально-изостатическое прессование титановых порошков) и защиты полости гидроцилиндра от загрязнения (радиальное обжатие симметричных спеченных изделий). Примеры таких изделий приведены на рис. 6, а–в.

Выводы

1. Рассмотрены три метода повышения равномерности распределения свойств ПФМ по

площади фильтрации на разных этапах их изготовления: гранулирование порообразователем металлических порошков, сухое радиально-изостатическое прессование, радиальное обжатие осесимметричных спеченных изделий.

2. Анализ полученных результатов выявил следующее:

- гранулирование порообразователем металлических порошков повышает равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации в 2,3–3,5 раза при получении ПФМ;
- сухое радиально-изостатическое прессование обеспечивает высокую равномерность

распределения свойств ПФМ при изготовлении длинномерных осесимметричных изделий; при этом коэффициент вариации коэффициента локальной проницаемости не превышает 0,17;

- радиальное обжатие осесимметричных спеченных изделий повышает равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации изделий в виде диска; коэффициент вариации коэффициента локальной проницаемости в этом случае на 15...22 % меньше, чем у исходного ПФМ.

Литература

- [1] Liu P., Tao X., Li X., et al. Preparation of superhydrophobic-oleophilic quartz sand filter and its application in oil-water separation. *Appl. Surf. Sci.*, 2018, vol. 447, pp. 656–663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.030>
- [2] Романовский В.И., Грузинова В.Л. Отходы синтетических материалов для очистки от нефтесодержащих сточных вод. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, 2018, № 1, с. 26–31.
- [3] Феофанов Ю.А., Ряховский М.С. О применении природных сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, 2018, № 6, с. 32–38.
- [4] Bahadori A. Strainers and filters. Construction, management, and inspection. In: *Oil and pipelines and piping systems*. Houston, Gulf Prof. Publ., 2017, pp. 377–394.
- [5] Ильющенко А.Ф., Кусин Р.А., Закревский И.В. и др. *Порошковые фильтрующие материалы*. Минск, БГАТУ, 2018. 188 с.
- [6] Plyushchanka A., Charniak I., Kusun A., et al. Cleaning of technical oils by powder filter materials. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 6, art. 062010, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/6/062010>
- [7] Капцевич В.М., Тиунчик А.А., Корнеева В.К. и др. Построение оптимальной структуры многослойных фильтрующих материалов для очистки моторного масла после обкатки двигателя. *Агротранспорт*, 2018, № 3, с. 38–45.
- [8] Ксенофонтов Б.С., Антонова Е.С. Интенсификация флотационной очистки промышленных сточных вод с использованием комбинированной системы аэрации, включающей эжекторы и диспергаторы. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, 2016, № 9, с. 32–36.
- [9] Bram M., Daudt N.F., Balzer H. Porous metals from powder metallurgy techniques. *Mat. Sci. Mat. Eng.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00093-4>
- [10] Попивненко Л.В., Руденко Н.А., Ищенко В.А. Исследование особенностей прессования и спекания высокопористых материалов, изготовленных с применением различных порообразователей. *Обработка материалов давлением*, 2017, № 1, с. 156–163.
- [11] Trueba P., Chicardi E., Rodriguez-Ortiz J.A., et al. Development and implementation of a sequential compaction device to obtain radial graded porosity cylinders. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 50, pp. 142–153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.011>
- [12] Ильющенко А.Ф., Капцевич В.М., Кусин Р.А. и др. *Способ получения пористых порошковых материалов*. Патент ВУ 20348. Заявл. 28.06.2013, опубл. 28.02.2015.
- [13] Plyushchenko A., Kusun R., Charniak I., et al. Improving the uniformity of property distribution along the surface of filter materials obtained using porogens. *Proc. Machines, Technologies, Materials*, 2014, year XXII, no. 3, pp. 6–19.

