

## **Практическое использование результатов исследований технологических процессов формирования твердофазных соединений проволок в контролируемой газовой среде при создании листовых пористых сетчатых материалов с заданными свойствами**

© А.Ф. Третьяков

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

*Специфическими особенностями структурообразующих элементов, применяемых для изготовления пористых сетчатых материалов, являются высокая удельная поверхность и сложная конфигурация тканых сеток, что исключает возможность использования обработки резанием проволок под сварку. Показано, что эффективный способ удаления минеральных масел, парафинов, жиров и некоторых других загрязнений с поверхности сеток — очистка в стабильном, негорючем и невзрывоопасном растворителе «Фреон-113», поскольку он не взаимодействует с материалом заготовки. Кроме того, можно повысить качество очистки сеток наложением ультразвуковых колебаний в диапазоне 20...40 кГц. Приведены схемы технологических маршрутов изготовления пористых материалов сваркой давлением тканых сеток из стали марки 12X18H10T и титанового сплава марки ВТ2. Установлено, что сварка прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток из стали 12X18H10T позволяет получать пористые элементы, обладающие достаточно высокими механическими и технологическими свойствами. Существенное преимущество этого процесса заключается в том, что его можно реализовать на любом листопрокатном стане. Приведены режимы сварки прокаткой и диффузионной сварки сеток при изготовлении пористых материалов. Представлена разработанная математическая модель, позволяющая прогнозировать предельную межслойную прочность при заданных значениях технологических параметров процессов изготовления листовых заготовок. Предложено выполнять контроль межслойной прочности путем сопоставления расчетных данных и результатов испытания образцов на отрыв в соответствии с разработанной методикой. Установлено, что контроль прочности, пластичности в плоскости листа и анизотропии целесообразно оценивать сравнением расчетных данных и результатов испытания образцов в условиях двухосного растяжения, реализуемого при гидростатическом вытучивании через круглую матрицу.*

**Ключевые слова:** пористый сетчатый материал, фреон, твердофазное соединение, сварка, прокатный стан, пористость, размер пор, проницаемость, прочность, пластичность, контроль качества

**Введение.** Проведенный анализ процессов формирования фактической площади контакта (ФПК) [1], активации и объемного взаимодействия в зоне макроконтakta [2–4] позволил установить, что повышение стабильности и прочности сварных соединений проволок при получении пористых сетчатых материалов (ПСМ) может быть достигнуто в результате:

– химической очистки проволок сеток от оксидных пленок;

– установления оптимальной температуры и скорости деформации перекрестий проволок сеток при достижении заданной величины относительного обжатия брикета;

– создания условий удаления оксидных слоев путем выбора среды и температуры нагрева при сварке в соответствии со свойствами и диаметром проволок.

Атомы, ионы или молекулы, расположенные на поверхности, вследствие асимметрии молекулярного взаимодействия обладают некоторым избытком поверхностной энергии. Создаваемое ими силовое поле, имеющее электромагнитную природу, обладает высокой адсорбционной способностью. Поэтому поверхности твердых тел, как правило, покрыты не только адсорбированными слоями и оксидами, но и органическими пленками и молекулами воды.

Специфическими особенностями структурообразующих элементов, которые применяют для изготовления ПСМ, являются высокая удельная поверхность и сложная конфигурация брикета сеток, что исключает возможность использования обработки резанием проволок под сварку. Нагрев заготовок в контролируемой среде без предварительного удаления органических соединений приводит к тому, что продукты их разложения существенным образом изменяют состав и давление среды между сетками. Кроме того, механические частицы, находящиеся или образующиеся в процессе разложения углеводородов, препятствуют образованию твердофазных соединений проволок.

Технологические загрязнения представляют собой пленки органического и неорганического происхождения, которые появляются в процессе волочения проволок и последующего их переплетения. Выбор состава растворителя и способа очистки в основном определяется химическим составом и дисперсностью загрязнений. Удаление жиров с поверхности осуществляют с помощью веществ (детергентов), представляющих собой растворы щелочей и солей щелочных металлов с добавлением поверхностно-активных веществ. При взаимодействии жиров с щелочами происходит их омыление с образованием растворимого мыла. Эффективность процесса очистки возрастает с повышением температуры.

Цель работы — разработка технологии очистки сеток от органических пленок, определение режимов сварки давлением брикета сеток при изготовлении листовых ПСМ с заданными свойствами и методов контроля качества полученных изделий.

**Экспериментальные исследования и анализ полученных результатов.** Проведенные экспериментальные исследования по очистке сеток от органических загрязнений в щелочных растворах (пасты «Триалон», «Диталин») показали, что они являются малоэффективны-

ми даже при нагреве, поскольку проволоки покрыты минеральным маслом, с которым они не реагируют.

Эффективный способ удаления минеральных масел, парафинов, жиров, краски и некоторых других загрязнений — очистка в органических растворителях [5], к наиболее распространенным относятся хлорированные углеводороды (трихлорэтилен, трихлорбензол, фреоны, четыреххлористый углерод). Среди них оптимальными растворителями являются фреоны, поскольку они стабильны, негорючи, невзрывоопасны и не взаимодействуют с материалом заготовки [6].

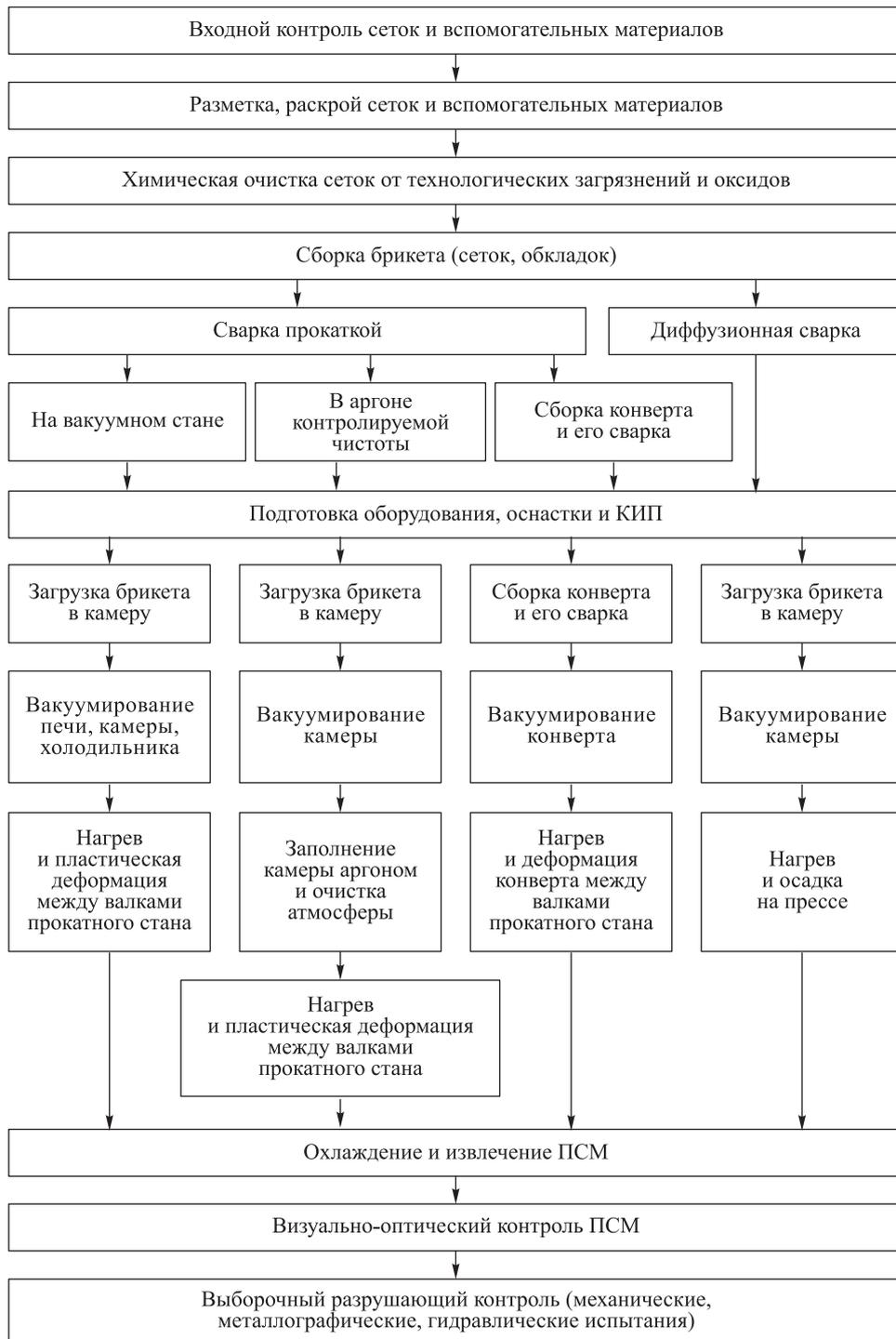
Повышение качества и производительности очистки сеток достигается путем наложения ультразвуковых колебаний, в результате чего происходит измельчение загрязнений. Кроме кавитационного диспергирования загрязнений, на качество очистки оказывает влияние акустическое течение жидкости, представляющее собой вихревые потоки на границе раздела жидкость — твердое тело. Высокий уровень возбуждения жидкости в пограничном слое повышает химическую активность растворителя, уменьшает толщину слоя, образованного продуктами реакции, а также при этом имеет место наиболее благоприятный диапазон частот — 20...40 кГц [7].

