

Создание фильтров на основе пористого сетчатого материала для очистки жидкости и газа от механических загрязнений

© А.Ф. Третьяков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Показано, что для изготовления фильтров, обеспечивающих очистку жидкостей и газов от механических загрязнений, целесообразно применять пористые листовые материалы, создаваемые сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток с квадратными ячейками из стали 12Х18Н10Т. Создана методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых материалов. На ее основе разработана математическая модель процесса создания штампованных фильтров, обеспечивающих требуемую тонкость очистки жидкости и газа от загрязнений при заданных расходных характеристиках. Определены оптимальные значения параметров технологических процессов изготовления пористых сетчатых материалов с заданными свойствами, листового штамповки фильтроэлементов с требуемыми размерами и электронно-лучевой сварки элементов изделия. Результаты стендовых испытаний штампованных фильтров показали, что такие технологические процессы позволяют получить изделия, полностью отвечающие требованиям технического задания.

Ключевые слова: *фильтр, номинальная тонкость очистки, рабочая среда, механические загрязнения, пористый сетчатый материал, сварка прокаткой, металлическая тканая сетка, листовая штамповка, фильтроэлемент, электронно-лучевая сварка*

Введение. Стремление увеличить надежность современных пневмо- и гидросистем приводит к повышению требований к чистоте используемых в них жидкостей. При разработке конструкций фильтров важным этапом является обоснованный выбор или создание проникаемых элементов, которые должны обеспечивать необходимую тонкость фильтрования (очистку), обладать высокой проницаемостью, быть стойкими и прочными во всем диапазоне рабочих температур и нагрузок, не ухудшать физико-химические показатели очищаемых сред и не загрязнять их частицами, вымываемыми из фильтроматериала в процессе эксплуатации.

Кроме того, необходимо обеспечить требуемую коррозионную стойкость фильтра. При этом пористые заготовки, используемые для изготовления фильтроэлементов, должны обладать необходимыми технологическими свойствами.

Анализ выполненных в России и за рубежом работ, посвященных созданию пористых конструкционных материалов на металлической основе, показал, что для изделий, отвечающих сформулированным

требованиям, наиболее рационально использовать пористые листовые материалы, получаемые сваркой давлением брикета тканых сеток [1–3].

Для изготовления штампованных изделий с заданными в техническом задании конфигурацией и комплексом свойств необходимо изучить влияние операций листовой штамповки и режимов сварки на изменение свойств пористых заготовок. Теоретические и экспериментальные исследования штампуемости пористых сетчатых материалов (ПСМ), выполненные совместно с И.Г. Кременским, показали, что более высокими технологическими свойствами обладают ПСМ с высокой межслойной прочностью и пластичностью, а также с низкой анизотропией механических свойств в плоскости листа. Кроме того, были установлены изменения гидравлических свойств и размера пор в заготовках в процессе листовой штамповки, значения которых зависят от схемы деформирования, величины деформации и свойств ПСМ. Так, в условиях двухосного растяжения, имеющего место при вытяжке, формовке и отбортовке, чем выше значение исходной пористости заготовки и коэффициентов формоизменения, тем интенсивнее происходит увеличение размера пор.

Анализ свариваемости ПСМ, выполненный совместно с В.М. Арбузовым и Г.Е. Лозевым, показал, что с увеличением пористости ПСМ при равенстве всех прочих условий снижается относительная прочность стыковых соединений и возрастает ширина шва [4].

Таким образом, создание изделий из ПСМ с оптимальными свойствами возможно только на основе системного подхода, учитывающего все операции получения листовых пористых заготовок, последующей штамповки, сборки и сварки элементов конструкций. Системный подход к реализации проектирования изделия из пористых материалов включает:

- определение марок материалов и конструкций структурообразующих элементов;
- установление механизмов уплотнения брикетов сеток и консолидации проволок;
- создание математической модели, описывающей влияние параметров технологического процесса на свойства;
- оптимизацию значения управляющих параметров.

В ходе технологических процессов листовой штамповки и сварки окончательно формируются свойства и геометрические размеры изделия. Выбор оборудования и проектирование инструментов, выпуск чертежей и технической документации — необходимые этапы проектирования технологического процесса. Несмотря на то что математические модели достаточно точно для инженерных расчетов описывают процессы получения листовых ПСМ, их формоизменения

и сварки элементов изделия, конечным критерием качества является соответствие свойств и размеров изготовленной штамповочной конструкции техническому заданию. Наличие отклонений, превышающих допустимые значения, может привести к уточнению или пересмотру всех этапов проектирования.