- [14] Демин С.Е., Демина Е.Л. *Математическая статистика*. Нижний Тагил, НТИ УРФУ, 2016. 284 с.
- [15] ГОСТ Р 50779.10–2000. *Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2008. 41 с.
- [16] Novak L., Novak D. Estimation of coefficient of variation for structural analysis: the correlation interval approach. *Struct. Saf.*, 2021, vol. 92, art. 102101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102101>
- [17] Капцевич В.М., Корнеева В.К., Закревский И.В. Методика расчета толщин слоев многослойных фильтрующих материалов, работающих в режиме глубинного фильтрования. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка. Сб. докл. 12-го Междунар. симп. Ч. 1*. Минск, 2021, с. 231–240.
- [18] Schafföner S., Fruhstorfer J., Ludwig S., et al. Cyclic cold isostatic pressing and improved particle packing of coarse grained oxide ceramics for refractory applications. *Ceram. Int.*, 2018, vol. 44, no. 8, pp. 9027–9036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.106>
- [19] Yasuda K., Tanaka S., Naito M. Stochastic analysis on ceramic granule collapse in powder compact during cold isostatic pressing. *Adv. Powder Technol.*, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 940–947, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.032>
- [20] Fransis L.F. Powder processes. In: *Materials processing*. New York, Academic Press, 2016, pp. 343–414.

References

- [1] Liu P., Tao X., Li X., et al. Preparation of superhydrophobic-oleophilic quartz sand filter and its application in oil-water separation. *Appl. Surf. Sci.*, 2018, vol. 447, pp. 656–663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.030>
- [2] Romanovskiy V.I., Gruzina V.L. Waste synthetic materials for cleaning oil-containing wastewater. *Vodochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2018, no. 1, pp. 26–31 (in Russ.).
- [3] Feofanov Yu.A., Ryakhovskiy M.S. On the use of natural sorbents for water purification from petroleum products. *Vodochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2018, no. 6, pp. 32–38 (in Russ.).
- [4] Bahadori A. Strainers and filters. Construction, management, and inspection. In: *Oil and pipelines and piping systems*. Houston, Gulf Prof. Publ. 2017, pp. 377–394.
- [5] Il'yushchenko A.F., Kusin R.A., Zakrevskiy I.V., et al. *Poroshkovyye fil'truyushchyye materialy* [Powder filter materials]. Minsk, BGATU, 2018. 188 p.
- [6] Ilyushchanka A., Charniak I., Kusin A., et al. Cleaning of technical oils by powder filter materials. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1260, no. 6, art. 062010, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/6/062010>
- [7] Kaptsevich V.M., Tiunchik A.A., Korneeva V.K., et al. Building optimal structure of multi-layer filter materials for motor oil cleaning after engine run-in. *Agropanorama*, 2018, no. 3, pp. 38–45 (in Russ.).
- [8] Ksenofontov B.S., Antonova E.S. Intensification of industrial wastewater treatment by flotation with combined system of aeration including ejectors and dispersers. *Vodochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2016, no. 9, pp. 32–36 (in Russ.).
- [9] Bram M., Daudt N.F., Balzer H. Porous metals from powder metallurgy techniques. *Mat. Sci. Mat. Eng.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00093-4>
- [10] Popivnenko L.V., Rudenko N.A., Ishchenko V.A. Research into features of compacting and sintering of highly porous materials manufactured by using various blowing agents. *Obrabotka materialov davleniem* [Materials working by pressure], 2017, no. 1, pp. 156–163 (in Russ.).

- [11] Trueba P., Chicardi E., Rodriguez-Ortiz J.A., et al. Development and implementation of a sequential compaction device to obtain radial graded porosity cylinders. *J. Manuf. Process.*, 2020, vol. 50, pp. 142–153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.011>
- [12] Il'yushchenko A.F., Kaptsevich V.M., Kusin R.A., et al. *Sposob polucheniya poristykh poroshkovykh materialov* [Method for obtaining porous powder materials]. Patent BY 20348. Appl. 28.06.2013, publ. 28.02.2015.
- [13] Ilyushchenko A., Kusin R., Charniak I., et al. Improving the uniformity of property distribution along the surface of filter materials obtained using porogens. *Proc. Machines, Technologies, Materials*, 2014, year XXII, no. 3, pp. 6–19.
- [14] Demin S.E., Demina E.L. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Nizhniy Tagil, NTI URFU Publ., 2016. 284 p.
- [15] GOST R 50779.10–2000. *Statisticheskie metody. Veroyatnost' i osnovy statistiki. Terminy i opredeleniya* [State standard R 50779.10–2000. Statistical methods. Probability and general statistical terms. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 41 p.
- [16] Novak L., Novak D. Estimation of coefficient of variation for structural analysis: the correlation interval approach. *Struct. Saf.*, 2021, vol. 92, art. 102101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102101>
- [17] Kaptsevich V.M., Korneeva V.K., Zakrevskiy I.V. [Calculation method for layer thickness of multilayer filter materials working in depth filtration regime]. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka. Sb. dokl. 12-go Mezhdunar. simp. Ch. 1* [Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding. Proc 12th Int. Symp. P. 1]. Minsk, 2021, pp. 231–240 (in Russ.).
- [18] Schafföner S., Fruhstorfer J., Ludwig S., et al. Cyclic cold isostatic pressing and improved particle packing of coarse grained oxide ceramics for refractory applications. *Ceram. Int.*, 2018, vol. 44, no. 8, pp. 9027–9036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.106>
- [19] Yasuda K., Tanaka S., Naito M. Stochastic analysis on ceramic granule collapse in powder compact during cold isostatic pressing. *Adv. Powder Technol.*, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 940–947, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.032>
- [20] Fransis L.F. Powder processes. In: *Materials processing*. New York, Academic Press, 2016, pp. 343–414.

