

Разработка технологических процессов изготовления штамповарных изделий из коррозионностойких пористых материалов с заданными свойствами

© А.Ф. Третьяков, К.Б. Даниленко

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Пористые материалы на металлической основе нашли широкое применение в теплотехнике, космической, авиационной, химической и других отраслях промышленности. Они обладают требуемыми прочностными характеристиками, гидравлическими и технологическими свойствами, а также способны работать при высоких температурах и давлениях. Выбор оптимального варианта технологии изготовления пористых изделий с заданными свойствами выполнен на основе системного подхода, основная процедура которого — структурно-имитационное моделирование. Анализ конструкций агрегатов и условий их работы позволил установить, что наиболее перспективными являются пористые сетчатые материалы из стали 12Х18Н10Т, обладающие требуемой проницаемостью и размерами пор, высокими механическими и технологическими свойствами. Пористые сетчатые материалы (ПСМ), изготовленные сваркой давлением тканых металлических сеток с применением горячей прокатки в контролируемой газовой среде, обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами, и поэтому их применяют для изготовления фильтрующих элементов в системах очистки жидкостей и газов от механических примесей в двигателях. Разработаны математические модели технологического процесса изготовления штамповарных фильтров из стали 12Х18Н10Т, обеспечивающих требуемую тонкость очистки газа от механических частиц при заданных значениях расходных характеристик, толщины и прочности. Определены оптимальные значения параметров технологических процессов изготовления листовых ПСМ, штамповки фильтроэлементов требуемых размеров и электронно-лучевой сварки при изготовлении фильтров. Результаты стендовых испытаний разработанных и изготовленных изделий показали, что они обеспечивают требуемые расходные характеристики при заданной тонкости очистки газа.

Ключевые слова: пористые сетчатые материалы, прочностные характеристики, проницаемые изделия, структурно-имитационное моделирование, проницаемость, тканые сетки, штамповарный фильтр, фильтроэлемент

Введение. Пористые материалы (ПМ), используемые в различных областях науки и техники, отличаются от компактных изделий лучшей проницаемостью и меньшей плотностью. Эти ПМ можно подразделить на две большие группы: на неметаллической и на металлической основе. Последние широко применяют в машиностроении, теплоэнергетике, космической, авиационной, химической и других отраслях промышленности. Это объясняется тем, что ПМ на металлической основе имеют высокие прочностные, теплофизические, гидравлические и технологические свойства.

К пористым материалам на металлической основе (МПМ) можно отнести тканые металлические сетки (ТМС), пористые волокновые материалы (ПВМ), пористые порошковые материалы (ППМ), пористые сетчатые материалы (ПСМ), комбинированные пористые проницаемые материалы и др. [1]. МПМ применяют при изготовлении фильтрующих элементов [1, 2] для очистки жидкостей и газов от механических примесей, в системах теплозащиты ракетных двигателей [3, 4], оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [5–7], капиллярных заборных установок [8] и в других изделиях. Они отличаются большим разнообразием типов структурообразующих элементов и технологических процессов их изготовления.

При создании современной техники все большее значение приобретает проблема оптимального проектирования деталей и конструкций в целом. Поток исследований в этой области непрерывно растет, но чаще при проектировании варьируют геометрическими параметрами изделий и не рассматривают технологию выпуска заготовок, из которых они создаются. С появлением конструируемых (композиционных) материалов многими исследователями неоднократно отмечалось, что заготовки нельзя рассматривать отдельно от изделий, для производства которых они предназначены. А это, прежде всего, означает, что утверждение об оптимальности технологии приобретает смысл только при конкретных геометрических параметрах изделий, технологиях их изготовления и условиях эксплуатации.

Таким образом, создавать изделия из ПМ с оптимальными свойствами можно только на основе системного подхода, учитывающего все операции получения листовых пористых заготовок, последующей штамповки, сборки и сварки элементов конструкций.

Технологические процессы листовой штамповки и сварка окончательно формируют свойства и размеры изделия. Выбор оборудования и инструментов, выпуск чертежей и технической документации являются необходимыми этапами проектирования технологического процесса. Выбор оптимального варианта технологии изготовления изделия с заданными свойствами основан на системном подходе, главной процедурой которого является математическое моделирование. Для того чтобы достичь оптимальных значений управляющих параметров, можно использовать структурно-имитационное моделирование, заключающееся в формировании структурной модели пористой заготовки, разработку имитационных моделей процессов пластического деформирования, консолидацию структурообразующих элементов, штамповку элементов конструкций.

Таким образом, в результате сложных взаимозависимостей между многочисленными свойствами изделий из ПМ и параметрами их изготовления технологический процесс представляет собой сложный

объект управления, для адекватного описания которого важен разумный уровень детализации. Разработка единого процесса изготовления проницаемых изделий позволяет выделить этап создания листовой заготовки в качестве самостоятельной функциональной подсистемы управления со своей внутренней организацией.

Цель работы — определение значений параметров технологических процессов изготовления штампосварных изделий из коррозионно-стойких ПМ, обеспечивающих требуемую тонкость очистки жидкостей и газов от механических загрязнений.

Моделирование технологий изготовления изделий из ПМ.

