

УДК 621.77.04:627.851

Повышение качества соединения проволок сеток в процессе изготовления листовых пористых сетчатых материалов из стали 12X18Н10Т

Третьяков Анатолий Федорович tretyakov@bmstu.ru

Курганова Юлия Анатольевна

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. С целью повышения качества соединений тканых сеток, обеспечивающих высокую межслойную прочность изготавливаемых листовых пористых сетчатых материалов (ПСМ), предложено применить электрохимическое нанесение на поверхность сеток двухслойного покрытия, состоящего из Ni и Cu толщиной соответственно 10 и 5 мкм. Разработан технологический процесс горячей прокатки в вакуумированных конвертах для изготовления ПСМ с высокой межслойной прочностью.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, горячая прокатка, сварка, вакуум, химическая очистка, гальванические покрытия, твердый раствор, электронная микроскопия

Improving the quality of mesh wire connections in the process of manufacturing sheet porous mesh materials from 12X18N10T steel

Tretyakov Anatoluy Fedorovich tretyakov@bmstu.ru

Kurganova Yulia Anatolievna

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. In order to improve the quality of woven mesh connections that ensure high inter-layer strength of the manufactured sheet porous mesh materials (PSM), it is proposed to apply electrochemical application of a two-layer coating consisting of Ni and Cu with a thickness of 10 and 5 μm , respectively, to the surface of the mesh. A technological process of hot rolling in vacuum envelopes for the manufacture of PSM with high interlayer strength has been developed.

Keywords: porous mesh material, hot rolling, welding, vacuum, chemical cleaning, galvanic coatings, solid solution, electron microscopy

Введение. Пористые сетчатые материалы (ПСМ), изготавливаемые сваркой давлением металлических тканых проволоочных сеток с применением горячей деформации в контролируемой газовой среде, представляют значительный интерес для проницаемых изделий с требуемыми характеристиками. Благодаря организованной структуре и сварке проволок сеток между собой эти материалы обладают стабильными и воспроизводимыми свойствами [1]. Пори-

стые сетчатые материалы применяют при изготовлении фильтрующих элементов для очистки жидкостей и газов от механических примесей [2, 3], а также в системах теплозащиты жидкостных ракетных двигателей [4] и капиллярных заборных устройствах [5]. Экспериментальные исследования штампуемости и свариваемости ПСМ показали, что более технологичными являются заготовки с высокой межслойной прочностью. При этом установлено, что формоизменение лимитируется не только опасностью разрушения в плоскости листа, но и возможностью расслоения заготовки в процессе листовой штамповки [6].

Значительное влияние на межслойную прочность оказывают как режимы пластической деформации и сварки, так и технология подготовки поверхности проволок сеток. Анализ публикаций и результатов выполненных исследований показал, что повышение качества сварных соединений может быть достигнуто путем установления оптимальных значений технологических параметров, таких как температура и время нагрева, величина и скорость деформации, состав контролируемой газовой среды.

Для образования сварных твердофазных соединений проволок при изготовлении ПСМ помимо образования пластического контакта необходимы активация атомов на поверхности и объемное взаимодействие в зоне соединения, в результате которого между атомами соединяемых поверхностей образуются химические связи, а также протекают процессы релаксации напряжений, рекристаллизации и диффузии.

ПСМ, применяемые для изготовления проницаемых изделий, должны обладать не только требуемыми эксплуатационными свойствами, но и достаточными механическими и технологическими свойствами. Наиболее подходящим комплексом свойств обладают листовые пористые материалы, получаемый консолидацией тканых металлических сеток из стали 12Х18Н10Т в процессе горячей прокатки в контролируемой газовой среде.

Сварка давлением брикета сеток при горячей прокатке в вакууме или нейтральном газе 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 [7].

Существенным преимуществом сварки прокаткой брикета сеток из стали марки 12Х18Н10Т в вакуумированном конверте является возможность реализации на любом листопрокатном стане. Получение ПСМ в вакуумированном конверте [7] заключается в том, что брикеты сеток с обкладками из жаростойкой стали помещают в конверт из листовой малоуглеродистой стали, которые вакуумируют, заваривают и нагревают в печи, расположенной рядом с рабочей клетью стана, а затем прокатывают при скоростях деформации $\dot{\epsilon}_n = 1 \text{ с}^{-1}$ между валками до заданной толщины. После охлаждения конверт вскрывают на ножницах и извлекают полученный листовой ПСМ.

Показано, что низкое качество сварных соединений проволок, полученных по этой технологии, объясняется высоким сопротивлением деформированию микронеровностей на контактных поверхностях проволок и низкой скоростью диффузионного массопереноса в зоне соединения [8]. Экспериментально установлено, что в результате непровара соединений проволок сеток, полученных сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах, образуются концентраторы напряжений, которые снижают пластичность ПСМ при растяжении и межслойную прочность. Для повышения механических свойств проницаемых оболочек необходимо повысить качество соединения проволок сеток между собой.

На основании оформленного патента на изобретение [9] предложено техническое решение, которое обеспечивает повышение качества соединений структурообразующих элементов листовых ПСМ из стали 12Х18Н10Т в процессе горячей прокатки в вакуумированных конвертах. Для этого предварительно на поверхность проволок сеток электрохимическим методом наносят тонкие слои металлов, которые в процессе нагрева и последующей прокатки образуют твердый раствор с небольшим количеством жидкотвердой прослойки на поверхности контакта. Так, достаточное количество никеля в составе стали 12Х18Н10Т и его сродство с медью, а также возможность формирования непрерывного ряда твердых растворов, позволили определить базовую комбинацию для нанесения покрытий, состоящую из Cu и Ni. На сродство никеля и меди указывает аналогичный тип кристаллической решетки, близость атомарных радиусов и незаполненность энергетических «s» уровней.

Из вышеизложенного следует, что необходимо создать промежуточный медный слой, а затем обеспечить физический контакт для соединения поверхностей. Это возможно при повышенных температурах, причем температура должна быть выбрана таким образом, чтобы расплавить промежуточный слой меди, но сохранить основную конструкцию. Так как температура плавления Ni около 1451 °С, принимаем ее за верхнюю возможную границу, а температура плавления Cu — 1084 °С, эту температуру принимаем за нижнюю границу.

Проведенные исследования механических свойств сеток из стали 12Х18Н10Т, показали, что при температурах выше 1140 °С происходит нежелательное уменьшение пластичности проволок, образующих сетку. Таким образом, температура прокатки должна соответствовать минимально возможной для гарантированного растворения меди, т. е. интервалу 1120–1130 °С, таким образом, на поверхности проволок должен образовываться твердый раствор с небольшим количеством жидкой меди.

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

Из обозначенного следует, что необходимой операцией является очистка. Эффективным способом удаления минеральных масел, парафинов, жиров, краски и некоторых других загрязнений является очистка в органических растворителях [8]. Фреоны являются оптимальными растворителями, поскольку они стабильны, негорючи, невзрывоопасны и не взаимодействуют с материалом заготовки [9]. 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 [7].

Для образования прочного соединения покрытия с поверхностями проволок также необходима химическая активация поверхностных атомов путем кислотного травления. Проведенные исследования показали, что для подготовки проволок сеток из стали 12Х18Н10Т целесообразно применение раствора, состоящего из смеси кислот $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KF}$ [10].

Для никелирования изделий из коррозионностойких сталей применяют электролит, состоящий из хлорида никеля ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с концентрацией 200–250 г/л, соляной кислоты (HCl) с концентрацией 60–80 г/л, при температуре 30–60 °С и катодной плотности тока 5–7 А/дм² [11].

С целью оценки качества соединения покрытия с поверхностью проволок изделие нагревали в вакуумной печи при давлении $p = 1 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре 600–700 °С в течение 30 мин. Затем визуально проверяли отсутствие вздутия и отслаивания никелевого покрытия.

Нанесение слоя меди толщиной 5 мкм выполняли на проволоках сетки с никелевым покрытием. Меднение заготовок осуществляли в электролите, состоящего из сульфата меди с концентрацией 200–250 г/л и серной кислоты (50–70) г/л, при температуре 18–25 °С, катодная плотность тока составляла 1–2 А/дм² согласно рекомендациям [12].

Перед горячей прокаткой сетку помещали в металлический конверт и создавали в нем разряжение 13,3 Па. После этого заготовки нагревали в печи до температуры образования жидкой фазы между никелем и медью равной 1120–1130 °С и выдерживают при этой температуре в течение 10 мин, затем деформировали с относительным обжатием равным 0,2 при температуре не ниже 1100 °С. После охлаждения конверт разрезали и извлекали листовую ПСМ.

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 соединения между ними.

Анализ макроструктуры исследуемых соединений проволок сетки позволил установить, что конфигурация сетки сохранена. Видна выраженная локальная зона взаимодействия компонентов и наличие плотного контакта элементов конструкции. Для определения химического состава зоны и качества

соединения выполнена электронная микроскопия на сканирующем электронном микроскопе СЭМ Phenom XL G2 [13].

Проведенные исследования позволили установить присутствие меди в местах соединения проволок и повышенное содержание никеля в сравнении с основным материалом, что означает возможность формирования твердого раствора в зоне соединения конструктивных элементов [13]. Натурные испытания опытных образцов турбинных лопаток для парогазовых установок, передние кромка которых изготовлены из ПСМ с повышенной межслойной прочностью, подтвердили справедливость разработанной технологии.

Заключение. Предложенные технические решения позволили разработать технологический процесс изготовления листового ПСМ из стали 12X18H10T с повышенной межслойной прочностью, который предполагает нанесение двухслойного покрытия на поверхность проволок сеток, состоящего из Ni и Cu толщиной соответственно 10 и 5 мкм, последующую горячую прокатку пакета сеток в вакуумированном конверте при температуре $T = 1120\text{--}1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью деформации не менее 1 с^{-1} . Разработанный технологический процесс успешно использован при изготовлении опытных образцов оболочек турбинных лопаток для парогазовых установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] 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.
- [2] Белов С.В. *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. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>
- [5] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Платов И.В., Новиков Ю.М., Большаков В.А., Партола И.С. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкциях фазоразделительных и фильтрующих устройств космических жидкостных ракетных двигательных установок: современное состояние и проблемы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-3-2259>
- [6] Третьяков А.Ф. Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12X18H10T. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1498>
- [7] 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. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-7-2198>
- [8] Третьяков А.Ф. Образование сварных твердофазных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов из стали 12X18H10T. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 5. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-5-2181>
- [9] Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Стратьев В.К., Кременский И.Г., Колесников А.Г. *Способ изготовления пористого листа*. Патент № 2089306 РФ, 1997, бюл. № 25.

-
- [10] 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. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2156>
- [11] Гамбург Ю.Д. *Гальванические покрытия. Справочник по применению*. Москва, Техносфера, 2006, 216 с.
- [12] Ажогин Ф.Ф., Беленький М.А., Гааль И.Е. *Гальваника*. Москва, Металлургия, 1987, 736 с.
- [13] Семенов В.Н., Третьяков А.Ф., Курганова Ю.А. Разработка технологического процесса высокотемпературной пайки для изготовления оболочек турбинных лопаток с проникающим пористым охлаждением. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2025, т. 23, № 3, с. 108–113. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2025-23-3-108-113>