Для создания штамповочных изделий из пористых материалов с заданными свойствами в работе [5] предложена методика проектирования с использованием явления технологической наследственности, предполагающего рассмотрение всей совокупности технологических операций, установление связей и взаимозависимостей параметров предыдущих и последующих операций.

Цель работы — на основе предложенной методики разработать математическую модель технологического процесса изготовления штамповочных фильтров, обеспечивающих требуемую тонкость очистки рабочих сред от механических загрязнений при заданных расходных характеристиках.

Проектирование технологического процесса изготовления листовых заготовок из ПСМ. Анализ конструктивных схем существующих фильтров позволил установить, что фильтрующие элементы могут иметь форму дисков, цилиндров, конусов и т. п. Главная задача при их проектировании и изготовлении состоит в обеспечении требуемой конфигурации, массы фильтра при максимальной площади фильтрующих элементов и заданной тонкости очистки. Создание фильтра может быть реализовано путем применения фильтроматериалов, обладающих, наряду с требуемыми фильтровальными, гидравлическими, механическими характеристиками, необходимой коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами. Отметим, что фильтроэлементы, обеспечивающие высокую тонкость очистки рабочей среды от твердых примесей, как правило, обладают низкой проницаемостью, поэтому при проектировании технологии изготовления фильтров с заданными свойствами в качестве основного эксплуатационного показателя принята номинальная тонкость очистки $a_{\text{ном}}$. Эта величина соответствует размеру частиц, которые фильтроэлемент задерживает с эффективностью очистки, равной 0,95–0,97 [6].

Исследование номинальной тонкости очистки и проницаемости ПСМ на основе сеток различных типов плетения показало, что более высокими гидравлическими свойствами обладают проницаемые элементы на основе сеток с квадратными ячейками. При этом с уменьшением размера ячейки сетки «в свету» a , диаметра d проволок сетки и увеличением количества слоев сеток n размеры пор уменьшаются, и снижается проницаемость ПСМ. Увеличение относительного обжатия брикета сеток в процессе сварки давлением ε

приводит к уменьшению среднего размера пор $\delta_{\text{ср}}$, пористости Π и коэффициента проницаемости K_{Π} .

Анализ большого количества экспериментальных данных по тонкости очистки фильтроэлементов из ПСМ [6] позволил установить, что с некоторым приближением можно принять

$$a_{\text{ном}} = \delta_{\text{ср}} / 2. \quad (1)$$

Для определения среднего размера пор $\delta_{\text{ср}}$ и коэффициента проницаемости K_{Π} используем зависимости [6]:

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{3K_l \Pi d}{(1 + 2K_l)(1 - \Pi)}; \quad (2)$$

$$K_{\Pi} = \frac{2\delta_{\text{ср}}^2 \Pi}{53,3K_l(1 + K_l)}, \quad (3)$$

где K_l — эмпирический коэффициент, оценивающий влияние пористости и типа плетения сеток на средний размер пор и коэффициент проницаемости, определяемый как $K_l = 0,84 - 0,69\Pi$.

Удельная проницаемость пористого элемента q толщиной h_{Π} при перепаде давления ΔP фильтруемой среды с коэффициентом динамической вязкости μ определяется из уравнения Дарси:

$$q = \frac{K_{\Pi} \Delta P}{h_{\Pi} \mu}. \quad (4)$$

Надежность работы агрегатов пневмо- и гидросистем энергетических установок зависит от наличия в рабочих средах механических загрязнений, размеры которых сопоставимы с размерами зазоров и капиллярных каналов в конструкциях, поэтому для таких изделий необходимо создавать фильтры тонкой очистки жидкостей и газов.

Предложенная в работе [5] методика проектирования штампованных проницаемых изделий и результаты исследования гидравлических, механических и технологических свойств пористых материалов использованы при создании фильтров с тонкостью очистки 10...12 мкм.

В техническом задании на проектирование и изготовление изделия, принципиальная схема которого приведена с указанием габаритных размеров на рис. 1, сформулированы следующие требования:

- в качестве рабочих сред могут быть использованы жидкости (вода) и газы (воздух);
- расход через фильтр жидкости должен быть 550 кг/ч при $\Delta P \leq 0,01$ МПа, а для газа — 8,5 кг/ч при $\Delta P \leq 0,05$ МПа.