В основе изучения пористой структуры почти всегда лежит исследование свойства, связанного с размером пор. Для теоретического исследования среднего размера пор и коэффициента проницаемости ПМ использована модель пористой структуры в виде куба, грани которого пронизаны двумя или тремя взаимно перпендикулярными пучками капиллярных каналов постоянного сечения.

Существует и другой подход, состоящий в поиске оптимальной модели, которая близка к объекту и вместе с тем доступна для описания его различных свойств. Так, для ПМ на основе ТМС в качестве расчетной модели выбрана система перекрещивающихся цилиндрических элементов, обладающих геометрическим подобием с сетками исследуемых типоразмеров.

Математическая модель, описывающая влияние управляющих параметров на свойства проектируемых изделий, разработана на основе адекватных детерминированных и статистических моделей с использованием теории пластичности и регрессионного анализа. Методика разработки технологии изготовления изделий из ПСМ с заданными свойствами представлена в работе [9].

На *первом этапе* разрабатывают технические требования на изделие и устанавливают основные ограничения на форму и размеры конструкции. В завершение этого этапа были сформулированы технические требования на ПМ с указанием необходимых значений эксплуатационных и механических свойств, а также технологических ограничений.

На *втором этапе* с учетом сформулированных технических требований определяют возможность применения выпускаемых ТМС, ПВМ, ППМ, ПСМ и др. С этой целью определяют диапазоны возможного варьирования управляющих параметров и вычисляют предельные значения требуемых свойств материала, а также проводят дополнительные исследования для определения недостающих функциональных зависимостей. При установлении принципиальной возможности применения ПСМ для производства конструкций с заданными свойствами устанавливают последовательность изготовления листовых заготовок с этими свойствами. Затем с использованием

априорной информации определяют марку материала проволок сеток, методы уплотнения брикета сеток и консолидации проволок при получении ПСМ.

На *третьем этапе* осуществляется определение оптимальных значений конструктивных и технологических параметров. Для этого в установленных диапазонах изменения управляющих параметров вычисляют значения соответствующих свойств материала и проверяют выполнение условий эксплуатации, при соблюдении которых определяют значения указанных параметров. В случае, когда не удается получить решение, удовлетворяющее техническим требованиям, корректируют технологию. Если и этого оказывается недостаточно, уточняют технические требования на листовой ПМ.

Затем с учетом результатов вычислений выбирают технологическое оборудование и оснастку. Если существующие средства технологического оснащения не удовлетворяют предъявленным требованиям, необходимо создавать специализированное оборудование и инструменты.

На *следующих функциональных этапах* единого процесса изготовления изделия выполняются формоизменение листовых заготовок и их сварка. При этом, как и при создании листовых ПМ, устанавливают технологию, а также вычисляют значения параметров листовой штамповки и сварки путем анализа соответствующих математических моделей. В случае, когда не удается получить приемлемое решение, изменяют схемы деформирования, вид сварки или корректируют чертеж изделия.

Применение в качестве заготовок фильтрующих элементов нашли ТМС из коррозионностойких сталей. Тонкость очистки жидкостей и газов одним слоем сетки достигает 20...40 мкм [1]. Некоторого улучшения фильтровальных характеристик можно достичь посредством применения многослойного брикета сеток.

Исследования штампуемости и свариваемости ТМС показали их низкие технологические свойства вследствие значительной анизотропии и перемещения проволок относительно друг друга при пластической деформации. Кроме того, к недостаткам сеток следует отнести возможность увеличения проходных сечений ячеек при листовой штамповке, сварке плавлением и эксплуатации изделий.

Создание ПВМ вызвало большой интерес благодаря возможности достижения высокой пористости, достигающей 0,98. Исследования структуры и свойств ПВМ показали, что эти материалы обладают высокими гидравлическими и механическими свойствами [10, 11].

Приведенные данные свидетельствуют о целесообразности использования заготовок из ПВМ для изготовления капиллярных структур тепловых труб и заборных устройств, обеспечивающих подачу жидкостей против сил гравитации или в условиях невесомости,

а также проницаемых элементов с толщиной очистки 2...10 мкм. Благодаря высоким антивибрационным и звукопоглощающим свойствам волоконные материалы применяют при изготовлении элементов конструкций, используемых при эксплуатации точных приборов, электронной аппаратуры, станков и турбин. Однако отсутствие данных о штампосварности и свариваемости волоконных материалов пока не позволяет рекомендовать их для изготовления штампосварных изделий с заданными свойствами.

Экспериментальные исследования гидравлических, фильтровальных, механических и технологических свойств ППМ из коррозионноустойчивых сталей показали, что основное преимущество этого вида проницаемых заготовок заключается в возможности при фильтрации жидкостей и газов задерживать механические частицы размером от 2 мкм [1, 12]. Существенный фактор, ограничивающий применение ППМ для изготовления проницаемых изделий, — низкая штампосварность, так как относительное удлинение этих материалов при разрыве не превышает 1,5 %.

Возможность изготовления проницаемых изделий больших размеров и сложной формы из ПМ неразрывно связана с проблемой получения сварных конструкций путем соединения пористых элементов. При этом сварные соединения должны иметь минимальную ширину шва и максимальную относительную прочность, а также в шве или в зоне термического влияния должны отсутствовать трещины и другие сквозные дефекты. Результаты исследования свариваемости ППМ в условиях аргонодуговой сварки (АрДС) показали, что при пористости основного материала 0,4–0,5 основным дефектом являются сквозные «свищи» в шве, образующиеся при выбросе металла в процессе расплавления. При этом относительная прочность стыковых соединений не превышает 0,7–0,9. Кроме того, применение АрДС ограничено, так как образуются широкие швы, существенно уменьшающие поверхность фильтрации.

Эксперименты по электронно-лучевой сварке (ЭЛС) заготовок из ППМ на стандартном оборудовании продемонстрировали возможность получения равнопрочных соединений. Однако в результате неравномерной структуры, характерной для высокопористых ППМ, в стыковых сварных соединениях на участках с порами больших размеров возникают прожоги [13].

Пористые сетчатые материалы, изготавливаемые сваркой давлением ТМС с применением горячей прокатки в контролируемой газовой среде, представляют значительный интерес для выпуска изделий с требуемыми характеристиками [14]. Благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой они обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами. ПСМ используют при изготовлении

фильтрующих элементов [1, 2] для очистки жидкостей и газов от механических примесей.

Экспериментальные исследования штампуемости и свариваемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т показали, что более технологичными являются заготовки с высокой межслойной прочностью и низкой анизотропией механических свойств в плоскости листа [15]. При этом установлено, что формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки в процессе листовой штамповки.

Отличием ПСМ от ППМ является анизотропия. Существенное влияние на формирование шва в условиях сварки плавлением оказывают соотношения коэффициентов эффективной теплопроводности кромок по толщине (λ_t) и в направлении, перпендикулярном движению источника сварки (λ_w). Кроме того, при сварке высокопористых заготовок, для которых характерна низкая теплопроводность по толщине, в зависимости от величины λ_w возможно образование дефектов различного вида. Так, для заготовок с высоким значением λ_w в результате интенсивного теплоотвода в плоскости листа уменьшается глубина проплавления и возрастает градиент температуры по ширине сварочной ванны, что в свою очередь может привести к разрыву шва в процессе кристаллизации. А при сварке тех же заготовок в направлении, для которого характерно низкое значение λ_w , происходит несплавление отдельных проволок в кромках соединяемых элементов с металлом шва. Такие дефекты возникают в результате действия сил поверхностного натяжения на границе жидкого металла оплавившихся проволок и сварочной ванны.

Кроме того, проведенные эксперименты показали, что для заготовок с высокой анизотропией теплопроводности в плоскости листа ширина непроницаемой зоны (шва) не зависит от направления сварки, а возрастает с уменьшением теплопроводности в направлении толщины свариваемых кромок.

Изучение свариваемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т показало, что с уменьшением пористости и увеличением соотношения λ_t/λ_w качество сварных соединений возрастает. Для изготовления высокопористых сварных конструкций целесообразно применять ПСМ с меньшей анизотропией теплопроводности в плоскости листа. С этой целью следует использовать ПСМ на основе ТМС с квадратными ячейками (ГОСТ 3826–82), расположенных под углом 45° друг к другу.

Выполненные эксперименты по сварке ПСМ из стали 12Х18Н10Т позволили установить, что качественные соединения могут быть получены на минимально возможном токе, при котором происходит проплавление корня шва. Для аргонодуговой сварки стыковых соединений со скоростью более 30 м/ч требуется более высокая сила

тока, что для заготовок с пористостью более 0,3 приводит к образованию подрезов в зоне сплавления, а при скорости сварки менее 10 м/ч резко возрастает ширина шва. Поэтому оптимальная скорость сварки должна быть в интервале от 10 до 30 м/ч, причем с увеличением пористости заготовок скорость снижается. Для уменьшения вероятности образования подрезов сварку изделий с пористостью более 0,2 целесообразно осуществлять с присадочным материалом.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) — оптимальный вид сварки пористых заготовок при создании фильтрующих элементов тонкой очистки жидкостей и газов от механических загрязнений. Для разработки технологии сварки и изучения прочности сварных соединений проведены исследования [16], в которых варьировали силу тока луча, скорость сварки и величину пористости заготовок. Интервалы варьирования параметрами приведены в таблице. В качестве параметра оптимизации принимали величину относительной прочности сварных соединений $\sigma_{св}/\sigma_{вх}$ ($\sigma_{вх}$ — предел прочности ПСМ при одноосном растяжении в направлении проволок сеток; $\sigma_{св}$ — прочность стыкового сварного соединения с той же пористостью в направлении проволок сеток).

Основные уровни и интервалы варьирования

Параметры	Уровни			Ширина интервалов варьирования
	нижний	нулевой	верхний	
Сила тока, мА	45	55	65	10
Скорость сварки, м/ч	20	35	50	15
Пористость	0,15	0,25	0,35	0,1

В процессе сварки диаметр фокального пятна, величину фокусного расстояния и ускоряющее напряжение не изменяли и поддерживали соответственно равными $d_f = 0,5$ мм, $l_0 = 120$ мм, $V_A = 30$ кВ. Величина $\sigma_{вх}$ составляла для ПСМ с пористостью 0,35 и 0,15 соответственно 190 и 300 МПа. В качестве расчетной модели приняли полином первой степени, расчет коэффициентов которого позволил получить уравнение регрессии

$$\frac{\sigma_{св}}{\sigma_{вх}} = 0,804 + 0,075P - 0,023PV_{св} + 0,0057V_{св},$$

где P — пористость; $V_{св}$ — скорость сварки.