Статья поступила в редакцию 15.06.2021

Информация об авторах

ИЛЬЮЩЕНКО Александр Федорович — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, лауреат Государственной премии Республики Беларусь, заслуженный деятель науки Республики Беларусь; генеральный директор. Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии; директор. Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» (220005, Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, д. 41, e-mail: Alexil@mail.belpak.by).

КУСИН Руслан Анатольевич — кандидат технических наук, лауреат премии Совета Министров СССР, доцент, доцент кафедры «Технологии металлов». Белорусский государственный аграрный технический университет (220023, Минск, Республика Беларусь, проспект Независимости, д. 99, e-mail: kusin.tm@bsatu.by).

ЧЕРНЯК Ирина Николаевна — академический советник Международной инженерной академии; заведующий научно-исследовательской лабораторией «Фильтрующие материалы». Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» (220005, Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, д. 41, e-mail: irinacharniak@tut.by).

КУСИН Алексей Русланович — магистр технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фильтрующие материалы». Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» (220005, Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, д. 41, e-mail: nil23niipm@tut.by).

ЕРЕМИН Евгений Николаевич — доктор технических наук, профессор, декан машиностроительного института, заведующей кафедрой «Машиностроение и материаловедение». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, проспект Мира, д. 11, e-mail: weld_techn@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ильющенко А.Ф., Кусин Р.А., Черняк И.Н., Кусин А.Р., Еремин Е.Н. Выбор метода изготовления пористых порошковых изделий фильтрующего назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 24–34, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-24-34

Please cite this article in English as:

Ilyushchanka A.Ph., Kusin R.A., Charniak I.M., Kusin A.R., Eremin E.N. Selecting a Method for the Manufacture of Porous Powder Filter Products. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 24–34, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-24-34

Information about the authors

ILYUSHCHANKA Aliaksandr Phiodaravich — Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Winner of the State Prize of the Republic of Belarus, General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association. Director, State Scientific Institution “O.V. Roman Powder Metallurgy Institute” (220005, Minsk, Republic of Belarus, Platonova st., 41, e-mail: Alexil@mail.belpak.by).

KUSIN Ruslan Anatolyevich — Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Department of Metal Technologies. Belarus State and Agrarian Technical University (220023, Minsk, Republic of Belarus, Nezavisimosti ave., 99, e-mail: kusin.tm@bsatu.by).

CHARNIAK Iryna Mikalaeyna — Academic Advisor to the International Academy of Engineering, Head of the Research Laboratory of Filtering Materials. State Scientific Institution “O.V. Roman Powder Metallurgy Institute” (220005, Minsk, Republic of Belarus, Platonova st., 41, e-mail: irinacharniak@tut.by).

KUSIN Aleksey Ruslanovich — Researcher, Research Laboratory of Filtering Materials. State Scientific Institution “O.V. Roman Powder Metallurgy Institute” (220005, Minsk, Republic of Belarus, Platonova st., 41, e-mail: nil23niipm@tut.by).

EREMIN Evgeny Nikolaevich — Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Dean, Machine-Building Institute, Head of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mira av., 11, e-mail: weld_techn@mail.ru).