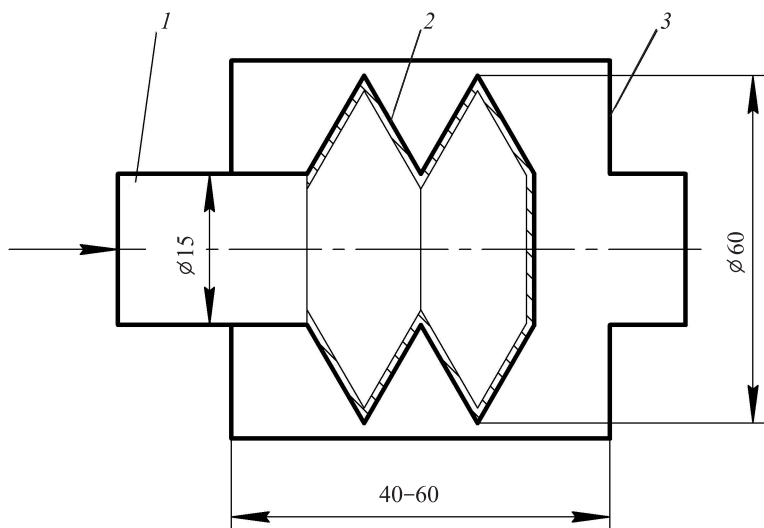


Рис. 1. Принципиальная схема фильтра:
1 — ось; 2 — фильтроэлементы; 3 — корпус

Для изготовления требуемого фильтра сформулируем следующие технические требования к пористым фильтроэлементам:

- удельная проницаемость при указанных перепадах должна составлять для жидкостей $q \geq 1,25 \cdot 10^{-2}$ м/с, а для газов $q \geq 8,4 \cdot 10^{-2}$ м/с;
- средний размер пор $\delta_{\text{ср}} \leq 25$ мкм;
- предел прочности пористого материала толщиной $0,2 \leq h_{\text{П}} \leq 0,5$ мм должен составлять $\sigma_{\text{В}} \geq 100$ МПа;
- относительная прочность стыковых сварных соединений — $\sigma_{\text{св}} / \sigma_{\text{В}} \geq 0,6$.

Кроме того, для увеличения площади фильтрования и жесткости фильтроэлементов при заданных габаритных размерах фильтра (см. рис. 1) применяется листовая штамповка, поэтому пористый материал должен обладать необходимой пластичностью.

Приведенные в работах [2, 6, 7] результаты исследования фильтровальных, гидравлических, структурных, механических и технологических свойств выпускаемых промышленностью тканых проволочных сеток и пористых лент типа ФНС, получаемых методом порошковой металлургии из коррозионно-стойких хромоникелевых сталей, позволили установить, что они не удовлетворяют требованиям технического задания. При поиске новых решений было установлено, что для изготовления фильтров с заданными свойствами могут быть использованы ПСМ из стали 12Х18Н10Т, получаемые сваркой

прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток [8] с размером ячеек $a < 0,16$ мм. При этом количество слоев сеток должно составлять от 4 до 15, а величина относительного обжата находится в интервале $0,2 \leq \varepsilon \leq 0,6$.

Изготовление фильтроэлемента (также называемых «чечевицей») осуществляется путем листовой штамповки ПСМ в следующей последовательности (рис. 2): вырубка круглой заготовки, формовка центральной части, вытяжка, пробивка и отбортовка. Соединение элементов фильтра целесообразно осуществлять электронно-лучевой сваркой.

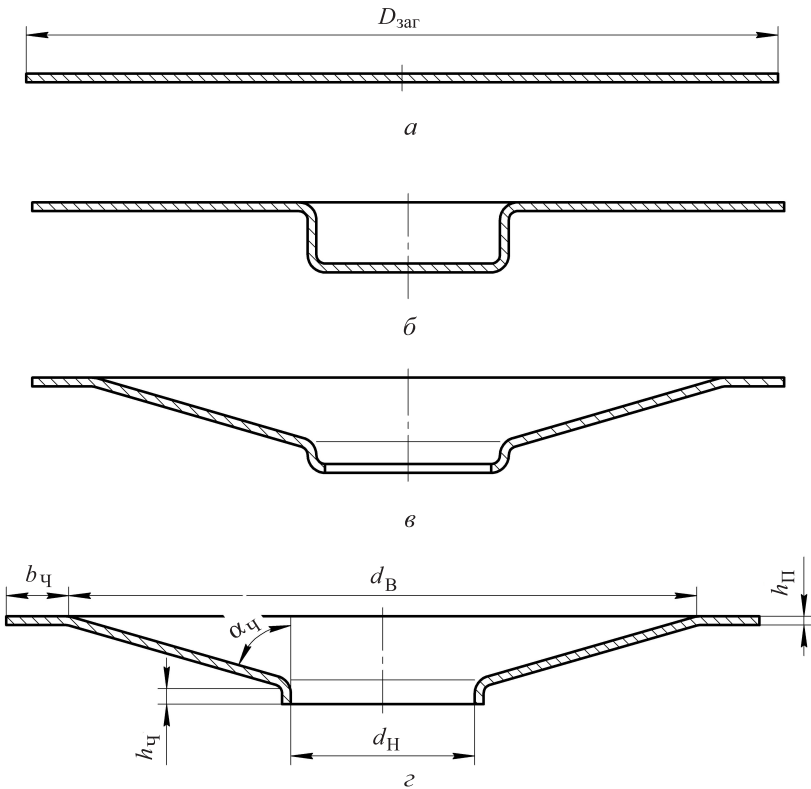


Рис. 2. Последовательность операций листовой штамповки фильтроэлемента:

a — исходная заготовка; $б$ — формовка; $в$ — вытяжка и пробивка отверстия; $г$ — отбортовка; $b_ч$ — ширина фланца; $d_н$ — диаметр отверстия; $\alpha_ч$, $d_в$ — угол наклона и максимальный диаметр конической части фильтроэлемента; $h_ч$ — высота горловины

Толщина пористого материала, изготавливаемого сваркой прокаткой сеток одного типоразмера, расположенных под углом $\beta = 45^\circ$, определяется как

$$h_{\Pi} = nh_C(1 - \varepsilon), \quad (5)$$

где n — количество слоев сеток; h_C — толщина сетки; ε — относительное обжатие брикета сеток в процессе сварки прокаткой.

Пористость листовых заготовок толщиной h_{Π} при отсутствии уширения и вытяжки сеток при их обжатии определяется следующим образом [9]:

$$\Pi = 1 - \frac{nh_C(1 - \Pi_C)}{h_{\Pi}}, \quad (6)$$

где Π_C — пористость сетки в исходном состоянии [6].

Предел прочности ПСМ на основе сеток с квадратными ячейками при одноосном растяжении оценивали величиной максимальных макроскопических осредненных напряжений в направлении проволок сеток, значения которых определяются по данным работы [10]:

$$\sigma_{B.x,y} = \frac{\pi d \sigma_B^{pp}}{8(a + d)(1 - \varepsilon)}, \quad (7)$$

где σ_B^{pp} — предел прочности проволок сеток.

Коэффициенты, оценивающие способность заготовок подвергаться операциям листовой штамповки, в значительной степени зависят от максимального относительного удлинения ПСМ, величина которого определяется в основном пластичностью проволок сеток и величиной относительного обжатия в процессе сварки давлением. Для пористых заготовок из стали 12X18H10T, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах сеток с диаметром проволок менее 0,13 мм, численные значения максимального относительного удлинения могут быть определены из эмпирической зависимости

$$\delta = 0,22 - 0,25\varepsilon. \quad (8)$$

Проектирование технологических процессов листовой штамповки и сварки фильтроэлементов. Диаметр заготовки, необходимой при изготовлении листовой штамповкой фильтроэлементов, может быть определен как

$$D_{\text{заг}} = \sqrt{\frac{d_H^2(\sin \alpha_{\text{ч}} - 1) + d_B^2}{\sin \alpha_{\text{ч}}} + 4b_{\text{ч}}(d_B + b_{\text{ч}})}, \quad (9)$$

а величина удлинения заготовки при вытяжке конического участка оболочки

$$e_{\text{выт}} = \frac{d_{\text{В}} - d_{\text{Н}} + \sin \alpha_{\text{ч}} (2b_{\text{ч}} - 1)}{(1 - \Pi)(D_{\text{зар}} - d_{\text{Н}}) \sin \alpha_{\text{ч}} + \Pi(d_{\text{В}} - d_{\text{Н}} + 2b_{\text{ч}} \sin \alpha_{\text{ч}})}. \quad (10)$$

