

Влияние предварительной химической обработки на качество твердофазных сварных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов

© А.Ф. Третьяков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1005005, Россия

Пористые сетчатые материалы, обладающие организованной структурой, стабильными и воспроизводимыми свойствами, предназначены для изготовления фильтрующих элементов, систем теплозащиты, ракетных и турбореактивных двигателей и других изделий с заданным комплексом свойств. Показано значительное влияние на межслойную прочность этих материалов как режимов пластической деформации и сварки, так и технологии предварительной химической очистки поверхности проволок сеток. Травление заготовок в смеси неорганических кислот и в фосфорорганических комплексах уменьшает толщину оксидных пленок и обеспечивает дополнительную активацию контактных поверхностей в сварном соединении. Предложены составы травильных растворов для обработки проволок из титана VT1-0 и коррозионностойкой стали 12X18H10T, которые обеспечивают повышение прочности сварных соединений, выполненных сваркой прокаткой в вакууме и диффузионной сваркой, по сравнению с аналогичными процессами без предварительной обработки. Определены режимы технологических процессов химического травления и диффузионной сварки сеток из стали 12X18H10T, обеспечивающих максимальную межслойную прочность.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, кислотное травление, комплексон, сварка, химическая активация, оксиды, межслойная прочность

Введение. Пористые сетчатые материалы (ПСМ), изготавливаемые сваркой давлением металлических тканых проволочных 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].

Пористые 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 устройств [5]. Кроме того, проводятся работы по созданию и испытанию лопаток высокотемпературных газовых турбин с оболочками из ПСМ [6, 7].

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 [8]. При этом 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. Кроме того, значительное влияние на качество изготавливаемого ПСМ оказывает предварительная химическая очистка поверхности соединяемых проволок в процессе сварки прокаткой, а также ударной и диффузионной сварки [8–10].

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.

Активация контактирующих поверхностей происходит в результате зарождения и роста активных центров, кинетика образования которых зависит от температуры, уровня контактных напряжений, скорости деформации, условий образования и движения дислокаций, вакансий, межузельных и примесных атомов. Основными каналами активации в условиях твердофазного взаимодействия являются:

- термический;
- деформационный, связанный с высвобождением энергии при выходе на поверхность структурных дефектов;
- механический, который может быть реализован путем частичного или полного разрушения оксидных проволок;
- химический, который предполагает утонение оксидного слоя или полное его разрушение по механизму восстановления на границе металл — оксид, оксид — газовая фаза или кислотного травления.

Химическая активация предполагает утонение или удаление оксидного слоя на поверхности соединяемых элементов либо посредством нагрева в контролируемой среде, либо путем предварительного химического травления. В результате снижается высота потенциального энергетического барьера, при превышении которого на фактической площади контакта (ФПК) образуются межатомные связи [9].

Химический состав и толщина оксидных пленок оказывают существенное влияние на кинетику образования твердофазных соединений. Поскольку состояние поверхности проволок сеток определяется

режимами термической обработки в процессе их изготовления, параметры которых в производственных условиях изменяются в широких пределах, для получения сварных соединений со стабильными свойствами необходима их предварительная обработка.

Травление представляет собой сложный физико-химический процесс взаимодействия электролитов (растворы кислот и солей, расплавы щелочей) с оксидными пленками и поверхностными слоями основного материала. Проведенные В.В. Фроловым исследования процесса травления [11] показали, что удаление оксидов большинства металлов является процессом термодинамически предопределенным. При травлении наблюдаются три этапа [12]: электрохимическое растворение оксидов, затем — основного металла и окисление очищенных поверхностных слоев.

При взаимодействии оксидов с неорганическими кислотами выделяется водород, который, взаимодействуя с поверхностными слоями, может образовывать твердые растворы и гидриды, существенно снижающие механические свойства тонких проволок. Поэтому при выборе оптимального состава травителей и подготовке поверхностей проволок под сварку необходимо учитывать структуру основного металла и оксидов проволок, их диаметр и активность компонентов электролитов.

Анализ публикаций показывает, что вопросам предварительной подготовки под сварку химическими методами уделено недостаточное внимание. Результаты исследований, приведенные в работах [13, 14], показали, что повышение качества сварных твердофазных соединений может быть достигнуто предварительным кислотным травлением в растворах плавиковой и азотной кислот ($\text{HF} + \text{HNO}_3$) и в фосфорорганических комплексонах [15].

Комплексоны представляют собой органические соединения, сочетающие в молекуле основные и кислотные центры и образующие с катионами прочные комплексоны. При этом они не вступают в реакцию с основным металлом, а взаимодействуют только с оксидами. Кроме того, они не взрывоопасны, а их предельно допустимая концентрация может быть в 20 раз выше, чем для HF. В процессе травления комплексонами не происходит выделения газов, а образующиеся соли не являются токсичными [15].

Цель работы — изучение влияния кислотного травления на качество сварных твердофазных соединений проволок и определение оптимальных травильных растворов и режимов травления проволок сеток при изготовлении ПСМ.

Эксперимент. Объектом обработки выбрана проволока из титанового сплава ВТ1-0 и стали 12Х12Н10Т. Для исследования, выполненного совместно с Л.К. Харитоновой, применены следующие комплексоны:

ОЭДФ — оксиэтилидендифосфоновая кислота, которая представляет собой белый кристаллический порошок, хорошо растворимый в воде, метиловом и этиловом спиртах, но нерастворимый в других органических растворителях;

НТФ — нитрилотриметилфосфоновая кислота — белый кристаллический порошок, хорошо растворимый в воде и нерастворимый в органических растворителях;

ИСБ-М (МЧ-3) — водный раствор смеси кислот:



Образцы из титановой проволоки (ВТ1-0) диаметром 5 мм, предварительно очищенные в этаноле, погружали в водный раствор комплексонов с концентрацией 0,2...0,8 моль/л и доводили до кипения. В раствор комплексона добавляли перекись водорода для катализации процесса. Интенсивность процесса травления оценивали по изменению массы образца, которую измеряли на аналитических весах с ценой деления $\pm 0,0002$ г.

Для сравнения образцы обрабатывали в смеси неорганических кислот, содержащих 20 моль/л HF + 20 моль/л HNO₃. Результаты исследования влияния типа травильного раствора и его концентрации на изменение диаметра титановой проволоки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние типа травильного раствора и его концентрации на изменение диаметра титановой проволоки ВТ1-0

Травильный раствор	Концентрация, моль/л	Диаметр проволоки, мм	
		до травления	после травления
Смесь кислот	0,1 (HF)	5,12	4,11
	0,5 (HNO ₃)		
ОЭДФ	0,2	5,10	5,10
НТФ	0,4	5,10	5,09
	0,8	5,05	5,03
ИСБ-М (МЧ-3)	0,2	5,09	5,08
	0,4	5,11	5,10

Эффективность применения состава электролитов и режимов травления определяли в процессе испытаний титановых образцов, представляющих собой сварные соединения перекрещивающихся под прямым углом проволок из ВТ1-0 диаметром 5 мм. Образцы изготовляли диффузионной сваркой на установке СДВУ-2, остаточное давление в камере составляло 10^{-2} Па, температура сварки — 1173К, время сварки — 15 мин. Относительное обжатие образца в процессе сварки составляло $\varepsilon_{\text{п}} = 0,15...0,20$. Составы травильных растворов и режимы травления проволок перед сваркой приведены в табл. 2.

**Влияние состава травильного раствора и режимов травления
на относительную прочность сварных соединений проволок из ВТ1-0**

Травильный раствор	Концентрация, моль/л	Время травления, мин	Температура, К	Относительное обжатие перекрестия ε_{Π}	Сила отрыва $P_{отр}$, кН	Относительная прочность на отрыв $\sigma_{отр}/\sigma_{в}$
Без травления	–	–	–	0,15	3,15 4,2	0,6 0,8
HF + HNO ₃	1,0 (HF) 0,5 (HNO ₃)	15	293	0,15	4,5	0,85
ОЭДФ	0,4 0,8	15	373	0,20 0,15	5,0 3,5	0,71 0,66
НТФ	0,2 0,4 0,6	15	373	0,15 0,15 0,15	3,9 4,2 3,8	0,74 0,80 0,71
ИСБ-М (МЧ-3)	0,2 0,4	15	373	0,20 0,20	7,0 6,6	1,0 0,94

Качество сварных соединений оценивали по величине относительной прочности $\sigma_{отр} / \sigma_{в}$ ($\sigma_{в}$ — предел прочности проволок после термомеханической обработки по режиму сварки перекрестия) при испытании на отрыв. Значение прочности сварных соединений на отрыв определяли по формуле

$$\sigma_{отр} = P_{отр} / F_{\Gamma},$$

где $P_{отр}$ — сила, при которой происходит разрушение образца; F_{Γ} — геометрическая площадь макроконтakta перекрестия.

Результаты испытания сварных образцов на отрыв представлены в табл. 2.

Обсуждение результатов. Анализ кинетических зависимостей удаления поверхностных слоев титановых проволок в процессе травления (рис. 1) смеси неорганических кислот HF + HNO₃ показал, что растворение во времени имеет линейную зависимость, а значит, реакция происходит как с оксидами, так и с металлом нижележащих слоев. При этом в результате травления в течение 15 мин диаметр образца уменьшается примерно на 20 % (см. табл. 1).

Кроме того, выполненные фрактографические исследования поверхности после травления с помощью сканирующего микроскопа позволили обнаружить участки межкристаллической коррозии [13].

Следует отметить, что применяемые неорганические кислоты являются чрезвычайно токсичными. Например, для плавиковой кислоты (HF) предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей

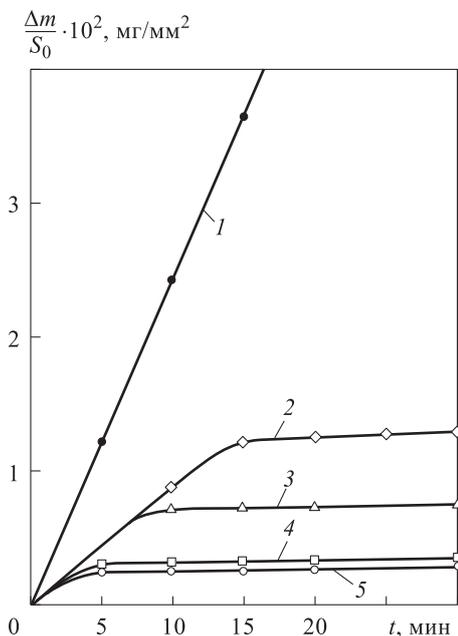


Рис. 1. Кинетика травления:

1 — VT1-0 в смеси кислот HF + HNO₃; 2 — X20H80 в комплексонах ИСБ-М или НТФ; 3 — M1 в комплексонах ИСБ-М; 4 — Л80 в комплексонах ИСБ-М; 5 — VT1-0 в комплексонах ИСБ-М или НТФ

зоны составляет 0,5 мг/м³, т.е. в соответствии с ГОСТ 12.1.007–76 она относится к веществам 2-го класса опасности (вещества высокоопасные).

Травление образцов в комплексонах показало, что они не вступают в реакцию с основным металлом, а взаимодействуют только с оксидами, и поэтому размер образцов после травления практически не изменялся (см. табл. 1). Кроме того, они не взрывоопасны, а их предельно допустимая концентрация в воздухе в 20 раз выше, чем для HF, т.е. они относятся к веществам малоопасным (4-й класс опасности). При этом в процессе травления не происходит выделения газов, а образующиеся соли не являются токсичными.

Результаты исследования содержания водорода в образцах после травления, полученные с помощью спектрального метода, приведенные в работе [13], подтвердили ранее высказанные предположения об отсутствии наводороживания титана в процессе травления в исследуемых комплексонах. При этом показано, что после травления титановой проволоки в растворе неорганических кислот содержание H₂ на поверхности образца возрастает в 6 раз.

Анализ кинетических зависимостей, описывающих процесс травления поверхности образцов проволок из титана VT1-0, нихрома X20H80, меди M1 и латуни Л80 в комплексонах, показал (см. рис. 1), что через 5...10 мин прекращается процесс травления. При этом величина $\Delta m/S_p$, где Δm — изменение массы с первоначальной поверхности S_p , практически не зависит от типа комплексона. Полученные результаты позволяют предположить, что в зависимости от толщины

и химического состава поверхностных слоев проволок разрушение оксидов происходит за 5...10 мин без удаления нижележащих слоев. Результаты исследования состава травителей на изменение диаметра проволок, приведенные в табл. 1, показали, что уменьшения размера проволок не наблюдается.

Эффективность применения комплексонов для подготовки поверхности под сварку определяли по результатам механических испытаний крестообразных соединений, полученных диффузионной сваркой проволок диаметром 5 мм. Анализ приведенных в табл. 2 данных позволил установить, что химическое состояние поверхности проволок оказывает существенное влияние на качество сварных соединений. Поэтому прочность образцов без предварительной обработки проволок характеризуется значительным разбросом результатов. Травление в комплексонах так же, как и в смеси кислот $\text{HF} + \text{HNO}_3$, повышает прочность и стабильность сварных соединений.

Низкие значения прочности образцов после обработки в ОЭДФ и НТФ обусловлены тем, что при $T = 373\text{K}$ эти комплексоны полимеризуются и не обеспечивают необходимого удаления оксидных пленок. Наиболее высокое качество сварных соединений достигается после обработки в комплексоне (маточнике) ИСБ-М (МЧ-3), что можно объяснить процессом химической активации поверхности в результате удаления оксидной пленки и предотвращения ее регенерации благодаря ингибированию поверхности.

Кроме того, экспериментальными исследованиями установлено, что качество сварных соединений проволок, подвергнутых обработке в комплексонах, практически не зависит от времени между операциями травления и сварки. При этом прочность перекрестий проволок, обработанных стандартным травителем ($\text{HF} + \text{HNO}_3$), существенно снижается с увеличением паузы между операциями. Полученные результаты можно объяснить тем, что в процессе травления титановой проволоки комплексонами происходит не только удаление оксидов, но и образование защитной органической пленки, которая покрывает поверхность и замедляет рост толщины оксидов после окончания травления. На процесс формирования сварных соединений органическая пленка не оказывает влияния, поскольку разлагается в процессе нагрева в вакууме.

Однако проведенные исследования показали, что применение комплексонов для подготовки сеток из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т под сварку малоэффективно. Поэтому в процессе разработки технологии изготовления ПСМ из этой стали была рассмотрена возможность применения травления сеток в неорганических кислотах. На основе результатов исследований, полученных в работе [14], наибольший интерес представляет травление в азотной кислоте и в смесях: $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$; $\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4$ и $\text{HF} + \text{HNO}_3$.

Анализ кинетических кривых, описывающих процесс травления в неорганических кислотах, показал, что максимальное удаление металла происходит при травлении в смеси азотной и плавиковой кислот, а минимальное — в $\text{HF} + \text{H}_2\text{SO}_4$. При этом через 10...15 мин наступает процесс пассивации поверхности образцов. Кроме того, в работе [14] установлено, что добавление к смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ плавиковой кислоты активизирует процесс травления стали, в результате чего значительно возрастает съём металла.

Применение травильного раствора, состоящего из $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HF}$, обеспечивало удаление 2 % металла. Поскольку плавиковая кислота является весьма токсичной, рекомендовано заменить ее фторидом калия (KF) с концентрацией 30...40 г/л.

Исследования межслойной прочности ПСМ из стали 12Х18Н10Т, результаты которого приведены на рис. 2, позволили установить, что более высокая межслойная прочность при заданной конструкции брикета сеток и заданной величине их относительного обжатия

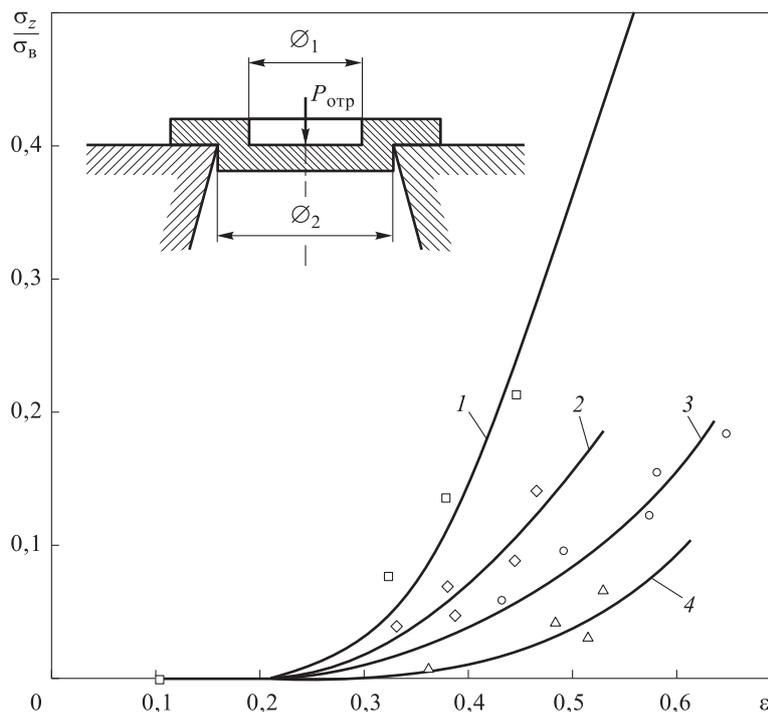


Рис. 2. Влияние относительного обжатия брикета сеток при сварке давлением на относительную прочность ПСМ на основе фильтровых сеток П60 (ГОСТ 3187–76) из стали 12Х18Н10Т, полученных диффузионной сваркой после травления (1), то же самое, но без травления (2), сваркой прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток после травления (3), сваркой прокаткой в аргоне без травления (4):

— — расчетные данные; □; ◇; ○; △ — экспериментальные данные

достигается путем предварительного кислотного травления сеток в растворе $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KF}$ и последующей диффузионной сварки на установке СДВУ-2. Остаточное давление в камере составляло 10^{-2} Па, температура сварки — 1473К, время сварки — 15 мин [8].

Заключение. Анализ кинетических зависимостей удаления поверхностных слоев заготовок из титана ВТ1-0 в процессе травления позволил установить, что при обработке в комплексе ИСБ-М (МЧ-3) практически через 5...15 мин прекращается удаление оксидов без съема нижележащих слоев и их наводороживания. Образующаяся в процессе травления органическая пленка, покрывая поверхность, предотвращает рост оксидов. Поэтому качество твердофазных соединений проволок практически не зависит от времени между операциями травления и сварки.

Показано, что применение комплексонов для подготовки под сварку поверхности проволок из стали 12Х18Н10Т малоэффективно. Более эффективным процессом, повышающим качество сварных соединений, является травление в растворе, состоящим из смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KF}$.

Были проведены экспериментальные исследования процессов травления проволок. Полученные результаты механических испытаний на отрыв крестообразных образцов и ПСМ из стали 12Х18Н10Т на межслойную прочность позволили сделать следующие выводы:

- предложенный технологический процесс травления титановой проволоки ВТ1-0 в комплексе ИСБ-М (МЧ-3) и проволоки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т в растворе $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KF}$ повышает прочность твердофазных соединений, полученных сваркой прокаткой в вакууме и диффузионной сваркой, по сравнению с прочностью аналогичных образцов без предварительного травления;

- результаты механических испытаний образцов показали, что обработка заготовок из ВТ1-0 в комплексах сопровождается удалением оксидов при минимальном растворении основного металла без наводороживания. Образовавшаяся в процессе травления органическая пленка покрывает поверхность, предотвращает рост оксидов. Поэтому качество твердофазных соединений проволок практически не зависит от времени между операциями травления и сварки;

- установлено, что максимальная межслойная прочность ПСМ из стали 12Х18Н10Т достигается диффузионной сваркой сеток после предварительного травления в растворе $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{KF}$ на установке СДВУ-2. Остаточное давление в камере составляло 10^{-2} Па, температура сварки — 1473 К, время сварки — 15 мин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И., Колесников А.Г., Панов А.Д., Макарошкин В.И. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-698>
- [5] 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*, 2015, № 11, с. 53–56.
- [6] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К. Третьяков А.Ф. Испытания пористого сетчатого материала в качестве оболочки лопаток высокотемпературных газовых турбин. *Препринт ОИВТ РАН*, 2010, № 2-502, 64 с.
- [7] 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.
- [8] Третьяков А.Ф. Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1498>
- [9] Третьяков А.Ф. Консолидация структурообразующих элементов в процессе горячей прокатки металлических сеток. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2016, № 1, с. 5–10.
- [10] Третьяков А.Ф. Технологическая наследственность в процессе изготовления изделий из пористых сетчатых материалов с заданными свойствами. Сообщение 2. Закономерности влияния пластической деформации и консолидации сеток на технологические и теплофизические свойства пористых сетчатых материалов. *Производство проката*, 2013, № 6, с. 29–34.
- [11] Фролов В.В. *Травление металлов и неметаллических материалов*. Москва, Машиностроение, 1980, 60 с.
- [12] Липкин Я.Н., Девяткина Т.Е. *Химическая обработка стального проката*. Киев, Техника, 1980, 133 с.
- [13] Фролов В.В., Лозев Г.Е., Третьяков А.Ф., Харитонов Л.К., Жуков Б.М. Травление титана под диффузионную сварку в вакууме. *Сварочное производство*, 1985, № 6, с. 6–7.
- [14] Третьяков А.Ф., Сабельникова Т.Н., Харитонов Л.К. Очистка поверхности металлов в процессе изготовления и восстановления деталей машин. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2004, № 5, с. 27–29.
- [15] Дятлов Н.М., Темкина В.Я. *Комплексоны и комплексонаты металлов*. Москва, Химия, 1988, 543 с.
- [16] Усов В.В., Плотников С.А., Кушакович С.А. *Травление титана и его сплавов*. Москва, Металлургия, 1984, 128 с.

Статья поступила в редакцию 30.01.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

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 композитов с заданным комплексом свойств. e-mail: tretyakov@bmstu.ru

Preliminary chemical treatment affecting the quality of solid-state welded joints of wires in porous mesh materials manufacture

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1005005, Russia

Porous mesh materials with an organized structure, stable and reproducible properties are used in the manufacture of filter elements, thermal protection systems, rocket and turbojet engines, and other products with a given set of properties. The interlayer strength of such materials is significantly affected both by the modes of plastic deformation and welding and by the technology of preliminary chemical cleaning of the wire mesh surface. Etching work-pieces in a mixture of inorganic acids and organophosphorus complexones reduces the thickness of oxide films and additionally activates the contact surfaces in the welded joint. The study introduces the etchant solutions for treating VT1-0 titanium and corrosion-resistant 12Kh18N10T steel wires. The solutions increase the strength of the welded joints made by vacuum rolling welding and diffusion welding, compared with similar processes without pretreatment. The study also specifies the modes of technological processes of chemical etching and diffusion welding of 12Kh18N10T steel meshes, which provide maximum interlayer strength.

Keywords: porous mesh material, acid etching, complexon, welding, chemical activation, oxides, interlayer strength

REFERENCES

- [1] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., Kolesnikov A.G., Panov A.D., Makarochkin V.I. *Poristye setchatye materialy* [Porous net materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [2] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: Spravochnik* [Porous permeable materials: handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [3] Sparks T., Chase G. *Filters and Filtration. Handbook*. Elsevier, 2013, 444 p.
- [4] Pelevin F.V., Avramov N.I., Orlin S.A., Sintsov A.L. *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] Novikov Yu.M. Bolshakov V.A. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti — Life Safety*, 2015, no. 11, pp. 53–56.
- [6] Zeygarnik Yu.A., Polyakov A.F., Stratev V.K. Tretyakov A.F. *Preprint OIVT RAN (Preprints of JIHT)*, 2010, no. 2-502, 64 p.
- [7] 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.
- [8] Tretyakov A.F. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1498>
- [9] Tretyakov A.F. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya (Problems of ferrous metallurgy and materials science)*, 2016, no. 1, pp. 5–10.
- [10] Tretyakov A.F. *Proizvodstva prokata — Rolled Products Manufacturing*, 2013, no. 6, pp. 29–34.
- [11] Frolov V.V. *Travlenie metallov i nemetallicheskih materialov* [Etching of metals and non-metal materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 60 p.

- [12] Lipkin Ya.N., Devyatka T.E. *Khimicheskaya obrabotka stalnogo prokata* [Chemical treatment of rolled steel]. Kiev, Tekhnika Publ., 1980, 133 p.
- [13] Frolov V.V., Lozeev G.E., Tretyakov A.F., Kharitonova L.K., Zhukov B.M. *Svarochnoe proizvodstvo (Welding production)*, 1985, no. 6, pp. 6–7.
- [14] Tretyakov A.F., Sabelnikova T.N., Kharitonova L.K. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya — Repair, Reconditioning, Modernization*, 2004, no. 5, pp. 27–29.
- [15] Dyatlov N.M., Temkina V.Ya. *Kompleksy i kompleksony metallov* [Metal complexons and complexonates]. Moscow, Khimiya Publ., 1988, 543 p.
- [16] Usov V.V., Plotnikov S.A., Kushakovich S.A. *Travlenie titana i ego splavov* [Etching of titanium and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, 128 p.

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