Анализ экспериментальных данных показал, что при пористости основного материала менее 0,25 увеличение относительной прочности может быть достигнуто путем повышения скорости сварки, а при пористости более 0,25 уменьшение скорости сварки приводит к возрастанию величины $\sigma_{св}/\sigma_{вх}$. При этом изменение силы тока луча

в интервале 0,45...0,65 мА незначительно влияет на прочность соединения.

Металлографические исследования выявили наличие подрезов в местах несплавления проволок с металлом шва, количество которых возрастало с увеличением пористости. Ширина получаемых швов на образцах толщиной 2,8...3,8 мм при варьировании параметров режима сварки изменялась незначительно и составляла 2,5...3,0 мм.

Исследование влияния сварки плавлением на изменение гидравлических и структурных характеристик пористых заготовок показало, что снижение проницаемости сварных соединений пропорционально площади шва, при этом размеры пор в зоне сплавления не изменяются.

Представленные методика и математическая модель применены при разработке технологии изготовления штампованных фильтров, обеспечивающих требуемую тонкость очистки рабочих сред.

Разработка технологического процесса изготовления листовых заготовок из ПСМ. Основная задача при проектировании и изготовлении фильтров состоит в обеспечении требуемых конфигурации и массы фильтра при максимальной площади фильтрующих элементов и заданной тонкости очистки. Создание фильтра может быть реализовано путем применения заготовок, обладающих наряду с требуемыми фильтровальными, гидравлическими и механическими характеристиками необходимой коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами. При этом фильтроэлементы (ФЭ), обеспечивающие высокую тонкость очистки рабочей среды от твердых примесей, как правило, отличаются низкой проницаемостью. Поэтому в процессе проектирования технологии изготовления фильтров с заданными свойствами в качестве основного эксплуатационного показателя принята номинальная тонкость очистки $a_{\text{ном}}$, соответствующая такому размеру частиц, которые ФЭ задерживает с эффективностью очистки, равной 0,95–0,97 [6].

При равных пористости и диаметре проволок более высокими гидравлическими свойствами обладают проницаемые элементы на основе ТМС с квадратными ячейками, причем размеры пор и проницаемость снижаются с уменьшением величины

$$n_l = \frac{a + d}{d},$$

где a — размер ячейки сетки «в свету»; d — диаметр проволок сетки.

Увеличение относительного обжатия ε брикета сеток в процессе сварки давлением приводит к уменьшению среднего размера пор δ_m , пористости P и коэффициента проницаемости K_p пористого сетчатого материала.

Анализ экспериментальных данных по тонкости очистки ФЭ из ПСМ [1] позволил установить, что с некоторым приближением можно принять

$$a_{\text{ном}} = \frac{\delta_m}{2}. \quad (1)$$

Для определения значения среднего размера пор и коэффициента проницаемости использованы зависимости [6]

$$\delta_m = \frac{3K_l P d}{(1 + 2K_l)(1 - P)}; \quad (2)$$

$$K_p = \frac{2\delta_m^2 P}{53,3K_l(1 + K_l)}, \quad (3)$$

где $K_l = 0,84 - 0,69P$.

Удельная проницаемость пористого элемента толщиной h_b при перепаде давления Δp фильтруемой среды с коэффициентом динамической вязкости μ описывается уравнением Дарси:

$$q = \frac{K_p \Delta p}{h_b \mu}. \quad (4)$$

Предложенная в работе [9] методика проектирования штампованных проницаемых изделий и результаты исследования гидравлических, механических и технологических свойств ПМ использованы при создании фильтров с тонкостью очистки 10...12 мкм.

В техническом задании (ТЗ) на проектирование и изготовление изделия, принципиальная схема которого приведена 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.

Для изготовления требуемого фильтра сформулированы следующие технические требования к пористым ФЭ:

– при указанных перепадах удельная проницаемость 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 $\delta_m \leq 25$ мкм;

– для ПМ толщиной $0,2 \leq h_b \leq 0,5$ мм предел прочности $\sigma_{\text{вх}} \geq 100$ МПа;

– относительная прочность стыковых сварных соединений $\sigma_{\text{св}}/\sigma_{\text{вх}} \geq 0,6$.

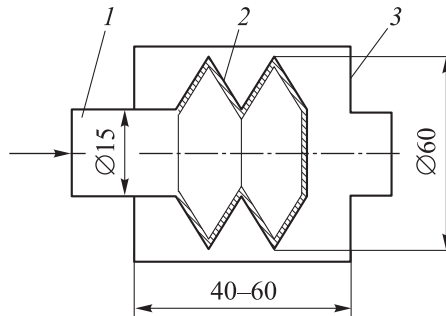


Рис. 1. Принципиальная схема фильтра:
1 — ось; 2 — ФЭ; 3 — корпус

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

Результаты исследования фильтровальных, гидравлических, структурных, механических и технологических свойств ТМС и ППМ, которые получают методом порошковой металлургии из коррозионностойких хромоникелевых сталей на промышленных предприятиях [1, 2, 17], позволили установить, что они не удовлетворяют требованиям технического задания. Поиск новых решений показал, что для изготовления фильтров с заданными свойствами могут быть использованы ПСМ из стали 12Х18Н10Т, получаемые сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток [14] с размером ячеек $a < 0,16$ мм. При этом число слоев сеток должно лежать в диапазоне от 4 до 15, а величина относительного обжатия должна находиться в интервале $0,2 \leq \varepsilon \leq 0,6$.

Изготавливать ФЭ («чечевицы») целесообразно путем листовой штамповки ПСМ в следующей последовательности: вырубка круглой заготовки (рис. 2, а), формовка центральной части (рис. 2, б), вытяжка (рис. 2, в), пробивка и отбортовка (рис. 2, г). Соединение чечевиц фильтра целесообразно осуществлять с помощью ЭЛС.

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

$$h_b = nh_c(1 - \varepsilon), \quad (5)$$

где h_c — толщина ТМС; n — количество ТМС.

Пористость листовых заготовок толщиной h_b при условии отсутствия уширения и вытяжки сеток при их обжатии в процессе прокатки определяется выражением [9]

$$P = 1 - \frac{nh_c(1 - P_s)}{h_b}, \quad (6)$$

где P_s — пористость ТМС в исходном состоянии [1].

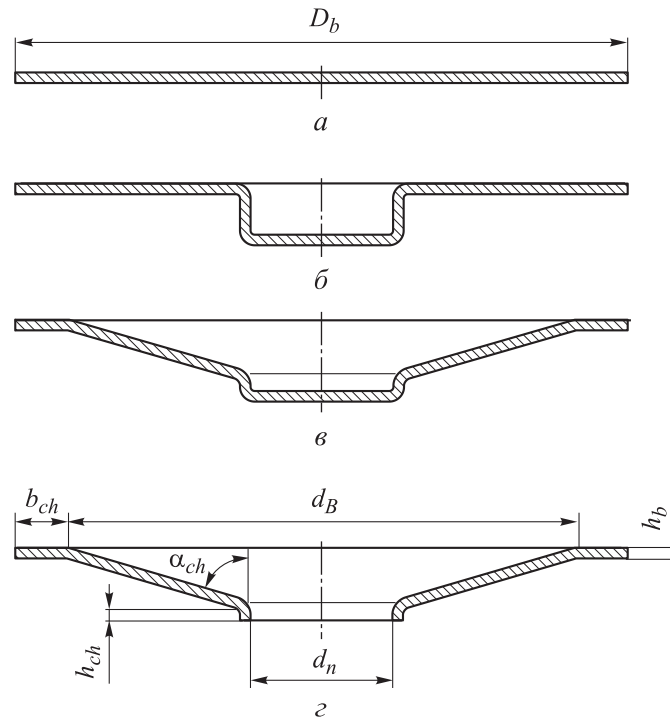


Рис. 2. Последовательность операций листовой штамповки чечевицы

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 [18] так:

$$\sigma_{\text{вх}} = \frac{\pi d \sigma_{\text{в}}}{8(a+d)(1-\varepsilon)}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности материала проволок ТМС.

Коэффициенты формоизменения в значительной степени зависят от максимального относительного удлинения ПСМ после разрыва δ , определяемого в основном пластичностью проволок сеток и величиной относительного обжатия сеток в процессе сварки давлением. Для пористых заготовок из стали 12Х18Н10Т, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах сеток с диаметром проволок менее 0,13 мм, численные значения δ могут быть определены по эмпирической зависимости

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

Диаметр D_b изготавливаемой листовой штамповкой чечевицы может быть определен по приведенным в работах [19, 20] данным:

$$D_b = \sqrt{\frac{d_n^2 (\sin \alpha_{ch} - 1) + d_B^2}{\sin \alpha_{ch}} + 4b_{ch} (d_B + b_{ch})}. \quad (9)$$

При вытяжке конического участка оболочки удлинение заготовки рассчитывают так:

$$e_s = \frac{d_B - d_n + \sin \alpha_{ch} (2b_{ch} - 1)}{(1 - P)(D_b - d_n) \sin \alpha_{ch} + P(d_B - d_n + 2b_{ch} \sin \alpha_{ch})}, \quad (10)$$

где b_{ch} , d_n , d_B , α_{ch} — размеры чечевицы (см. рис. 2).

Исследование влияния операций листовой штамповки на изменение размера пор показало, что в процессе вытяжки конического участка чечевицы практически не наблюдалось увеличения размера пор, так как при $d_n = 15$ мм, $d_B = 50 \pm 2$ мм, $b_{ch} = 5 \pm 2$ мм, $\alpha_{ch} = 75 \pm 5^\circ$ величина вытяжки $e_s = 0,04-0,05$ (коэффициент вытяжки $k_{DF} = 1,06$). В процессе формовки лунки (см. рис. 2) в результате двухосного растяжения средний размер пор возрастает на 24 %, но поскольку этот участок имеет небольшую протяженность, это увеличение не оказывает существенного влияния на проницаемость чечевицы.

Величина относительного удлинения на кромках пористой заготовки при отбортовке внутреннего диаметра чечевицы может быть приближенно определена по формуле

$$e_l = \frac{2h_{ch}}{\pi d_n - 2h_{ch}}, \quad (11)$$

где h_{ch} — высота горловины чечевицы, $h_{ch} = 2,5$ мм.

Зависимости (10) и (11) позволили установить, что $e_l > e_s$, поэтому необходимо предусмотреть выполнение следующего условия:

$$\delta > e_l. \quad (12)$$

Технологический процесс изготовления фильтра предполагает выполнение кольцевых швов при сварке отдельных его элементов. При этом качество сварных соединений определяется, как правило, величиной пористости ФЭ.

Изучение механических свойств стыковых сварных соединений ПСМ в условиях одно- и двухосного растяжения позволило установить, что с увеличением пористости основного материала происходит снижение относительной прочности сварного соединения, величина которой при $P > 0,2$ может быть описана эмпирической зависимостью [21]

$$\frac{\sigma_{св}}{\sigma_{вх}} = 1,3 - 1,5P. \quad (13)$$

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

$$P \geq 0,67 \left(1,3 - \frac{\sigma_{св}}{\sigma_{вх}} \right). \quad (14)$$

Оптимальные значения технологических параметров изготовления ФЭ (чечевиц) определены путем математического моделирования с использованием уравнений (1)–(14). Результаты расчетов показали, что требованиям ТЗ отвечает заготовка толщиной 0,5 мм и пористостью 0,5, изготовленная сваркой прокаткой в вакуумированном конверте 13 слоев сеток с квадратными ячейками размером «в свету» 0,04 мм из стали 12X18H10T при относительном обжатии 0,4. Расчет показал, что в условиях одно- и двухосного растяжения ПСМ обладает следующими механическими свойствами: $\sigma_{вх} = 166$ МПа, $\delta = 0,12$.

Расчет по уравнениям (9)–(11) позволил установить, что для получения чечевиц с размерами: $d_n = 15$ мм, $d_B = 50$ мм, $b_{ch} = 5$ мм, $h_{ch} = 2,5$ мм, $\alpha_{ch} = 75^\circ$ диаметр заготовки при листовой штамповке составляет 62 мм, относительное удлинение в процессе вытяжки конической части пористого элемента $e_l = 0,04$, а при отбортовке — $e_s = 0,118$.

На основе выполненных расчетов и экспериментальных исследований технологических процессов изготовления листовых ПСМ с заданными свойствами, листовой штамповки и сварки плавлением разработана конструкция фильтра, состоящего из четырех ФЭ (чечевиц), оси и двух втулок из стали 12X18H10T, которые соединены между собой кольцевыми швами, выполненными ЭЛС (рис. 3). Сила тока

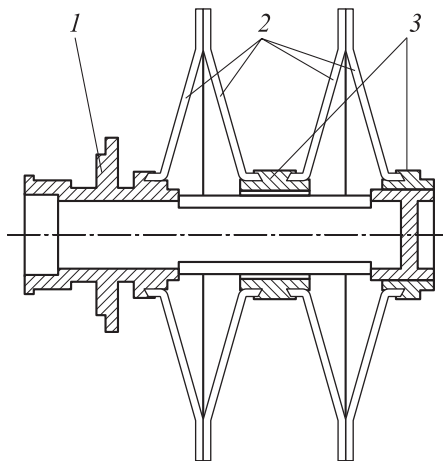


Рис. 3. Конструкция разработанного фильтра:
1 — ось; 2 — чечевицы; 3 — втулки

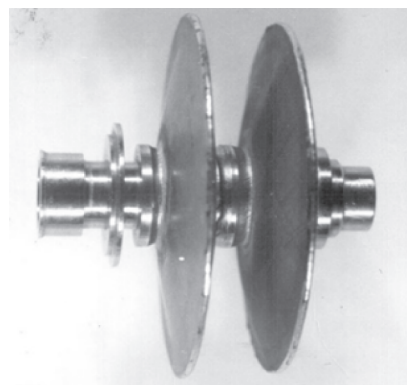


Рис. 4. Штампованный фильтр из стали 12X18H10T, обеспечивающий тонкость очистки 10...12 мкм

в процессе сварки составляла 5...6 мА при ускоряющем напряжении 50 кВ с диаметром фокального пятна 1 мм. Сварка чечевиц с осью и втулками была проведена со скоростью 6,3 м/ч, а чечевиц между собой — со скоростью 22 м/ч. Контроль качества сварных соединений элементов фильтра в условиях гидростатического испытания показал, что вероятность получения бездефектных сварных соединений составляет 0,96.

Результаты стендовых испытаний изготовленных штампосварных фильтров (рис. 4) продемонстрировали, что разработанный и представленный в статье технологический процесс позволяет получать изделия, которые полностью удовлетворяют требованиям ТЗ.

Заключение. На основе выполненных расчетов и экспериментальных исследований технологических процессов изготовления листовых ПСМ с заданными свойствами, листовой штамповки и сварки плавлением разработана конструкция фильтра, состоящего из четырех фильтроэлементов (чечевиц), оси и двух втулок из стали 12Х18Н10Т, которые соединены между собой кольцевыми швами, выполненными ЭЛС.

Исследования штампуемости, свариваемости ПСМ из стали 12Х18Н10Т и изменения свойств заготовок в процессе формоизменения и сварки плавлением позволили разработать технологические процессы листовой штамповки для изготовления ФЭ с требуемыми размерами и обеспечить их надежное соединение между собой, а также с осью и втулками фильтра ЭЛС.

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

Авторы статьи выражают благодарность преподавателю кафедры МТ13, доценту, канд. техн. наук Михаилу Серезжину за помощь по подготовке иллюстраций и оформлению работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 338с.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013. 444 p.
- [3] Pelevin F.V. Heat transfer in meshed metallic materials with interchannel transpiration and two-dimensional intermesh flow of heat transfer fluid. *High Temperature*, 2018, vol. 46 (2), pp. 208–216.
- [4] Пелевин Ф.В., Аврамов Н.И., Орлин С.А., Синцов А.Л. Эффективность теплообмена в пористых элементах конструкций жидкостных ракетных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>

- [5] Xu G., Liu Y., Luo X., Ma J., Li H. Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 898–907.
- [6] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К. Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин. *Препринт ОИВТ РАН № 2-502*. Москва, 2010, 64 с.
- [7] Bunker R.S. The role of materials and manufacturing technologies as enablers in gas turbine cooling for high performance engines. *Ceramic Transactions*, 2009, 205, pp. 3–2.
- [8] Новиков Ю.М., Большаков В.А. Инженерная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана: комбинированные пористые сетчатые материалы. Эффективные, безопасные и экологичные изделия на их основе. *Безопасность жизнедеятельности*, 2005, № 11, с. 53–56.
- [9] Третьяков А.Ф. Методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1588>
- [10] Косторнов А.Г. *Проницаемые металлические волокновые материалы*. Киев, Техніка, 1983, 128 с.
- [11] Kostornov A.G., Krichenko O.V., Brodnikovskii N.P., Gusliencko Y.A., Klimenko V.N. High-porous material made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2008, vol. 47 (5–6), pp. 295–298.
- [12] Belov S.V., Shmelev L.S., Spiridonov V.S., Ksenofontov A.V., Prikhodko N.G. Structural hydraulic, and filter characteristics of type FNS porous sheets. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1986, vol. 25 (3), pp. 256–241.
- [13] Ovchinnikov V.V., Antonov A.A., Gureev M.A., Magnitov V.S. Special features of welding filtration of the cartridge type produced from porous metallic materials. *Welding International*, 2002, no. 10, pp. 828–831.
- [14] 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.
- [15] Третьяков А.Ф. Влияние конструкции и относительного обжатия брикета сеток в процессе консолидации на межслойную прочность пористых сетчатых материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016, № 11, с. 3–13.
- [16] Tretiakov A., Serezhkin M. Manufacturing technology stamp-welded workpieces based on porous-net material with desired properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 589, 012022 DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012022
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Кременский И.Г. Проницаемость штампосварных изделий из пористого сетчатого материала. *Прогрессивная технология конструкционных материалов: Тр. МВТУ, № 405*. Москва, 1984, с. 35–41.

- [20] Третьяков А.Ф., Кременский И.Г., Минькин С.А. Проектирование комплексных технологических процессов изготовления фильтроэлементов из пористых сетчатых материалов. *Известия вузов. Машиностроение*, 1988, № 5, с. 132–136.
- [21] 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 ПСМ. *Производство проката*, 2013, № 6, с. 29–34.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф., Даниленко К.Б. Разработка технологических процессов изготовления штампованных изделий из коррозионностойких пористых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-3-2346>

Третьяков Анатолий Федорович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 150 опубликованных научных работ в области создания изделий из пористых композитов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

Даниленко Константин Борисович — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 14 публикаций в области нелинейного деформирования стержней и оболочек. e-mail: dcb@bmstu.ru

Development of technological processes in manufacture of the stamped and welded products using the corrosion-resistant porous materials with the specified properties

© A.F. Tretyakov, C.B. Danilenko

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Porous metal-based materials are widely used in heat engineering, space, aviation, chemical and other industries. They possess the required strength characteristics, hydraulic and technological properties, and are also able of operating at high temperatures and pressures. The optimal technology option for manufacturing permeable products with the specified properties was selected on the basis of systematic approach, which main procedure included the structural simulation modeling. Analysis of the unit designs and their operation conditions made it possible to establish that the most promising ones were those porous net materials made of the 12X18H10T steel, as they were having the required permeability and pore sizes, high mechanical and technological properties. Porous net materials (PNM) made by pressure welding of the woven metal nets using hot rolling in the controlled gas environment possessed stable and reproducible properties. Therefore, they are used in manufacturing filter elements for systems purifying liquids and gases from the mechanical impurities in engines. Mathematical models of the technological process in manufacturing the stamp-welded filters from the 12X18H10T steel were developed providing the required fineness of gas purification from mechanical particles at the given values of flow characteristics, thickness and strength. Optimal values of the technological processes parameters were determined for manufacture of the sheet PNM, stamping the filter elements of the required sizes and electron beam welding in the filter manufacture. Results of bench tests of the developed and manufactured products showed that they provided the required flow characteristics at the given gas purification fineness.

Keywords: porous net materials, strength characteristics, permeable products, structural simulation modeling, permeability, woven net, stamp-welded filter, filter element

REFERENCES

- [1] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnik* [Porous permeable materials: Handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [2] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013, 444 p.
- [3] Pelevin F.V. Heat transfer in meshed metallic materials with interchannel transpiration and two-dimensional intermesh flow of heat transfer fluid. *High Temperature*, 2018, vol. 46 (2), pp. 208–216.
- [4] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. Effektivnost teploobmena v poristyykh elementakh konstruktsiy zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Heat exchange efficiency in porous structural elements of liquid-propellant rocket engines]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 4.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>
- [5] Xu G., Liu Y., Luo X., Ma J., Li H. Experimental investigation of transpiration cooling for sintered woven wire mesh structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 898–907.

- [6] Zeygarnik Yu.A., Polyakov A.F., Stratyev V.K. Tretyakov A.F., Shekhter Yu.L. Ispytaniya poristogo setchatogo materiala v kachestve obolochki lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin [Testing porous meshed material as the shell of high-temperature gas turbine blades]. *Preprint OIVT RAN No. 2-502* [Preprint, Joint Institute for High Temperatures of the RAS, no. 2-502]. Moscow, 2010, 64 p.
- [7] Bunker R.S. The role of materials and manufacturing technologies as enablers in gas turbine cooling for high performance engines. *Ceramic Transactions*, 2009, no. 205, pp. 3–2.
- [8] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Inzhenernaia shkola MGTU im. N.E. Bauma: Kombinirovannye poristye setchatye materialy. Effektivnye, bezopasnye i ekologichnye izdeliya na ikh osnove [School of Engineering BMSTU: Combined porous metal mesh. Efficient, safe and environmentally friendly products based on them]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti — Life Safety*, 2005, no. 11, pp. 53–56.
- [9] Tretyakov A.F. Metodika proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya izdeliy iz poristykh setchatykh materialov s zadannymi svoystvami [Design technique of manufacturing process of porous material products with desired properties]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1588>
- [10] Kostornov A.G. *Pronitsaemye metallicheskie voloknovye materialy* [Permeable metal fiber materials]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1983, 128 p.
- [11] Kostornov A.G., Krichenko O.V., Brodnikovskii N.P., Guslienko Y.A., Klimenko V.N. High-porous material made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2008, vol. 47 (5–6), pp. 295–298.
- [12] Belov S.V., Shmelev L.S., Spiridonov V.S., Ksenofontov A.V., Prikhodko N.G. Structural hydraulic, and filter characteristics of type FNS porous sheets. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1986, vol. 25 (3), pp. 256–241.
- [13] Ovchinnikov V.V., Antonov A.A., Gureev M.A., Magnitov V.S. Special features of welding filtration of the cartridge type produced from porous metallic materials. *Welding International*, 2002, no. 10, pp. 828–831.
- [14] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [15] Tretyakov A.F. Vliyanie konstruktivnoi i odnositel'nogo obzhatiya briketa setok v protsesse konsolidatsii na mezhsloynnyu prochnost poristykh setchatykh materialov [The influence of wire mesh block configuration and reduction rate on the interlaminar strength of porous net materials during the consolidation process]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 11, pp. 3–13.
- [16] Tretyakov A., Serezhkin M. Manufacturing technology stamp-welded workpieces based on porous-net material with desired properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 589, 012022 DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012022
- [17] Spiridonov V.S., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Fil'trovalnye peregorodki iz spechennykh metallicheskiykh setok dlya vstroennykh fil'trov aviatsionnykh gidrosistem [Filtering walls made of sintered metal gauzes for built-in filters of aviation hydraulic systems]. *Bezopasnost v tekhnosfere — Safety in Technosphere*, 2015, no. 4, pp. 39–45.

- [18] Tretyakov A.F. Vliyanie konstruktivnykh, tekhnologicheskikh parametrov i skhemy deformirovaniya na anizotropiyu mekhanicheskikh svoystv listovykh poristykh setchatykh materialov [The influence of structural, technological parameters and strain state on anisotropy of mechanical properties of sheet porous net materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 12, pp. 87–96.
- [19] Kremensky I.G. Pronitsaemost shtamposvarnykh izdeliy iz poristogo setchatogo materiala [Permeability of stamped and welded products made of porous net material]. *Progressivnaya tekhnologiya konstruksionnykh materialov: Trudy MVTU, no. 405* [Progressive Technology of Structural Materials: Works of MHTS]. Moscow, 1984, pp. 35–41.
- [20] Tretyakov A.F., Kremensky I.G., Minkin S.A. Proektirovanie kompleksnykh tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya filtroelementov iz poristykh setchatykh elementov [Design of complex technological processes for the filter elements manufacture from the porous net materials]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1988, no. 5, pp. 132–136.
- [21] Tretyakov A.F. Tekhnologicheskaya nasledstvennost v protsesse izgotovleniya izdeliy iz poristykh setchatykh materialov s zadannymi svoystvami. Soobshchenie 2. Zakonomernosti vliyaniya plasticheskoy deformatsii i konsolidatsii provolok setok na tekhnologicheskie i teplofizicheskie svoystva PSM [Technological heredity in production process of components made of porous net materials having specified properties. Report 2. Influence regularities of plastic strain and net wire consolidation on technological and thermophysical properties of porous net materials]. *Proizvodstvo prokata (Rolled products Manufacturing)*, 2013, no. 6, pp. 29–34.

Tretyakov A.F., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Materials Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University, author of more than 150 published scientific papers in creating products from porous composites with a given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

Danilenko C.B., Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, author of 14 publications in nonlinear deformation of rods and shells. e-mail: dcb@bmstu.ru