Исследование влияния операций листовой штамповки на размер пор показало, что в процессе вытяжки конического участка фильтро-элемента увеличение размера пор практически не наблюдалось, поскольку при $d_{\text{Н}} = 15$ мм, $d_{\text{В}} = 50 \pm 2$ мм, $b_{\text{ч}} = 5 \pm 2$ мм, $\alpha_{\text{ч}} = 75 \pm 5^\circ$ величина вытяжки составляла $e_{\text{выт}} = 0,04 \dots 0,05$ (степень вытяжки $k_{\text{выт}} = 1,06$). В процессе формовки лунки в результате двухосного растяжения средний размер возрастает на 24 %, но поскольку этот участок удаляется в процессе пробивки отверстия, он не оказывает влияния на изменение пор и расходной характеристики.

Величина относительного удлинения на кромках пористой заготовки при отбортовке внутреннего диаметра фильтроэлемента может быть приближенно определена как

$$e_{\text{от}} = \frac{2h_{\text{ч}}}{(\pi d_{\text{Н}} - 2h_{\text{ч}})}. \quad (11)$$

Выполненный анализ зависимостей (10) и (11) позволил установить, что $e_{\text{от}} > e_{\text{выт}}$, поэтому при проектировании технологического процесса изготовления ПСМ для фильтра должно выполняться условие

$$\delta > e_{\text{от}}. \quad (12)$$

Маршрутная технология изготовления фильтра предполагает выполнение кольцевых швов при сварке отдельных его элементов. При этом качество сварных соединений определяется, как правило, величиной пористости фильтроэлементов.

Изучение механических свойств стыковых сварных соединений ПСМ в условиях одноосного и двухосного растяжения позволило установить, что с увеличением пористости основного материала происходит снижение относительной прочности сварного соединения, величина которой при $\Pi > 0,2$ может быть описана эмпирической зависимостью [11]:

$$\frac{\sigma_{\text{св}}}{\sigma_{\text{В.х,у}}} = 1,3 - 1,5\Pi. \quad (13)$$

Используя выражение (13), можно сформулировать следующее требование, ограничивающее величину пористости свариваемых заготовок,

$$П \geq 0,67 \left(1,3 - \frac{\sigma_{св}}{\sigma_{В\ x,y}} \right). \quad (14)$$

Оптимальные значения технологических параметров изготовления фильтроэлементов определены путем математического моделирования с использованием уравнений (1)–(14). Результаты расчетов показали, что требованиям технического задания отвечает заготовка толщиной 0,5 мм и пористостью $П = 0,5$, изготовленная сваркой прокаткой в вакуумированном конверте из 13 слоев сеток с квадратными ячейками размером «в свету» $a = 0,04$ мм из стали 12Х18Н10Т (ТУ14-4-507–99) при относительном обжатии $\varepsilon = 0,4$. Свойства заготовок позволяют получить листовой штамповкой фильтроэлементы с размерами: $d_H = 15$ мм, $d_B = 50$ мм, $b_Ч = 5$ мм, $h_Ч = 2,5$ мм, $\alpha_Ч = 75^\circ$. Результаты расчета показали, что в условиях одноосного растяжения фильтроматериал обладает следующими механическими свойствами: $\sigma_{В\ x,y} = 166$ МПа, $\delta = 0,12$.

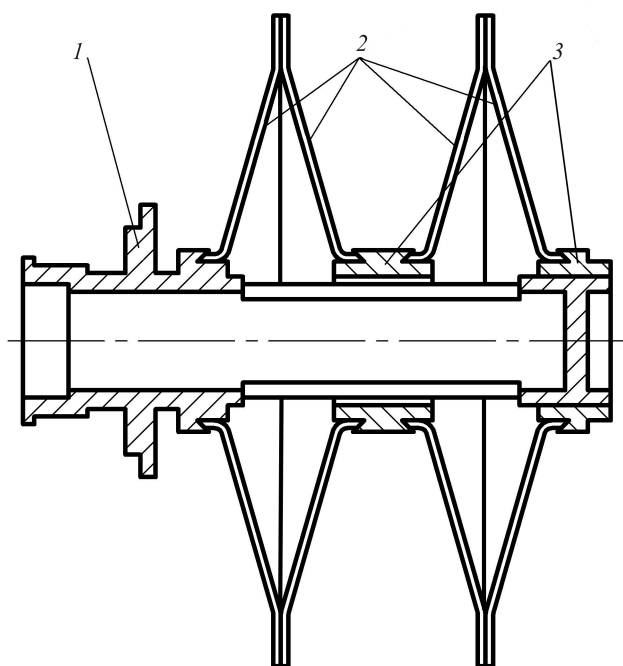


Рис. 3. Эскиз разработанного фильтра:
1 — ось; 2 — фильтроэлементы (чечевицы); 3 — втулки

Анализ уравнений (9), (10) и (11) позволил установить, что для получения фильтроэлементов с указанными размерами диаметр заготовки при листовой штамповке составляет 62 мм, относительное

удлинение в процессе вытяжки конической части пористого элемента составляет $e_{\text{выт}} = 0,04$, а при отбортовке $e_{\text{от}} = 0,118$. В результате значительных деформаций ($e_{\text{от}} \approx \delta$) на кромке горловины возможно образование трещин. Для устранения возможных дефектов стыковые соединения чечевиц с осью и втулками фильтра (рис. 3) сконструированы так, что в процессе электронно-лучевой сварки (ЭЛС) происходит переплав горловины.

Результаты стендовых испытаний изготовленных штамповарных фильтров (рис. 4) показали, что разработанный технологический процесс позволяет получать изделия, полностью удовлетворяющие требованиям технического задания. Внедрение фильтров в агрегатах пневмосистемы повысило эксплуатационную надежность энергетической установки.

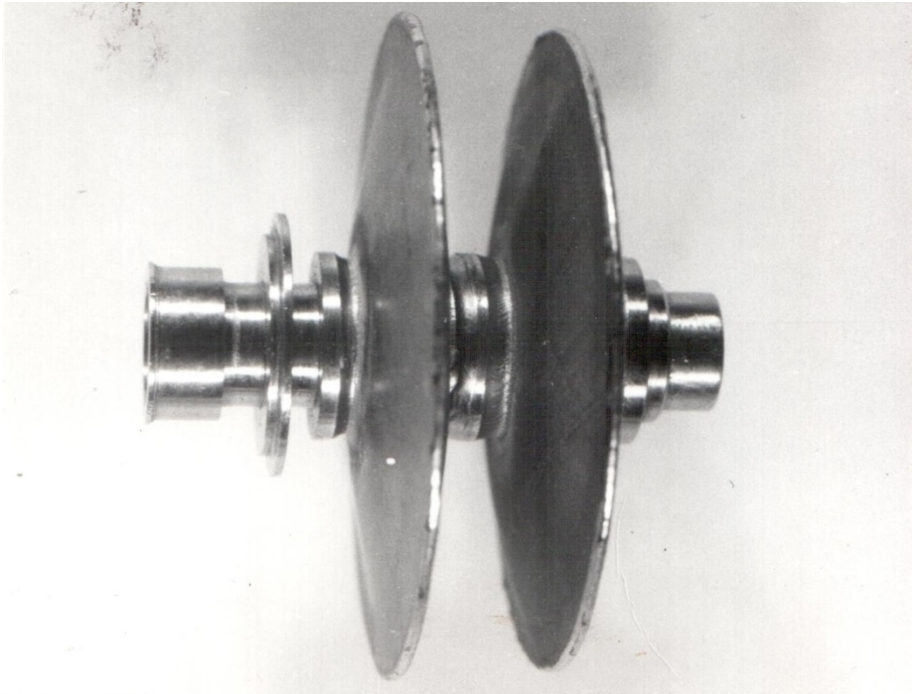


Рис. 4. Общий вид штамповарного фильтра из стали 12X18H10T, обеспечивающего тонкость очистки 10...12 мкм

Заключение. На основе разработанной ранее методики проектирования технологических процессов изготовления штамповарных изделий из пористых материалов предложена математическая модель технологического процесса создания листовых ПСМ с требуемыми тонкостью очистки, толщиной, прочностью, пластичностью и относительной прочностью стыковых сварных соединений.

В результате проведенных исследований штампуемости, свариваемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т и изменения свойств заготовок в процессе формоизменения и сварки плавлением были разработаны технологические процессы листовой штамповки для изготовления фильтроэлементов с требуемыми размерами, что позволило обеспечить их надежное соединение между собой, а также с осью и втулками фильтра электронно-лучевой сваркой.

Результаты стендовых испытаний разработанных и изготовленных фильтров показали, что изделия обеспечивают требуемую тонкость очистки воздуха от механических загрязнений $a_{\text{ном}} \approx 10...12$ мкм при расходе газа через фильтр со скоростью 8,5 кг/ч при $\Delta P \leq 0,005$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Спиридонов В.С., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Фильтровальные перегородки из спеченных металлических сеток для встроенных фильтров авиационных гидросистем. *Безопасность в техносфере*. 2015, № 4, с. 39–45.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration*. Handbook. Elsevier, 2013, 444 p.
- [3] Пелевин Ф.В. Технология изготовления пористых материалов. *Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса*, 2007, № 3, с. 46–51.
- [4] Третьяков А.Ф. Изменение свойств пористых сетчатых материалов в процессе обработки давлением и сварки плавлением. *Производство проката*, 2015, № 2, с. 24–29.
- [5] Третьяков А.Ф. Методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1588.html> (дата обращения 27.06.2017).
- [6] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы*. Москва, Металлургия, 1987, 335 с.
- [7] Девисилов В.А., Спиридонов В.С. Металлические проволочные сетки для фильтрования жидкостей и газов. Ч. 1. Структурные характеристики и их расчет. *Безопасность в техносфере*, 2009, № 3, с. 46–55.
- [8] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарович В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [9] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 1. Влияние конструкции брикета сеток и относительного обжатия структурообразующих элементов на пористость листовых заготовок. *Производство проката*, 2013, № 5, с. 32–42.
- [10] Третьяков А.Ф. Влияние конструктивных, технологических параметров и схемы деформирования на анизотропию механических свойств листовых пористых сетчатых материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016, № 12, с. 87–96.
- [11] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 2. Закономерности влияния пластической деформации и консолидации проволок сеток на технологические и теплофизические свойства пористых сетчатых материалов. *Производство проката*, 2013, № 6, с. 29–34.

Статья поступила в редакцию 19.06.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Создание фильтров на основе пористого сетчатого материала для очистки жидкости и газа от механических загрязнений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1672>

Третьяков Анатолий Федорович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: создание изделий на основе проектируемых материалов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

The development of filters made of porous-net materials for purifying liquid or gas from mechanical pollution

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study shows that in order to produce filters capable of purifying liquid or gas from mechanical pollution it is reasonable to apply porous sheet materials manufactured by means of roll welding in the vacuum-treated envelopes of the briquette which comprises square mesh grids made of steel 12X18H10T. We have developed a technique for designing the processes of manufacturing articles made from porous materials. Based on this technique we have developed a mathematical model of the stamp-welded filters manufacturing process. These filters ensure the required precision of purifying liquid or gas from pollution at preset discharge characteristics. The article defines the optimal values of the technological processes parameters for manufacturing the porous-net materials with specified properties, sheet pressworking of filtering elements of the required sizes and electron-beam welding of sub-components. The results of the stamp-welded filters bench tests showed that such technological processes help to obtain the products that completely meet the technical requirements.

Keywords: filter, nominal precision of purifying, operating environment, mechanical pollution, porous-net material, roll welding, wire cloth, sheet pressworking, filtering element, electron-beam welding

REFERENCES

- [1] Spiridonov V.S., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. *Bezopasnost v tekhnosfere — Security in Technosphere*, 2015, no. 4, pp. 39–45.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration*. Handbook. Elsevier, 2013, 444 p.
- [3] Pelevin F.V. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa — The Bulletin of the Association of Universities for Tourism and Service*, 2007, no. 3, pp. 46–51.
- [4] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2015, no. 2, pp. 24–29.
- [5] Tretyakov A.F. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 2. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/meng/1588.html> (accessed June 27, 2017).
- [6] Belov S.V., ed. *Poristyye pronitsayemyye materialy [Porous permeable materials]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 335 p.
- [7] Devisilov V.A., Spiridonov V.S. *Bezopasnost v tekhnosfere — Security in Technosphere*, 2009, no. 3, pp. 46–55.
- [8] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristyye setchatyye materialy [Porous-net materials]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [9] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2013, no. 5, pp. 32–42.
- [10] Tretyakov A.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 12, pp. 87–96.
- [11] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2013, no. 6, pp. 29–34.

Tretyakov A.F., Dr. Sc. (Eng.), Professor of Bauman Moscow State Technical University. Research interests include: manufacturing products made from projected materials with the preset property package. e-mail: tretyakov@bmstu.ru