Существенным преимуществом ультразвуковой очистки сеток является возможность удаления разного рода пленок и механических загрязнений из пор, размеры которых могут составлять несколько микрометров. Поэтому для повышения эффективности очистки сеток от органических пленок и механических загрязнений рекомендовано применять обработку во фреоне-113 путем наложения ультразвуковых колебаний в диапазоне частот 20...40 кГц.

**Разработка технологических процессов изготовления листовых ПСМ.** Результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований влияния конструктивных и технологических параметров на физико-химические процессы при сварке давлением проволок и свойства образованных соединений использованы при создании технологии изготовления ПСМ. Качество получаемых пористых элементов может быть обеспечено при выполнении следующих условий:

- применение исходных материалов (сеток, обкладок), отвечающих предъявленным к ним требованиям;
- надежное функционирование оборудования, оснастки и контрольно-измерительных приборов (КИП);
- строгое выполнение разработанного технологического процесса рабочими-операторами соответствующей квалификации.

Схема возможных технологических маршрутов при изготовлении листовых ПСМ сваркой давлением и контроля качества приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема технологических маршрутов изготовления листовых ПСМ сваркой давлением и контроля качества

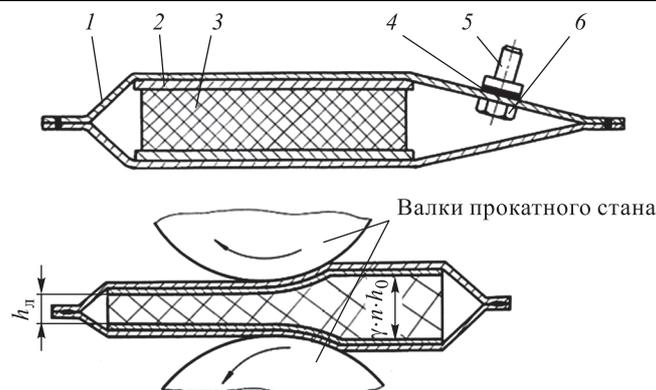
Технологические процессы изготовления пористых элементов начинаются с входного контроля конструктивных параметров сеток, который предполагает определение типа их плетения, измерение диаметра проволок и расстояния между ними. В том случае, если отсутствуют гарантии изготовителей или качество исходных материалов внушает опасение, необходимо дополнительно определить химический состав проволок и листового материала, предназначенного для изготовления обкладок и оболочек (для сварки прокаткой в вакуумированных конвертах).

После разметки, раскроя сетки и листовых вспомогательных материалов на заготовки, размеры и количество которых определяются требованиями технического задания, выполняют подготовку поверхности путем ультразвуковой очистки во фреоне-113. Кроме того, в зависимости от свойств материала проволок, технологической схемы сварки сеток и имеющегося оборудования проводят химическую очистку сеток из стали марки 12X18H10T в смеси  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , KF, а из титанового сплава BT2 — в комплексе ИСБ-М [2]. Требуемая конструкция брикета обеспечивается путем сборки заданного типоразмера сеток, количества, их взаимного расположения и закрепления с помощью обкладок, предотвращающих схватывание проволок с валками прокатного стана или с оболочкой при сварке прокаткой в вакуумированном конверте.

Физическое моделирование процесса сварки сеток на перекрестиях проволок позволило установить, что качество твердофазных соединений, полученных диффузионной сваркой, выше, чем при сварке прокаткой. Однако в том случае, когда необходимо получение листовых пористых элементов значительных размеров, применение прокатных станов является более рациональным, а при больших обжатиях брикета сеток и малых допусках по толщине ПСМ — единственно возможным.

Сварка прокаткой брикета сеток в зависимости от химического состава материала проволок и имеющегося на предприятии оборудования может быть реализована по трем технологическим схемам: на вакуумном прокатном стане, прокаткой в среде аргона контролируемой чистоты и в вакуумированном конверте (рис. 2).

Вакуумные станы, относящиеся к типу «валки — камера», позволяют вести нагрев, прокатку и охлаждение заготовок при степени разряжения  $1 \times 10^{-2}$  Па [8], что дает возможность применять их для сварки сеток из титановых сплавов при получении пористых элементов. Технология получения ПСМ на вакуумном стане заключается в том, что после достижения в камерах заданного вакуума и необходимой температуры в печи брикет сеток из загрузочной камеры с помощью манипулятора и подвижного стола подают в нагревательное устройство, где выдерживают его в течение 5...10 мин.



**Рис. 2.** Схема изготовления ПСМ сваркой прокаткой в вакуумированном конверте:

1 — конверт; 2 — обкладки из жаропрочной стали; 3 — брикет сеток;  
4 — резиновая шайба; 5 — штуцер; 6 — гайка

Затем заготовки поступают во вращающиеся валки, между которыми в процессе обжатия брикета сеток происходит сварка проволок в местах их совместной пластической деформации. После этого пористые элементы с помощью манипулятора помещают в холодильник, затем остывшие заготовки извлекают из камеры и подвергают контролю.

Сварку прокаткой в среде аргона контролируемой чистоты осуществляли в установке «Атмосфера-1», снабженной реверсивным станом ДУ0-90 [9]. Камеру предварительно вакуумируют до степени разряжения 1 Па, после чего ее заполняют аргоном. Система химической очистки обеспечивает удаление пыли, влаги, паров масла и посторонних газовых примесей, при этом атмосфера камеры непрерывно контролируется с помощью масс-спектрометра. Для нагрева заготовок используют индукционное электронагревательное устройство, установленное рядом с рабочей клетью стана. Обслуживающий персонал в специальных скафандрах выполняет все операции по загрузке заготовок, нагреву и прокатке. Для рассмотренных технологических процессов, обладающих рядом преимуществ, требуется применять дорогостоящее уникальное оборудование, которое целесообразно использовать только при получении ПСМ на основе химически активных металлов, таких как титан.

Сварка прокаткой в вакуумированном конверте брикета сеток из стали марки 12X18H10T позволяет, как показано в работе [10], получать листовые ПСМ, обладающие достаточно высокими механическими и технологическими свойствами. Существенным преимуществом этого процесса является возможность реализации на любом листопрокатном стане. Получение ПСМ в вакуумированном конверте (см. рис. 2) заключается в том, что брикеты сеток с обкладками

помещают в оболочки из листовой малоуглеродистой стали или стали марки 12X18H10T, которые вакуумируют, заваривают и нагревают в печи, расположенной рядом с рабочей клетью стана, а затем деформируют между валками до заданной толщины. После охлаждения конверт вскрывают на ножницах и извлекают полученный ПСМ.

Изготавливать пористые элементы диффузионной сваркой можно на стандартном оборудовании (СДВУ-2). Нагрев брикета осуществляют в индукторе, а требуемую величину относительного обжаривания обеспечивают путем осадки, при этом ход пуансона ограничивают применением специальной оснастки. Рекомендуемые режимы сварки давлением брикета сеток при получении пористых элементов приведены в таблице.

**Режимы сварки давлением брикета сеток при получении пористых сетчатых материалов**

Марка материала проволоки сеток	Химическая очистка		Способ сварки	Технологическая схема сварки	Параметры режима			
	технологических загрязнений	оксидных пленок			Глубина вакуума, Па	Температура, К	Время, мин	Скорость деформирования перекрестий проволоки, 1/с
12X18H10T		Травление в смеси HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> и KF	Сварка прокаткой	В вакуумированных конвертах	Не ниже 1	1450...1470	–	Выше 1
			Диффузионная сварка	Индукционный нагрев и осадка на прессе в вакуумной камере	Не ниже 10 <sup>-2</sup>	1370...1420	15...20	Не выше 10 <sup>-4</sup>
BT2	Ультразвуковая очистка во фреоне-113	Травление в комплексе ИСБ-М (М4-3) C = 0,2... 0,4 моль/л при T = 370K	Сварка прокаткой	На вакуумном стане	Не ниже 10 <sup>-2</sup>	1170...1200	–	Выше 1
				В аргоне контролируемой чистоты	O <sub>2</sub> — 0,001 % H <sub>2</sub> — 0,005 % N <sub>2</sub> — 0,01 % H <sub>2</sub> O — 0,005 %			
			Диффузионная сварка	Индукционный нагрев и осадка на прессе в вакуумной камере	Не ниже 10 <sup>-2</sup>	1170...1200	15...20	Не ниже 10 <sup>-4</sup>

**Контроль качества изготовленных листовых пористых сетчатых материалов.** Весь технологический процесс изготовления ПСМ может быть рассмотрен с позиций технологической наслед-

ственности. Эта задача является весьма сложной, поскольку предстоит по выходным параметрам детали провести анализ фактических данных. Например, по отклонениям толщины, проницаемости или прочности пористых заготовок необходимо определить, на каком этапе технологического процесса было допущено нарушение режимов.

При выборе методов и средств контроля качества получаемых ПСМ необходимо иметь четкое представление о показателях качества, характере дефектов и причинах их появления. Основными показателями качества получаемых элементов являются пористость, размер пор, коэффициент проницаемости, межслойная прочность, предел прочности, относительное удлинение (после разрыва), анизотропия механических свойств в условиях двухосного растяжения, толщина материала и др. Наиболее характерными дефектами ПСМ могут быть расслоение, складки сеток, вмятины, а также несоответствия показателей качества листовых изделий техническим требованиям.

Расслоение ПСМ может быть вызвано нарушением технологии их изготовления, а именно: недостаточной глубиной вакуума или повышенным содержанием кислорода в аргоне, некачественной очисткой сеток от технологических загрязнений, низкой температурой процесса, а также отсутствием совместной пластической деформации проволок при обжати брикета сеток. Складки сеток могут образовываться в результате неправильной сборки сеток, а вмятины на поверхности листовых ПСМ — главным образом, вследствие попадания окалины на валки при горячей прокатке.

Поскольку величины пористости, размера пор и проницаемости при заданных условиях фильтрации определяются конструктивными параметрами брикета сеток и величиной их относительного обжатия, несоответствие значений этих характеристик у изготовленных изделий расчетным значениям объясняется ошибками на этапах сборки сеток в брикет и его деформации в процессе сварки.

Механические характеристики ПСМ определяются свойствами материала проволок, их количеством, взаимным расположением и качеством сварных соединений между ними. Поэтому более низкие значения этих характеристик вызваны нарушением технологии очистки, сборки брикета сеток и их сварки. Толщина ПСМ, которая оказывает существенное влияние на величины проницаемости и предела прочности, определяется конструкцией брикета сеток и значением относительной деформации брикета сеток при консолидации проволок в процессе сварки.

Анализ приведенных выше наследственных связей позволяет корректировать технологический процесс получения листовых пористых материалов и определять основные операции, которые оказывают наиболее существенное влияние на качество получаемых изделий. Кроме того, приведенные примеры наглядно иллюстрируют

наследование дефектов при выполнении технологических операций изготовления листовых ПСМ с заданными свойствами, поэтому для изготовления качественных ПСМ необходимо осуществлять контроль управляющих параметров на стадии каждой технологической операции.

Организация контроля при изготовлении пористых элементов сваркой давлением должна включать следующие этапы: проверка документации на стадии проектирования технологии (выбор материала проволок, типоразмера сеток, их взаимного расположения, способ подготовки и сварки сеток); контроль технологии изготовления (состояние оборудования, оснастки, контрольно-измерительных приборов, соблюдение режимов подготовки сеток, их сборки, сварки и квалификации операторов); контроль получаемых листовых ПСМ с заданными свойствами, который предполагает рациональное использование неразрушающих и разрушающих методов.

Визуально-оптический контроль следует применять в трех вариантах: внешний осмотр пористых элементов и их замеры; осмотр с помощью оптических приборов (измерительных микроскопов, обзорных луп и т. п.); активный контроль технологии изготовления ПСМ. Своевременное устранение дефектов, выявленных внешним осмотром, и выяснение причин их появления позволяют оперативно управлять качеством изделий и уменьшать объем последующих этапов контроля. При внешнем осмотре необходимо применять универсальные измерительные микроскопы, обзорные, бинокулярные и налобные лупы, микрометры, металлические линейки, шаблоны и эталоны.

Пористые металлы характеризуются рядом параметров, каждый из которых в отдельности не дает полного представления о свойствах пористого тела. К параметрам, определяющих пористую среду, относятся: пористость, ее распределение по объему и вид (открытая, тупиковая и закрытая); проницаемость и ее распределение по площади фильтрации пористого тела; размеры пор; механические свойства и другие характеристики. Особенности структуры элементов, получаемых сваркой давлением брикета сеток, являются наличие пористости, сквозных пор сложной конфигурации, значительного количества проволок и контактов между ними с определенным законом их взаимного расположения.

Пористостью называется отношение объема пустот в материале к его полному объему. Для экспериментального определения пористости проницаемых материалов и изделий необходимо использовать рекомендации ГОСТ 25281–82, а также способы, приведенные в работе [11]. Выполненные исследования показали, что закрытые и тупиковые поры в ПСМ практически отсутствуют при общей пористости более 0,1. Выполненные в работе [12] теоретические исследования

позволили получить математические модели, описывающие влияние типоразмера сеток, их взаимного расположения и относительного обжата в процессе сварки прокаткой на величину пористости ПСМ.

Экспериментальные исследования пористости, определяемой по плотности пористого тела [11], показали адекватность предложенной модели расчета пористости по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости, поэтому она может быть использована при оценке качества листовых ПСМ.

Исследование равномерности распределения пористости по площади фильтрации, выполненные методом вырезки образцов, показало, что локальная пористость зависит от числа слоев сеток и значения относительного обжата брикета при прокатке. Увеличение сеток от 3 до 12 во всех случаях повышает равномерность распределения пористости по площади листа, а повышение относительного обжата брикета сеток при прокатке нарушает равномерность распределения пористости.

Практически все поры имеют свою форму и существенно различаются размерами. Для характеристики пор в проницаемых изделиях обычно используют распределение их по размерам, а также значения максимального и среднего размера пор. Максимальные поры играют существенную роль, особенно для пористых фильтров, так как определяют максимальные размеры частиц загрязнителя, которые практически могут пройти через фильтр. Средние размеры пор обычно используют как характеристики материалов для их сравнения, а также как определяющий размер при обработке опытных данных по гидравлическому сопротивлению пористой среды в критериальной форме.

Распределение пор по размерам дает представление о числе или объеме пор каждой величины и о диапазоне изменения размеров пор в пористом материале. Однако трудоемкость процесса и сложность оборудования ограничивают применение такого метода, поэтому отдают предпочтение методу с использованием данных о максимальном и среднем размерах пор.

Из всех рассматриваемых параметров, используемых в качестве определяющего размера пор в проницаемых изделиях, средний размер пор является единственным, который можно определить без использования расходных характеристик пористой среды. Наиболее распространенный метод определения размера пор в диапазоне от 1,0 до 300 мкм основан на использовании сил капиллярного взаимодействия [11] при вытеснении жидкости. Значение среднего размера пор в зависимости от диаметра проволок сеток в ПСМ и величины пористости удовлетворительно описывается также зависимостью, приведенной в работе [11].

Средний размер пор и пористость являются самыми распространенными характеристиками пористой среды, и почти всегда их определяют экспериментально перед проведением гидравлических испытаний.

Проницаемость — свойство пористого материала пропускать жидкость или газ под действием приложенного градиента давления. Это свойство материала характеризуется коэффициентом проницаемости, обусловленным структурными характеристиками пористого тела [13]. Для сравнения проницаемости пористых изделий можно использовать значение расхода газа или жидкости в единицу времени через единицу площади фильтрации. Удельный объемный расход, численно равный скорости фильтрации, определяется для ПСМ по формуле, приведенной в [13].

Для оценки эксплуатационных свойств пористых материалов важно знать значение локальной проницаемости отдельных участков площади фильтрации. Равномерность распределения проницаемости зависит главным образом от равномерности распределения пористости, которая в основном и определяет ее при постоянном градиенте давления.

Равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации определяют различными способами. Простейший заключается в том, что из отдельных участков пористого листа вырезают контрольные образцы и продувают или проливают их при одинаковых перепадах давления. Можно также применять специальные приспособления, позволяющие измерять расход жидкости или газов на отдельных участках образца. Кроме того, можно и непосредственно измерять термоанемометром локальную скорость фильтрации на выходе из пористого образца.

Все рассмотренные способы определения неравномерности проницаемости не отличаются высокой точностью и дают лишь приближенное представление о возможных отклонениях проницаемости по площади фильтрации. Поскольку для оценки качества сварных соединений структурообразующих элементов в ПСМ применять радиационный и ультразвуковой методы контроля неэффективно, принято проводить металлографические исследования, испытания на межслойную прочность и прочность при одноосном и двухосном растяжении для оценки анизотропии механических свойств. Металлографические исследования макроструктуры ПСМ позволяют обеспечить контроль типоразмера используемых сеток, их количества, взаимного расположения и величины обжатия брикета сеток. По микрошлифам можно оценить структуру проволок после термомодеформационного воздействия и полноту образования твердофазного соединения между ними.

На основе установленного механизма пластической деформации структурообразующих элементов ПСМ разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать предельную межслойную прочность в зависимости от конструкции брикета сеток и значений технологических параметров процессов изготовления листовых заготовок. Для контроля межслойной прочности полученных пористых материалов выполняют испытание на отрыв по методике, приведенной в [14].

Механические свойства ПСМ в плоскости листа были исследованы в условиях одноосного и двухосного растяжения [15, 16]. Были получены аналитические зависимости, с помощью которых появилась возможность определять параметры технологических процессов изготовления листовых пористых заготовок с заданными свойствами. Контроль качества ПСМ в условиях одноосного растяжения проводили на образцах с параллельным и перпендикулярным расположением сеток. Образцы были вырезаны из листовых заготовок в направлении проволок сеток, их длина — 200 мм, ширина — 10...15 мм. В процессе растяжения образцов со скоростью 0,07...0,17 мм/с записывали машинную диаграмму растяжения [15].

Для контроля прочности и пластичности ПСМ, изготовленных с заданным расположением сеток, проводят испытание образцов в условиях двухосного растяжения при гидростатическом выпучивании через круглую матрицу [17]. В процессе испытания измеряют давление масла под образцом, радиусы кривизны и удлинение материала в направлении перпендикулярных осей в области вершины выпучивания.

Контроль прочности, пластичности ПСМ и их анизотропии выполняется путем сопоставления расчетных и экспериментальных значений давлений жидкости под образцом в момент разрушения [16].

**Заключение.** Нагрев заготовок в контролируемой среде без предварительного удаления органических соединений приводит к тому, что продукты их разложения существенным образом изменяют состав и давление среды между сетками. Кроме того, находящиеся или образующиеся в процессе разложения углеводородов механические частицы препятствуют образованию твердофазных соединений проволок.

Эффективный способ удаления минеральных масел, парафинов, жиров, краски и других загрязнений — очистка в органических растворителях. Фреоны являются оптимальными растворителями, поскольку они стабильны, негорючи, невзрывоопасны и не взаимодействуют с материалом заготовки.

Повышение качества и производительности очистки сеток достигается путем наложения ультразвуковых колебаний, в результате чего происходит измельчение загрязнений. Существенным преимуществом

такой очистки сеток является возможность удаления разных пленок и механических загрязнений из пор сеток, размеры которых могут составлять несколько микрон. Поэтому для повышения эффективности очистки сеток от органических пленок и механических загрязнений рекомендовано применять обработку во фреоне-113 путем наложения ультразвуковых колебаний в диапазоне частот 20...40 кГц.

Физическое моделирование процесса сварки сеток на перекрестиях проволок позволило установить, что качество полученных диффузионной сваркой твердофазных соединений выше, чем при сварке прокаткой. Однако когда необходимо получить листовые пористые элементы значительных размеров, применение прокатных станов является более рациональным, а при больших относительных обжатиях брикета сеток и малых допусках по толщине ПСМ — единственно возможным.

Сварка прокаткой брикета сеток в зависимости от химического состава материала проволок и имеющегося на предприятии оборудования может быть реализована по трем технологическим схемам: на вакуумном прокатном стане; при горячей прокатке в среде аргона контролируемой чистоты; в вакуумированном конверте.

Сварка прокаткой в вакуумированном конверте брикета сеток из стали марки 12Х18Н10Т позволяет получать пористые элементы, обладающие достаточно высокими механическими и технологическими свойствами. Существенное преимущество этого процесса заключается в том, что его можно проводить на любом листопрокатном стане.

Основными показателями качества получаемых элементов являются пористость, размер пор, коэффициент проницаемости, межслойная прочность, предел прочности, относительное удлинение (после разрыва), анизотропия механических свойств в условиях двухосного растяжения, толщина материала и др. Наиболее характерные дефекты ПСМ — расслоение, складки сеток, вмятины, а также несоответствие показателей качества листовых изделий техническим требованиям.

Исследование равномерности распределения пористости по площади фильтрации на образцах, вырезанных из листовых ПСМ, показало, что локальная пористость зависит от числа слоев исходных сеток и величины их относительного обжатия при прокатке. Увеличение числа слоев от 3 до 12 во всех случаях повышает равномерность распределения пористости по площади листа при относительном обжатии менее 0,6 брикета сеток в процессе горячей прокатки.

Поскольку для оценки качества сварных соединений структурообразующих элементов в ПСМ применять радиационный и ультразвуковой методы контроля неэффективно, принято проводить испытания на межслойную прочность. Разработана математическая модель,

позволяющая прогнозировать предельную межслойную прочность при заданных значениях технологических параметров процессов изготовления листовых заготовок. При контроле межслойной прочности проводится сопоставление расчетных данных и результатов испытания образцов на отрыв по разработанной методике.

Исследования механических свойств ПСМ в плоскости листа в условиях одноосного и двухосного растяжения позволили получить аналитические зависимости для определения параметров технологических процессов изготовления листовых пористых заготовок с заданными свойствами. Для контроля прочности, пластичности ПСМ и их анизотропии проводится сопоставление расчетных и экспериментальных значений давления жидкости под образцом, при котором происходит разрушение образца в условиях двухосного растяжения при гидростатическом выпучивания через круглую матрицу.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Третьяков А.Ф. Консолидация структурообразующих элементов в процессе горячей прокатки металлических сеток. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2016, № 1, с. 5–10.
- [2] Третьяков А.Ф. Влияние предварительной химической обработки на качество твердофазных сварных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2156>
- [3] Третьяков А.Ф. Образование сварных твердофазных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2181>
- [4] Третьяков А.Ф. Исследование влияния состава контролируемой газовой среды и температуры на качество твердофазных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2189>
- [5] Скворцов К.Ф. *Подготовка поверхностей деталей для нанесения покрытий*. Москва, Металлургия, 1980, с. 64.
- [6] Спринг С. *Очистка поверхностей металлов*. Москва, Мир, 1966, 247 с.
- [7] Розенберг Л.Д. *Физические основы ультразвуковой технологии*. Москва, Наука, 1970, 688 с.
- [8] Крупнин В.П., Лепецкий Б.А., Зарапин Ю.Л. и др. *Вакуумные прокатные станы*. Москва, Машиностроение, 1973, 232 с.
- [9] Андронов Е.В., Борисов А.Я., Герцик М.А. и др. *Обитаемая камера с инертной контролируемой средой для пластической обработки химически активных металлов*. Ленинград, Металлургия, 1969, вып. 12, с. 80–85.
- [10] 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.
- [11] Белов С.В. *Пористые металлы в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1981, 247 с.
- [12] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 1. Влияние конструкции брикета сеток и относительного обжа-

- тия структурообразующих элементов на пористость листовых заготовок. *Производство проката*, 2013, № 5, с. 32–42.
- [13] Белов С.А., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 338 с.
- [14] 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.
- [15] Третьяков А.Ф. Механические свойства тканых металлических сеток, применяемых для изготовления пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 2, с. 42–49.
- [16] 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.
- [17] Куркин С.А. *Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением*. Москва, Машиностроение, 1976, 184 с.

Статья поступила в редакцию 16.06.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Практическое использование результатов исследований технологических процессов формирования твердофазных соединений проволок в контролируемой газовой среде при создании листовых пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-7-2198>

**Третьяков Анатолий Федорович** — профессор, 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 материалов с заданным комплексом свойств. e-mail: [tretyakov@bmstu.ru](mailto:tretyakov@bmstu.ru)

**Technological processes of formation  
of solid-state wire bonds in the controlled gas environment  
in the manufacture of porous mesh materials  
with desired properties: practical application  
of research results**

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1005005, Russia

*A specific feature of the structure-forming elements used for the manufacture of porous mesh materials is a high specific surface area and a complex configuration of wire meshes, which excludes the possibility of using wire cutting for welding. The research shows that cleaning in Freon-113 is an effective way to remove mineral oils, paraffins, fats and some other contaminants from the mesh surface, since this solvent is stable, non-flammable, non-explosive and does not interact with the workpiece material. In addition, improving the quality of mesh cleaning is achieved by superimposing ultrasonic vibrations in the range of 20...40 kHz. The study introduces flow layouts for the porous materials manufacture by pressure welding of wire meshes from steel 12Kh18N10T and titanium alloy VT2. Findings of the research show that welding envelopes of meshes made of steel 12X18H10T by rolling in evacuated makes it possible to obtain porous elements with sufficiently high mechanical and technological properties. It is possible to implement this process on any sheet rolling mill, which is its significant advantage. The paper gives the modes of welding by rolling and diffusion welding of meshes in the manufacture of porous materials. Within the study, we developed a mathematical model that makes it possible to predict the ultimate interlaminar strength for given values of technological parameters of the processes for manufacturing sheet blanks. It is proposed to control the interlayer strength by comparing the calculated data and the results of testing the samples for separation in accordance with the developed methodology. It is advisable to evaluate the control of strength, plasticity in the sheet plane and their anisotropy by comparing the calculated data and the results of testing specimens under conditions of biaxial tension, implemented during hydrostatic buckling through a round matrix.*

**Keywords:** porous mesh material, freon, solid state compound, welding, rolling mill, porosity, pore size, permeability, strength, plasticity, quality control

#### REFERENCES

- [1] Tretyakov A.F. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya (Problems of ferrous metallurgy and materials science)*, 2016, no. 1, pp. 5–10.
- [2] Tretyakov A.F. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 2.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2156>
- [3] Tretyakov A.F. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 5.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2181>
- [4] Tretyakov A.F. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 6.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-6-2189>
- [5] Skvortsov K.F. *Podgotovka poverkhnostey detaley dlya naneseniya pokrytiy* [Surface preparation of parts for coating]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 64 p.

- [6] Spring S. *Ochistka poverkhnostey metallov* [Cleaning of metal surfaces]. Moscow, Mir Publ., 1966, 247 p. (In Russ.).
- [7] Rozenberg L.D. *Fizicheskie osnovy ultrazvukovoy tekhnologii* [Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 688 p.
- [8] Krupnin V.P., Lepetskiy B.A., Zarapin Yu.L., et al. *Vakuumnye prokatnye stany* [Vacuum rolling mills]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 232 p.
- [9] Andronov E.V., Borisov A.Ya., Gertsik M.A., et al. *Metallurgiya (Metallurgy)*, 1969, no. 12, pp. 80–85.
- [10] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., et al. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [11] Belov S.V. *Poristye metally v mashinostroenii* [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 247 p.
- [12] Tretyakov A.F. *Proizvodstvo prokata (Rolled products production)*, 2013, no. 5, pp. 32–42.
- [13] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnik* [Porous permeable materials: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [14] Tretyakov A.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 11, pp. 3–13.
- [15] Tretyakov A.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2018, no. 2, pp. 42–49.
- [16] Tretyakov A.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 12, pp. 87–96.
- [17] Kurkin S.A. *Prochnost svarnykh tonkostennykh sosudov, rabotayuschikh pod davleniem* [Strength of welded thin-walled pressure vessels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 184 p.

**Tretyakov A.F.**, Professor, Dr. Sc. (Eng.), Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 150 research publications in the field of creation of products from porous composites with a given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru