

Методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых материалов с заданными свойствами

© А.Ф. Третьяков

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

Металлические пористые материалы отличаются значительным разнообразием типов структурообразующих элементов и технологических процессов их изготовления. Созданные технологии получения изделий с заданными свойствами основаны на явлении технологической наследственности. Принцип моделирования пористых структур заключается в том, что сложный реальный объект заменяют геометрической моделью, доступной для математического моделирования. Приведена блок-схема проектирования технологических процессов изготовления штамповарных изделий из пористых материалов с заданными свойствами. Разработанная методика реализована при создании бескаркасных фильтров со сферическими фильтроэлементами из пористых сетчатых материалов для очистки жидкостей и газов от механических загрязнений. Представлены результаты стендовых испытаний изготовленных штамповарных фильтров, обеспечивающих требуемую тонкость очистки при максимальной площади фильтрации и заданных расходных характеристиках фильтруемой среды.

Ключевые слова: *металлические пористые сетчатые материалы, тканые проволочные сетки, проектирование технологических процессов, технологическая наследственность, моделирование пористой структуры, штамповарное изделие, фильтр, фильтрующие элементы, номинальная тонкость очистки*

Введение. Пористые материалы (ПМ), используемые в различных областях науки и техники, отличаются от компактных проницаемостью и меньшей плотностью. Их можно разделить на две большие группы: ПМ на неметаллической и ПМ на металлической основе. Последние широко применяют в машиностроении, теплоэнергетике, ракетной, авиационной, химической и других отраслях промышленности. Это обусловлено тем, что ПМ на металлической основе имеют требуемые прочностные, теплофизические, гидравлические, технологические свойства и способны работать при высоких температурах и давлениях.

К ПМ на металлической основе относятся пористые порошковые материалы (ППМ), пористые сетчатые материалы (ПСМ), волоконные, комбинированные проницаемые ПМ и др. [1].

Пористые сетчатые материалы, изготавливаемые консолидацией тканых проволочных сеток с применением горячей деформации в контролируемой газовой среде, целесообразно использовать для создания проницаемых изделий с требуемыми характеристиками. Бла-

годаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой ПСМ обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами. Пористые сетчатые материалы применяют при изготовлении фильтрующих элементов [2, 3] для очистки жидкостей и газов от механических примесей, а также в системах теплозащиты ракетных двигателей [4]. Кроме того, их используют для создания оболочек турбинных лопаток парогазовых установок и газотурбинных двигателей [5–7], капиллярных заборных установок [8] и др.

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 [9]. Также установлено, что формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки в процессе листовой штамповки.

При создании современного оборудования все большее значение приобретает проблема оптимального проектирования деталей и машин. Поток исследований в этой области непрерывно растет, но чаще при проектировании варьируют геометрические параметры изделий и не рассматривают технологию производства заготовок, из которых они создаются. Дело в том, что исторический опыт применения традиционных металлов и сплавов привел к дифференциации процессов производства заготовок и конструкций из них. Поэтому разработка технологий ведется на основе имеющихся заготовок, обладающих определенными характеристиками.

С появлением конструируемых (композиционных) материалов многие исследователи неоднократно отмечали, что заготовки нельзя рассматривать отдельно от изделий, для изготовления которых они используются. Прежде всего это означает, что утверждение об оптимальности технологии приобретает смысл только при конкретизации условий эксплуатации, геометрических параметров изделий и технологии их изготовления. Таким образом, создавать штамповочные изделия из ПМ с оптимальными свойствами можно только при системном подходе, учитывающем все операции получения листовых пористых заготовок, последующей штамповки, сборки и сварки элементов конструкции.

Цель исследования — разработка методики проектирования технологических процессов изготовления штамповочных изделий из ПМ с заданными свойствами и ее реализация при создании фильтров для очистки жидкостей и газов от механических загрязнений.

Моделирование технологий изготовления изделий из ПМ. Возможны различные пути достижения поставленной цели, один из которых основан на технологической наследственности [10]. Это предполагает рассмотрение всей совокупности технологических опе-

раций изготовления изделий, а также установление связей и взаимозависимостей свойств деталей на предыдущих и последующих операциях.

Технологическая наследственность свойственна любому технологическому процессу, однако она особенно важна при изготовлении изделий из ПМ [11, 12]. Исследования показали, что пористые заготовки обладают сложной совокупностью структурных, гидравлических, теплофизических и механических свойств, которые существенно изменяются в процессе последующих операций листовой штамповки и сварки. Наследственная составляющая погрешности, возникающая на этапе получения листовых ПМ, оказывается значительной, на нее приходится и большая часть допуска на параметр изделия. Утверждение о том, что требуемое качество изделий из ПМ может быть получено только на одном из этапов изготовления проницаемых изделий с заданными свойствами, является неправильным — оно практически никогда не подтверждается.

К исходным носителям наследственной информации относятся свойства, форма и размеры структурообразующих элементов, параметры, описывающие их взаимное расположение и качество консолидации. Следует отметить, что все операции, связанные с пластическим деформированием и соединением структурообразующих элементов, приводят к изменению их первоначального расположения, формы, размеров, химического состава поверхностных слоев в результате комплексного воздействия температуры, величины и скорости деформации, а также газовой среды. Анализ всей совокупности параметров технологического процесса изготовления ПМ позволил установить, что наиболее значимое влияние на изменение его исходной структуры оказывает величина относительного обжатия структурообразующих элементов. Причем с увеличением значения этого параметра возрастают прочность и теплопроводность, уменьшаются пористость, проницаемость и размер пор.

Таким образом, вследствие сложных взаимосвязей между многочисленными свойствами изделий из ПМ и параметрами их изготовления технологический процесс представляет собой непростой объект управления, для адекватного описания которого следует разумно выбирать уровень детализации. При проектировании единого процесса изготовления проницаемых изделий можно выделить этап создания листовой заготовки в качестве самостоятельной функциональной подсистемы управления со своей внутренней организацией.

Оптимальный вариант технологии изготовления изделия с заданными свойствами выбирают на основе анализа, проведенного с помощью математического моделирования. Достигнуть поставленную цель можно путем структурно-имитационного моделирования, в результате которого устанавливают взаимосвязи между исходным строением структурообразующих элементов и уровнем гидравличе-

ских, фильтровальных, теплофизических, механических и технологических свойств изделий.

Основной принцип моделирования пористых систем заключается в том, что сложный реальный объект заменяют более простой геометрической моделью, доступной для элементарного математического описания. При таком упрощении игнорируются многие особенности строения ПМ, модель содержит только главные определяющие черты пористого тела. В последнее время работы по моделированию пористых изделий ведутся с обращением к фактическим данным об их строении. Необходимо отметить, что модель лишь приблизительно соответствует объекту, причем степень этого соответствия зависит от свойств объекта исследования.

Анализ технологических процессов получения изделий из ПМ показал, что из-за разнообразия физико-химических процессов, протекающих при их изготовлении, нельзя предложить единую модель. Так, наряду со стержневой моделью, которая описывает влияние конструкции брикета сеток и технологических параметров сварки давлением проволок на механические свойства и свариваемость ПСМ, для описания процесса листовой штамповки выбрана фенологическая модель в виде куба, пронизанного цилиндрическим каналом. При этом было принято допущение о том, что одинаковы характеристики механических свойств проволок в ПСМ и материала куба, а также равны пористости реальной заготовки и модели.

Для теоретического исследования среднего размера пор и коэффициента проницаемости ПМ получена модель пористой структуры в виде куба, грани которого пронизаны двумя или тремя взаимно перпендикулярными пересекающимися между собой пучками капиллярных каналов с постоянным сечением. Также предполагается равенство пористости и равенство удельной площади поверхности пор модели и реального ПМ. Что касается других характеристик, они могут значительно различаться. Таким образом, для описания каждого свойства и процесса, который его формирует, можно подобрать свою модель, т. е. объект можно представить несколькими различными моделями.

Еще один подход состоит в поиске оптимальной модели, которая близка к объекту и вместе с тем доступна для математического описания различных его свойств. Пористые тела представляют собой двухфазную систему, которая наряду с твердой содержит газообразную или жидкую фазу и поверхность раздела между ними. Пространство, занимаемое газообразной или жидкой фазой, называется порами. В понятие «геометрия пористой структуры» входят объем пор, линейные размеры и форма структурообразующих элементов, а также площадь поверхности раздела фаз.

Развивая правило обращения пористых структур, можно показать, что безразлично, геометрию какой из фаз изучать, т. е. если ис-

следована геометрия пор, то нет необходимости изучать геометрию твердого тела, и наоборот. Правило обращения может быть эффективно использовано при моделировании, так как в процессе изучения пористой структуры твердых тел можно представить ее как элементами пор, так и структурообразующими элементами. Многочисленные исследователи показали, что практически всегда пористое тело проще моделировать в какой-либо одной системе (в системе пор или в системе твердого тела).

Рационально применять ПМ можно при условии проектирования технологических процессов получения изделий начиная от формулировки технического задания и заканчивая определением параметров изготовления изделий и выбором средств технологического оснащения для реализации проекта.

Системный подход к реализации проектирования изделий из ПМ включает определение марок материалов и конструкций структурообразующих элементов, установление механизмов их уплотнения и консолидации, создание математической модели, описывающей влияние параметров технологического процесса на свойства деталей, а также оптимизацию значений управляющих параметров.

Практическое применение методики. Проектирование процессов изготовления оптимальных изделий из ПМ в соответствии с предложенной методикой рассмотрено на примере создания конструкций из ПСМ. 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. Блок-схема процесса разработки технологии изготовления изделий из ПСМ с заданными свойствами представлена на рис. 1.

На первом этапе проектирования выполняют разработку технических требований на изделие, устанавливают основные ограничения на форму и размеры конструкции. По его завершении формулируют технические требования на ПМ с указанием значений характеристик эксплуатационных, механических свойств и технологических ограничений, а также устанавливают максимальный относительный радиус гибки, предельные значения коэффициентов вытяжки, отбортовки, минимальную относительную прочность сварных соединений и т. п.

На втором этапе с учетом сформулированных технических требований последовательно определяют возможность применения выпускаемых промышленностью ПМ: металлических сеток, ППМ и др. [2]. Если рассматриваемые заготовки не удовлетворяют предъявленным требованиям, исследуют целесообразность использования более дорогостоящих ПСМ.

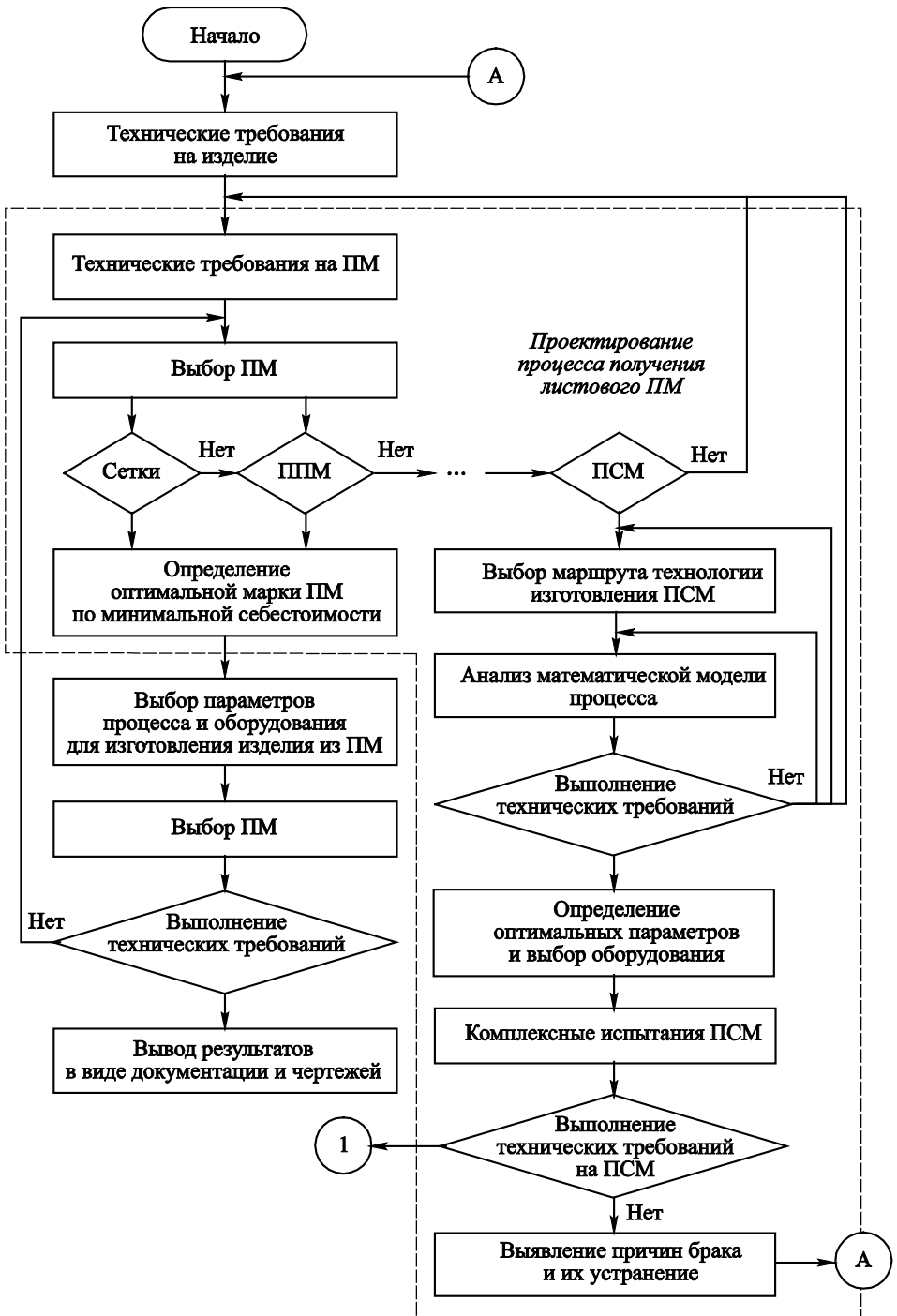


Рис. 1 (начало). Блок-схема процесса проектирования технологии изготовления штампованных изделий из ПСМ с заданными свойствами

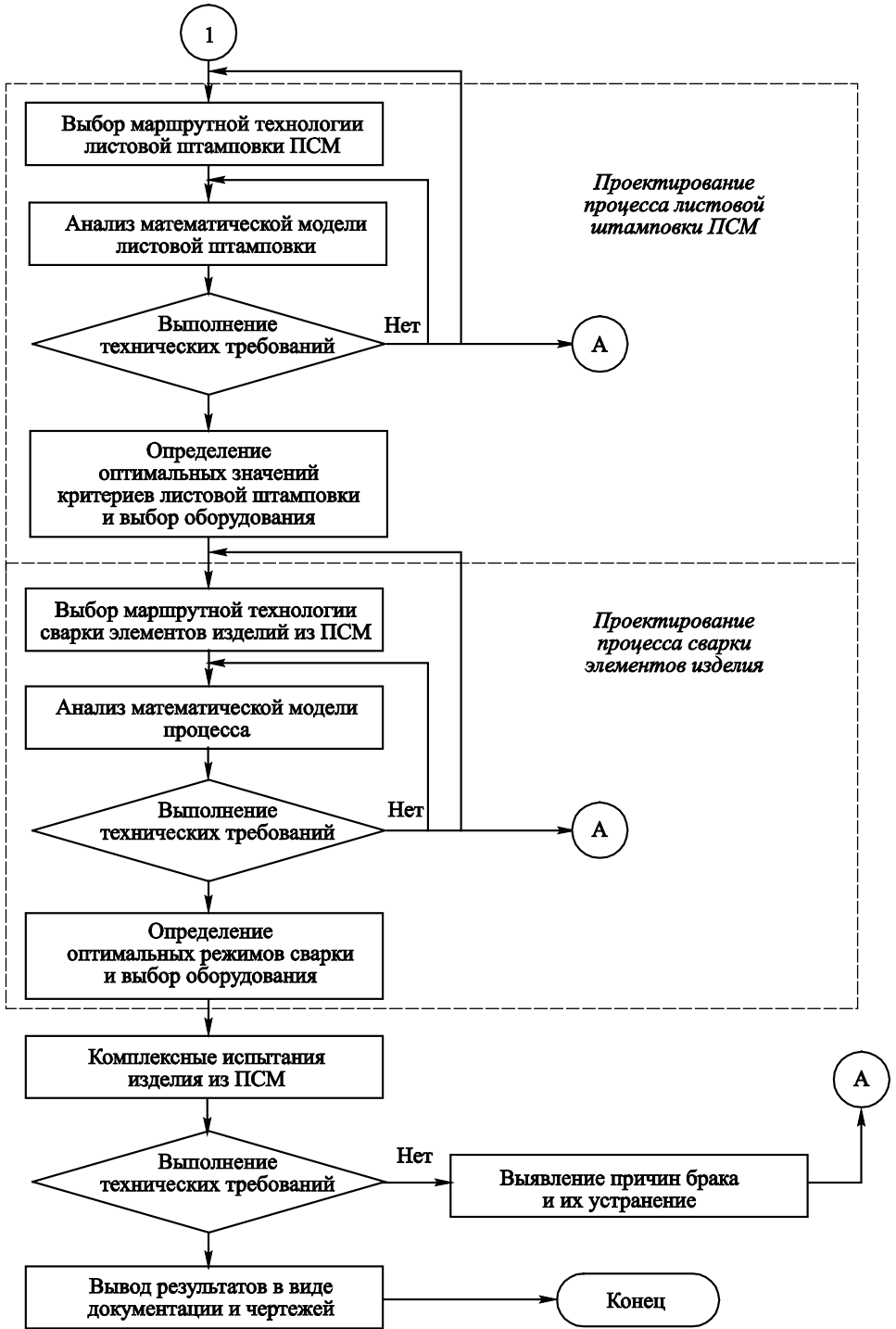


Рис. 1 (окончание). Блок-схема процесса проектирования технологии изготовления штампованных изделий из ПСМ с заданными свойствами

С этой целью определяют диапазоны возможного варьирования управляющих параметров и вычисляют предельные значения параметров материала. Кроме того, проводят дополнительные исследования для определения недостающих функциональных зависимостей. Если установлена возможность применения ПСМ для создания конструкций с заданными свойствами, выбирают маршрутную технологию изготовления листового ПМ. Затем с использованием априорной информации определяют марку материала проволок сеток, методы уплотнения брикета сеток и консолидации проволок при получении ПСМ.

На третьем этапе проектирования определяют оптимальные значения конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих получение ПСМ с заданными свойствами. Для этого в установленных диапазонах изменения управляющих параметров вычисляют значения соответствующих характеристик материала и проверяют, выполняется ли условие работоспособности. Когда не удается получить решения, удовлетворяющие техническим требованиям, корректируют маршрутную технологию. Если же и этого недостаточно, уточняют технические требования на ПМ.

При наличии нескольких вариантов технологических решений, обеспечивающих изготовление ПСМ с заданным комплексом свойств, оптимальные значения параметров определяют исходя из максимального значения целевой функции, в качестве которой принимают межслойную прочность проектируемого материала [9]. Затем по результатам вычислений выбирают технологическое оборудование и оснастку. Если существующие средства технологического оснащения не удовлетворяют предъявленным требованиям, необходимо создавать специализированные оборудование и оснастку.

Следующие функциональные звенья единого процесса оптимального проектирования изделия — формоизменение листовой заготовки и сварка элементов конструкции. На этих этапах проектирования, как и при создании листового ПСМ, устанавливают маршрутную технологию, вычисляют значения параметров листовой штамповки и сварки путем анализа соответствующих математических моделей и проверки выполнения условия работоспособности. Когда не удается получить приемлемое решение, изменяют схемы деформирования, вид сварки элементов конструкции или корректируют чертеж конструкции (изделия).

Определение оптимальных параметров листовой штамповки и режима сварки, окончательно формирующих свойства и геометрические параметры изделий, выбор оборудования, проектирование инструмента, выпуск чертежей и технической документации являются необходимыми этапами проектирования технологического процесса. Основным критерий его оптимальности — соответствие свойств и

размеров изготовленного изделия техническому заданию. Если погрешности превышают допустимые значения, то могут быть уточнены или пересмотрены все этапы проектирования.

Разработанная методика была реализована при создании штамповарных фильтров, обеспечивающих требуемую тонкость очистки рабочих сред от механических загрязнений при заданных гидравлических и прочностных характеристиках.

Проектирование технологии изготовления штамповарных фильтров. Анализ различных конструктивных схем фильтров позволил установить, что их принципиальное различие состоит в конфигурации фильтрующих элементов, которые выполняются в форме цилиндров, конусов и т. п. Основная задача при проектировании и изготовлении фильтров — обеспечить требуемую конфигурацию и массу фильтра при максимальной площади фильтрации и заданной тонкости очистки жидкости или газа от механических загрязнений. Эта задача может быть решена путем применения ПМ, обладающих не только необходимыми проницаемостью и тонкостью очистки, но и высокими значениями технологических характеристик. Причем ПМ, обеспечивающие высокую тонкость очистки рабочей среды, как правило, обладают низкой проницаемостью. По этой причине в процессе проектирования в качестве основного показателя принята номинальная тонкость очистки $a_{\text{ном}}$ [2].

Исследования номинальной тонкости очистки и проницаемости ПСМ показали, что при равных значениях пористости Π и диаметра проволок сеток более высокими значениями гидравлических характеристик обладают проницаемые элементы на основе сеток с квадратными ячейками. Увеличение в процессе сварки относительного обжатия ϵ брикета сеток приводит к уменьшению среднего размера пор $\delta_{\text{ср}}$, пористости Π и коэффициента проницаемости $K_{\text{п}}$ ПСМ.

Анализ большого количества экспериментальных данных по тонкости очистки позволил установить, что значение $a_{\text{ном}}$ может быть определено по формуле

$$a_{\text{ном}} = \frac{\delta_{\text{ср}}}{2}.$$

Средний размер пор и значение коэффициента проницаемости ПСМ были найдены по уравнениям, приведенным в работе [2]:

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

где $K_l = 0,84 - 0,69\Pi$; d — диаметр проволок сеток.

Пористость ПСМ на основе сеток с квадратными ячейками (ГОСТ 6613–86), расположенных в брикете под углом 45° , в зависимости от значения ε в процессе консолидации проволок сеток определяется следующим выражением [11]:

$$\Pi = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^n (1 - \Pi_{ci}) h_{ci}}{\left[h_{c1} + h_{cn} + \sum_{i=1}^{n-1} (h_{ci} + h_{c(i+1)}) \right] (1 - \varepsilon)},$$

где Π_{ci} — пористость i -го слоя сетки, значение которой определяется по данным из работы [2]; n — число слоев сеток в ПСМ; h_{c1} , h_{ci} , $h_{c(i+1)}$, h_{cn} — толщина 1-го, i -го, $(i + 1)$ -го и n -го слоя сетки соответственно.

Удельная проницаемость пористого элемента толщиной h_{Π} при перепаде давления Δp на нем фильтруемой среды с динамической вязкостью μ описывается уравнением Дарси:

$$q = \frac{K_{\Pi} \Delta p}{h_{\Pi} \mu}.$$

Для защиты жизненно важных агрегатов от таких загрязнений, как стружка, окалина, продукты разрушений, используют фильтры, способные предотвращать внезапный отказ установки. Обычно такие фильтры представляют собой цилиндрический или конический каркас с отверстиями, к которому крепится слой или несколько слоев сеток, обеспечивающих требуемую тонкость очистки. К существенным недостаткам рассматриваемых конструкций относятся низкая сопротивляемость сеток прорыву инородным телом, невысокое сопротивление усталости и недостаточная технологичность.

Анализ различных путей устранения перечисленных недостатков показал, что наиболее эффективными конструктивными решениями являются бескаркасные фильтры на основе ПСМ. Установлено, что для повышения прочности и жесткости проницаемых элементов целесообразно использовать при их изготовлении наряду с сетками, обеспечивающими требуемую тонкость очистки, один или два слоя крупных сеток с диаметром проволок $d = 0,1 \dots 0,4$ мм.

Разработанная методика проектирования штамповарных конструкций из ПМ, а также результаты выполненных исследований были использованы при создании нескольких типоразмеров фильтров, предназначенных для того, чтобы предотвращать попадание механических частиц размером $80 \dots 300$ мкм в полости изделий в процессе

их эксплуатации. Расход газообразных и жидких рабочих сред составлял 0,1...1,2 кг/с при $\Delta p < 0,14$ МПа. Анализ условий эксплуатации показал, что требованиям технического задания отвечают ПСМ из стали 12Х18Н10Т, полученные сваркой давлением брикета сеток с размером ячеек $a = 1; 0,16; 0,071$ мм в различных сочетаниях. Конструкция брикета сеток при их взаимном расположении под углом $\beta = 45^\circ$, величина их относительного обжатия ϵ в процессе консолидации и свойства ПСМ приведены в таблице.

Конструкция брикета сеток и свойства заготовок для фильтроэлементов на основе ПСМ

Типоразмер сеток с квадратными ячейками и последовательность их расположения	Относительное обжатие брикета сеток ϵ	Толщина ПСМ $h_{п}$, мм	Пористость П	Номинальная толщина очистки $a_{ном}$, мкм, не более
016 + 016	0,4	0,22	0,52	100
016 + 0071 + 016	0,4	0,30	0,53	80
1 + 016 + 0071 + 016	0,4	0,80	0,67	80
1 + 1 + 1	0,45	1,30	0,71	300

Для увеличения площади поверхности фильтрации и повышения жесткости проницаемой оболочки при заданных размерах трубопроводов проницаемые элементы изготовляли в виде полусфер диаметром 8...100 мм путем вытяжки в штампе.

Пористые материалы являются сжимаемыми, поэтому для изготовления оболочек требуемый диаметр плоской заготовки $D_{заг}$ зависит не только от степени вытяжки при листовой штамповке, но и от пористости. В связи с этим алгоритм расчета $D_{заг}$ предполагает наличие зависимости диаметра заготовки от пористости и условной степени вытяжки K_y :

$$D_{заг} = d_0 \left[PK_y + (1 + \Pi) \sqrt{2K_y - 1} \right].$$

Значение K_y определяли как отношение длины образующей сферической оболочки к ее диаметру d_0 . При этом условная степень вытяжки не должна превышать предельного значения, которое определяется из эмпирического выражения как функция пористости:

$$K_{пр} = 0,08\Pi^{0,3} + 1,55.$$

Результаты исследований при создании более 20 типоразмеров бескаркасных фильтров. Штамповочной фильтр, приведенный на рис. 2, состоит из сферического фильтроэлемента с фланцем, корпуса и штуцера из стали 12Х18Н10Т, которые соединены диффузионной

сваркой на установке СДВУ. Исследования сварного соединения показали, что диффузионная сварка позволяет получить необходимые прочность и герметичность.

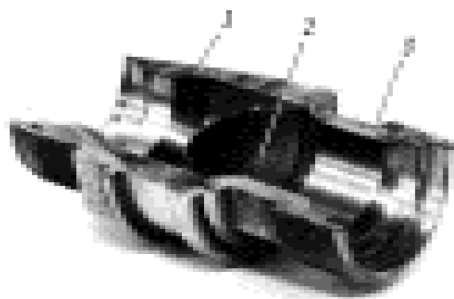


Рис. 2. Штамповварной фильтр со сферическим фильтроэлементом:
1 — корпус; 2 — фильтроэлемент;
3 — штуцер

Стендовые испытания показали, что изготовленный штамповварной фильтр обеспечивает требуемую тонкость очистки ($a_{\text{ном}} = 70$ мкм) при максимальной площади фильтрации и заданных расходных характеристиках фильтруемой среды.

Выводы. Создать штамповварные изделия из ПМ с заданными характеристиками можно только на основе системного подхода, при котором устанавливаются зависимости, описывающие влияние параметров технологических процессов изготовления листовых ПСМ, их штамповки и сварки элементов конструкций на свойства, а также оптимизируются значения управляющих параметров этих процессов путем математического моделирования.

Выполненные исследования позволили установить, что необходимыми свойствами для изготовления бескаркасных штамповварных фильтров, обеспечивающих номинальную тонкость очистки не более 80 мкм, обладают ПСМ на основе трех слоев сеток с квадратными ячейками (016 + 0071 + 016) из стали 12Х18Н10Т, расположенных под углом 45° , после относительного обжатия $\varepsilon = 0,3$ в процессе их консолидации.

Результаты стендовых испытаний изготовленных фильтров показали, что они обеспечивают номинальную тонкость очистки фильтруемой среды от механических загрязнений, равную 70 мкм.

Таким образом, экспериментально доказана правомерность разработанной методики и выполненных расчетов при проектировании технологических процессов изготовления изделий из ПМ с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пелевин Ф.В. Технология изготовления пористых материалов. *Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса*, 2007, № 3, с. 46–51.
- [2] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 338 с.
- [3] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier, 2013, 444 p.
- [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. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/698.html> (дата обращения 20.03.2016).
- [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*. Москва, Препринт, ОИВТ РАН, 2010, № 2-502, 64 с.
- [7] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [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. Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/msm/smme/1498.html>
- [10] Дальский А.М., ред. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве*. Москва, Изд-во МАИ, 2000, 354 с.
- [11] 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.
- [12] 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 06.12.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Методика проектирования технологических процессов изготовления изделий из пористых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-02-1588>

Третьяков Анатолий Федорович родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 публикаций. Область научных интересов — создание изделий на основе проектируемых материалов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmsu.ru

Design technique of manufacturing process of porous material products with desired properties

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Metallic porous materials are notable for various types of structure-forming elements and processes of their manufacture. The technology created for manufacturing products with desired properties is based on the phenomenon of technological heredity. The principle of modeling the porous structures lies in the fact that a complex real object is replaced by a geometric model, available for mathematical modeling. We give a block scheme of design technique of manufacturing processes of stamp-welded porous material products with desired properties. The developed method was implemented when creating filters with frameless spherical filtering elements made of porous mesh materials for the purification of liquids and gases from mechanical impurities. The paper gives the test bench results of manufactured stamp-welded filters that provide the required fineness of purification at a maximum filtration area and specified flow rate characteristics of the medium being filtered.

Keywords: metal porous mesh materials, woven wire mesh, manufacturing process design, technological heredity, porous structure modeling, stamp-welded product, filter, filtering elements, nominal fineness of purification

REFERENCES

- [1] Pelevin F.V. *Vestnik assotsiatsii vuzov turizma i servisa — Universities for Tourism and Service Association Bulletin*, 2007, no. 3, pp. 46–51.
- [2] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy. Spravochnik*. [Porous permeable materials. Manual]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [3] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier Publ., 2013, 444 p.
- [4] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 4. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/698.html> (March 20, 2016).
- [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., Stratev V.K., Tretyakov A.F., Shekhter Yu.L. *Ispytaniya poristogo setchatogo materiala v kachestve obolochki lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin* [Testing of porous mesh material as coating for high temperature gas turbine blades]. Moscow, Preprint, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2010, no. 2-502, 64 p.
- [7] Bunker R.S. Gas turbine cooling. Moving from macro to micro cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013, 3 p.
- [8] Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. *Bezopasnost zhiznedeятelnosti — Life Safety*, 2005, no. 11, pp. 53–56.
- [9] Tretyakov A.F. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 6. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/msm/smme/1498.html>
- [10] Dalskiy A.M., ed. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Technological heredity in machine building production]. Moscow, MAI Publ., 2000, 354 p.

- [11] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Manufacture of rolled products*, 2013, no. 5, pp. 32–42.
- [12] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata — Manufacture of rolled products*, 2013, no. 6, pp. 29–34.

Tretyakov A.F. (b. 1945) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Dr. Sc. (Eng.), Professor. Author of over 150 research publications. Research interests include creating products based on the designed materials with a given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru