

**Исследование влияния состава контролируемой
газовой среды и температуры на качество
твердофазных соединений проволок при изготовлении
пористых сетчатых материалов**

© А.Ф. Третьяков

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

Пористые сетчатые материалы, предназначенные для изготовления изделий с заданными формой, размерами, гидравлическими, фильтровальными, теплофизическими и другими свойствами, должны обладать необходимыми механическими и технологическими свойствами, на формирование которых в значительной степени влияет качество сварных твердофазных соединений проволок сеток. Повышение прочности соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов существенно зависит от условий удаления оксидных слоев, которые определяются выбором оптимальной защитной газовой среды и температуры нагрева при сварке. Проведенный анализ процессов, протекающих на границе металл — оксид и оксид — газовая фаза, позволил установить, что от структуры сплава, температуры нагрева, состава и парциального давления газовой защитной среды зависит не только дополнительное окисление или утонение оксидных слоев, но и газонасыщение поверхности заготовок. Показано, что для изготовления листовых пористых сетчатых материалов значительных размеров с высокой точностью по толщине сварка прокаткой в защитной газовой среде — единственно возможный процесс. Сварку прокаткой брикета сеток можно в зависимости от химического состава проволок реализовать на вакуумных прокатных станах, в среде аргона контролируемой чистоты и в вакуумированных конвертах. Приведены результаты исследования влияния состава газовой среды и температуры процесса сварки на качество полученных соединений, позволившие установить, что листовые материалы из титанового сплава марки ВТ2 целесообразно изготавливать горячей прокаткой в вакуумном стане и в инертной газовой среде с контролируемым составом, из стали марки 12Х18Н10Т — горячей прокаткой в вакуумированных конвертах, а изделий с ограниченными размерами — диффузионной сваркой. Определены режимы технологических процессов изготовления пористых сетчатых материалов из сплава ВТ2 и стали марки 12Х18Н10Т сваркой прокаткой и диффузионной сваркой.

Ключевые слова: пористый сетчатый материал, газовая среда, вакуум, аргон, сварка, прокатный стан, сварное соединение, прочность

Введение. Пористые сетчатые материалы (ПСМ) предназначены для изготовления изделий с заданными размерами, гидравлическими, теплофизическими и другими свойствами, поэтому наряду с требуемыми эксплуатационными свойствами они должны обладать высокими механическими и технологическими характеристиками, значения которых в значительной степени формируются качеством сварных соединений проволок сеток [1].

Разрабатывать технологические процессы изготовления ПСМ сваркой давлением брикета сеток необходимо на основе результатов исследования влияния предварительной химической очистки [2], температуры, величины и скорости деформации [3], а также состава контролируемой газовой среды на прочность и пластичность твердофазных соединений проволок. В качестве защитной среды при сварке давлением применяют вакуум, восстановительную и инертную среду. Для обоснованного выбора состава и давления газовой среды, а также температуры нагрева необходимо учитывать механизм и кинетику процессов образования и удаления оксидных пленок.

Из анализа результатов исследования нагрева заготовок в вакууме со степенью разряжения 10^{-2} Па, создаваемым широко распространенными вакуумными системами, следует, что практически для всех металлов эта среда является окислительной. Причем образование оксидных пленок может продолжаться до относительно высоких температур, пока не создадутся условия для обратного процесса [4]. Скорость роста или разрушения оксидных пленок для конкретного сплава зависит от парциального давления кислорода P_{O_2} и температуры процесса. Для разработки эффективного технологического процесса сварки в вакууме рассмотрим процессы окисления и разрушения оксидов при сварке.

Механизм реакции окисления заготовок зависит в общем случае от технологии предварительной обработки поверхности, температуры, состава, давления газов и продолжительности взаимодействия с поверхностью. Следует отметить, что в настоящее время нет единой теории, описывающей процесс окисления, однако наиболее интересными являются работы П. Кофстада [5], Ж. Бенера [6] и К. Хауффе [7]. Несмотря на то что многие положения авторов расходятся, можно сформулировать некоторые общие положения.

Начальной стадией окисления ювенильной поверхности является адсорбция газа. Затем кислород может растворяться в металле, и на поверхности образуется оксид в виде пленки или отдельных зародышей. Как адсорбция, так и начальное образование оксида зависят от технологии ее подготовки и наличия примесей в металле или газовой фазе. На поверхности, покрытой плотной пленкой, реакция протекает только посредством твердофазной диффузии реагентов через оксид. В этом случае скорость реакции окисления определяется скоростью процессов диффузии и на поверхности образуется толстый слой оксида, кинетика роста которого описывается параболическим законом.

Металлы могут образовывать и пористую оксидную пленку, которая сама по себе не является для реагентов твердофазным диффузионным барьером. В подобных случаях реакция может лимитироваться процессами, протекающими на границе фаз, а для кинетики

окисления справедлив линейный закон. Часто скорость реакции окисления подчиняется совокупности закономерностей. Например, скорость реакции на начальной стадии может лимитироваться процессами, протекающими на поверхности раздела (линейная зависимость), а спустя некоторое время преобладающим механизмом может стать диффузия (параболическая закономерность).

Следует отметить, что окисление сплавов характеризуется избирательным процессом взаимодействия с кислородом его химических элементов. Так, для стали марки I2X18H10T при температуре 923K оксидная пленка толщиной 5 мкм состоит в основном из Cr_2O_3 , связанного с некоторым количеством Si. При $T = 1073\text{K}$ наружный слой оксида, контактирующий с газовой фазой, состоит преимущественно из Fe_2O_3 .

При этой температуре скорость прироста массы оксидов может быть описана линейным или параболическим законом. При $T = 1223\text{K}$ оксид состоит из четырех слоев: тонкий слой гематита (Fe_2O_3), контактирующего с газовой фазой; толстый слой вюстита (FeO); пористый слой вюстита и шпинели NiCr_2O_4 . При $T = 1223 \dots 1373\text{K}$ оксид состоит из трех слоев: гематита, магнезита (Fe_3O_4) и внутреннего слоя — богатой хромом шпинели NiCr_2O_4 [8].

Теоретическим и экспериментальным исследованиям механизма и кинетики процесса очистки металлов и сплавов от оксидов посвящены работы [4, 9–12] и ряд других. На основе расчетов, выполненных в [10], показано, что для ряда металлов (серебра, меди, никеля) с относительно высокой упругостью диссоциации оксидов в условиях глубокого вакуума ($P_{\text{O}_2} \approx 10^{-3}$ Па) наиболее вероятным механизмом удаления оксидов является их диссоциация. На металлах (титане и цирконии), хорошо растворяющих кислород в вакууме, можно ожидать разрушение оксидной пленки в результате растворения кислорода в металле. На углеродистой стали оксиды восстанавливаются углеродом, для чистого γ -железа при $T = 1173\text{K}$ разрушение пленок происходит только путем их диссоциации. Для высоколегированных сталей процесс восстановления оксидов железа диффундирующим углеродом значительно затрудняется, так как легирующие элементы образуют на поверхности свои оксиды, которые препятствуют удалению FeO , Fe_2O_3 и др. [11].

Исследование условий очистки титана, выполненное в работе [13], позволило установить, что поверхность может быть свободна от оксидов через 20 мин при нагреве в вакууме 5×10^{-4} Па при $T = 1173\text{K}$. Анализ результатов исследования процесса удаления оксидных пленок на стали марки I2X18H9T и меди M2, проведенный А.С. Гельманом и М.В. Большаковым [9, 12], показал, что при нагреве в вакууме существенное значение имеет разрушение оксидов вследствие их взаимо-

действия с элементами-восстановителями, содержащимися в газовой фазе. Масс-спектральный анализ позволил установить, что процентное содержание газов в рабочей камере при диффузионной сварке значительно отличается от их соотношения в обычной атмосфере. Это особенно заметно при использовании паромасляных вакуумных насосов, поскольку мельчайшие капли масла, соприкасаясь с нагретыми поверхностями заготовок в зоне сварки, разлагаются с образованием углеводородов, H_2 , CO , CO_2 и H_2O . При температурах $T \leq 973K$ на поверхности адсорбируются тяжелые углеводороды, препятствующие взаимодействию газов-восстановителей с оксидными пленками. С повышением температура ($T = 1073...1173K$) происходит диссоциация большинства углеводородов с образованием водорода и твердого углерода, которые оказывают решающее влияние на сдвиг реакций взаимодействия оксидов с продуктами диссоциации в сторону восстановления [4].

Кроме того, необходимо отметить, что водород, помимо восстановления оксидов, благодаря высокой химической активности при определенных условиях поглощается всеми металлами без исключения. Диффузия H_2 в нагреваемые элементы зависит от размеров атомов, строения и плотности кристаллической решетки материала заготовок. Процесс проникновения в металл при высоких температурах состоит из следующих этапов [14]: адсорбция; диссоциация молекул водорода на поверхности; переход атомов через поверхность в глубь металла, а также объемная диффузия. При нагреве следует учитывать характер взаимодействия H_2 с металлом, так как при определенных условиях могут образовываться твердые растворы Fe, Mn, Al и др. Гидриды так же, как, например, у титана, существенно снижают пластичность.

Оксиды меди легко восстанавливаются водородом, однако возможность реакции H_2 , растворяющегося в меди, с находящимся в ней кислородом может приводить к охрупчиванию металла в результате образования H_2O , не растворяющегося в Cu. Растворение H_2 в стали — процесс эндотермический [15], причем его растворимость зависит от температуры и давления газа. Исследование взаимодействия водорода со сталью марки I2X18Ni0T при длительной выдержке в условиях высоких температур и давлений, представленное в работе [16], позволило установить, что эта сталь водородоустойчива.

Выполненные автором совместно с Л.К. Харитоновой расчеты энергии Гиббса для процессов восстановления оксидов железа и хрома водородом, показали, что разрушение FeO и Fe_2O_3 термодинамически возможно при $T > 840K$, а оксид Cr_2O_3 не восстанавливается.

В работе [4] показано, что на процесс восстановления существенное влияние оказывает толщина углеродной пленки, оптимальное

значение которой при температуре $T = 1373\text{K}$ в вакууме 10^{-3} Па составляет 30...40 нм. На образцах, покрытых пленкой толщиной менее 20 нм, были обнаружены следы оксидов, в основном Cr_2O_3 . При толщине не менее 50 нм методом электрографического исследования выявлены в зоне контакта линии, соответствующие карбиду титана.

Для обработки давлением, сварки и термообработки химически активных металлов, таких как ниобий, титан, алюминий, магний, а также высоколегированных сталей широко используется инертный газ аргон. Многолетний опыт эксплуатации установок с инертной контролируемой средой типа «Атмосфера-1» показал высокую эффективность защиты нагретого металла от газонасыщения в аргоне [17]. Благодаря тому, что в рабочей камере таких установок осуществляется циркуляционная очистка инертного газа, концентрация примесей в аргоне обычно не превышает следующих значений: 0,001 % O_2 , 0,005 % H_2 , 0,01 % N_2 и 0,005 % H_2O . Однако даже при наличии такого небольшого количества кислорода в газе происходит окисление металлов. При этом вероятность увеличения толщины оксидных пленок или их разрушения (утонения) определяется либо условиями внешней массопередачи O_2 из атмосферы аргона и диффузии его из оксида в глубь металла, либо диффузией к поверхности находящихся в сплаве элементов-восстановителей, например углерода.

Таким образом, проведенный анализ процессов, протекающих на границе металл — оксид и оксид — газовая фаза, позволил установить, что в зависимости от структуры сплава, температуры нагрева, состава и парциального давления компонентов контролируемой среды возможно не только дополнительное окисление или утонение оксидных пленок, но и газонасыщение проволок.

Цель работы — определение оптимального состава защитной газовой среды и температуры нагрева при сварке прокаткой и диффузионной сварке для изготовления ПСМ из титанового сплава марки ВТ2 и стали марки 12Х18Н10Т.

Методика проведения исследований. С целью изучения влияния состава среды и температуры нагрева на механические свойства заготовок автором совместно с Г.П. Полушкиным были проведены эксперименты с применением титановой проволоки из сплава ВТ2 диаметром 1 мм. Нагрев осуществляли в вакуумированных конвертах при степени разряжения 1...5 Па, в камерах для диффузионной сварки и в печи прокатного стана, в которых создавался вакуум $(1...5) \times 10^{-2}$ Па, а также в среде аргона с содержанием 0,001 % O_2 , 0,005 % H_2 , 0,01 % N_2 и 0,005 % H_2O . После нагрева при температурах 1123, 1173 и 1223К в течение 8...15 мин содержание кислорода определяли методом активации быстрыми нейтронами по методике ВИЛС МК 155-34-78, водорода — методом вакуум-нагрева по ОСТ 1-92052-76, азота — химическим методом ВМК 82-33-71.

Физическое моделирование процесса сварки сеток из стали марки 12Х18Н10Т и титанового сплава марки ВТ2, результаты которого приведены в работе [3], позволило установить, что качество полученных диффузионной сваркой твердофазных соединений выше, чем при сварке прокаткой. Однако когда необходимо получить листовые пористые элементы значительных размеров, применять прокатные станы более рационально, но при больших обжатиях брикета сеток и малым допуском по толщине ПСМ — это единственное, что возможно. Сварка прокаткой брикета сеток в зависимости от химического состава материала проволок и имеющегося на предприятии оборудования может быть реализована по трем технологическим схемам: на вакуумных прокатных станах, в среде аргона контролируемой чистоты и в вакуумированных конвертах.

Разработанные в нашей стране вакуумные станы, относящиеся к типу «валки — камера», позволяют вести нагрев, прокатку и охлаждение заготовок при степени разряжения в камере 1×10^{-2} Па [18], что дает возможность применять их для сварки сеток из титановых сплавов при получении пористых элементов. Технологический процесс изготовления ПСМ на вакуумном стане осуществляется следующим образом: после того как будут установлены в камерах заданный вакуум и требуемая температура в печи, из загрузочной камеры с помощью манипулятора и подвижного стола брикет сеток подают в нагревательное устройство, где выдерживают его в течение 5...10 мин. Затем заготовки направляют во вращающиеся валки, между которыми в процессе обжатия брикета сеток происходит сварка проволок в местах их совместной пластической деформации. После этого пористые элементы манипулятором помещают в холодильник, остывшие изделия извлекают из камеры и подвергают контролю.

Сварку прокаткой в среде аргона контролируемой чистоты осуществляли на установке «Атмосфера-1», снабженной реверсивным станом ДУ0-90 [17]. Камеру предварительно вакуумируют до степени разряжения 1 Па, затем 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 повышения температуры заготовок используется индукционное электронагревательное устройство, установленное рядом с рабочей клетью стана. Обслуживающий персонал в специальных скафандрах выполняет все операции по загрузке заготовок, нагреву и прокатке. В рассмотренных технологических процессах, обладающих рядом преимуществ, требуется применять дорогостоящее уникальное оборудование, использовать которое целесообразно только при получении ПСМ на основе химически активных металлов, таких как титан и молибден.

Сварка прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток из стали марки I2X18H10T [19] позволяет получать пористые элементы, обладающие достаточно высокими механическими и технологическими свойствами. Существенным преимуществом этого процесса является то, что его можно реализовать на любом стане для листовой прокатки. Процесс изготовления ПСМ в вакуумированных конвертах происходит в следующей последовательности: брикеты сеток с обкладками помещают в оболочки из листовой малоуглеродистой стали или стали марки I2X18H10T, которые затем вакуумируют, заваривают и нагревают в печи, расположенной рядом с рабочей клетью стана, а далее деформируют между валками до заданной величины. После охлаждения конверт вскрывают на ножницах и извлекают полученный ПСМ.

Пористые элементы можно изготавливать диффузионной сваркой на стандартном оборудовании (СДВУ-2). При этом брикет нагревают в индукторе, а требуемое обжатие обеспечивают осадкой, при которой ход пуансона ограничивается с помощью специальной оснастки.

Обсуждение результатов исследования. Газовый анализ образцов из титанового сплава BT2, результаты которого приведены в таблице, позволил установить, что при нагреве в конвертах до температуры $T \geq 1173\text{K}$ содержание O_2 в проволоках возросло в 1,5–2 раза, а H_2 — более чем в 10 раз. В образцах, нагретых в индукторе СДВУ-2, в печах вакуумного стана и установки «Атмосфера–1», обнаружено меньшее насыщение кислородом.

Газонасыщение проволоки из титанового сплава при нагреве

Технологическая схема нагрева	Температура, К	Содержание газов, %		
		O_2	H_2	N_2
В состоянии поставки	–	0,15	0,0026	0,020
Вакуумированные конверты	1123	0,22	0,0077	0,025
	1173	0,30	0,030	0,025
	1223	0,22	0,036	0,025
В индукторе установки СДВУ-2	1123	0,26	0,0033	0,020
	1173	0,16	0,0030	0,025
	1223	0,21	0,0028	0,025
В печи вакуумного прокатного стана типа «валки — камера»	1123	0,15	0,0021	0,025
	1173	0,14	0,0024	0,020
	1223	0,13	0,0020	0,015
В печи установки «Атмосфера–1»	1123	0,15	0,0034	0,020
	1173	0,15	0,0037	0,020
	1223	0,16	0,0037	0,020

Резкое увеличение количества водорода в титане при $T \geq 1123\text{K}$, видимо, можно объяснить повышением его содержания в конверте за счет разложения углеводородов, внесенных паромасляной вакуумной системой, а рост содержания O_2 в проволоках происходит в результате его высокого парциального давления. При нагреве в вакуумной и заполненной аргоном печах, а также в индукторе СДВУ-2 создаются меньшие парциальные давления кислорода. Кроме того, в процессе нагрева при постоянной откачке удаляются газы, проникающие в камеру в результате натекания и разложения углеводородов, чем, очевидно, и можно объяснить меньшее количество H_2 и O_2 в образцах. Содержание N_2 практически не изменяется даже при нагреве в конвертах, что объясняется относительно низкой температурой и малым временем нагрева [20].

Для того чтобы исследовать влияние условий термической обработки на механические свойства проволок, их испытывали на растяжение после нагрева на вышеприведенных режимах. Анализ полученных диаграмм растяжения проволок $\sigma_{\text{в}}(e)$ (рис. 1), где e — относительное удлинение при растяжении, определяемое как $e = \Delta l/l_0$, позволил установить, что величина предела прочности практически не зависит от условий нагрева, а относительное удлинение образцов (после разрушения δ — на рис. 1 обозначено (*)) существенно снижается при $T > 1173\text{K}$ с увеличением длительности термообработки из-за образования крупнозернистой структуры [21]. Нагрев в вакуумированных конвертах приводит к существенному снижению пластичности проволок во всем диапазоне исследуемых температур вследствие насыщения их водородом и кислородом [22].

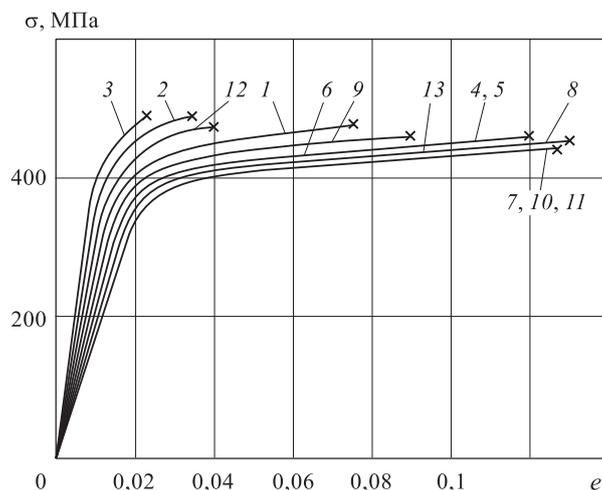


Рис. 1. Диаграммы растяжения проволок из титанового сплава марки ВТ2 после нагрева до температур: в вакуумированных конвертах — 1123К (1), 1173К (2), 1223К (3); в печи установки «Атмосфера-1» — 1123К (4), 1173К (5), 1223К (6); в печи вакуумного стана — 1123К (7), 1173К (8), 1223К (9); в камере СДВУ-2 — 1123К (10), 1173К (11), 1223К(12); в состоянии поставки (13)

Механические свойства ПСМ в плоскости листа определяли путем испытания на одноосное растяжение образцов, вырезанных в направлении проволок одного из слоев сеток. При построении диаграмм растяжения величину напряжений определяли как отношение прикладываемой силы P к площади поперечного сечения образца, т. е.

$$\sigma = P / (h_{\text{п}} B),$$

где B — ширина образца, мм; $h_{\text{п}}$ — толщина образца, мм.

Диаграммы растяжения ПСМ в направлении проволок, полученных сваркой прокаткой на вакуумном стане и на установке «Атмосфера-1» при $T = 1173\text{K}$ восьми слоев сетки с размером ячейки $a = 5$ мм и диаметром проволок 1,1 мм из титанового сплава ВТ2 при параллельном взаимном расположении, приведены на рис. 2. Полученные данные показывают, что с увеличением относительного обжатия ε брикета сеток в процессе сварки происходят увеличение модуля упругости и предела прочности, а также снижение относительного удлинения после разрушения. Кроме того, было отмечено, что механические свойства ПСМ на основе титанового сплава ВТ2, полученных сваркой прокаткой на вакуумном стане и в инертной среде контролируемой чистоты, примерно одинаковы.

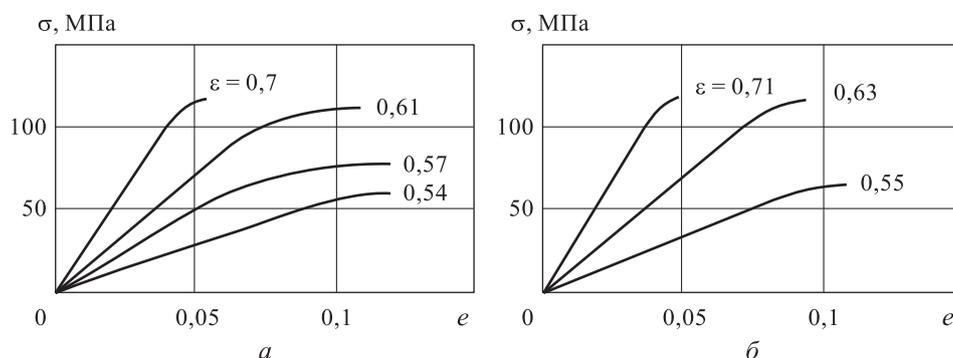


Рис. 2. Диаграммы растяжения ПСМ из титанового сплава марки ВТ2, полученных сваркой прокаткой брикета сеток при относительном обжатии ε :

a — в среде аргона на установке «Атмосфера-1»; b — на вакуумном стане, относящемся к типу «валки — камера»

Закключение. Проведенный анализ процессов, протекающих на границе металл — оксид и оксид — газовая фаза, позволил установить, что в зависимости от структуры сплава, температуры нагрева, состава и парциального давления компонентов контролируемой среды, можно обеспечить не только дополнительное окисление или утонение оксидных пленок, но и газонасыщение проволок.

Сварка прокаткой брикета сеток в зависимости от химического состава материала проволок и имеющегося на предприятии оборудования может быть реализована по трем технологическим схемам: на вакуумных прокатных станах, в среде аргона контролируемой чистоты и в вакуумированных конвертах. Сварка прокаткой в вакуумированных конвертах брикета сеток из стали марки 12Х18Н10Т позволяет получать пористые элементы, обладающие достаточно высокими механическими и технологическими свойствами. Существенное преимущество этого процесса — возможность реализации на любом стане для листовой прокатки.

Газовый анализ образцов из титанового сплава ВТ2 после нагрева при температурах 1123, 1173 и 1223К в вакуумированных конвертах в печи показал, что при нагреве в конвертах до температур $T \geq 1173\text{К}$ содержание O_2 в проволоках возросло в 1,5–2 раза, а H_2 — более чем в 10 раз. В образцах, нагретых в индукторе СДВУ-2, в печах вакуумного стана и установки «Атмосфера-1», обнаружено меньшее насыщение кислородом. При этом нагрев в вакуумированных конвертах приводит к существенному снижению пластичности проволок во всем диапазоне исследуемых температур вследствие их насыщения водородом и кислородом.

Вакуумный стан типа «валки — камера», установка «Атмосфера-1», заполненная аргоном контролируемой чистоты и снабженная прокатным станом, обеспечивают необходимые условия для изготовления сваркой прокаткой ПСМ из титанового сплава марки ВТ2.

Проведенные исследования влияния состава контролируемой газовой среды и температуры на качество твердофазных соединений проволок при изготовлении пористых сетчатых материалов позволили сделать следующие выводы:

– для изготовления ПСМ из титанового сплава ВТ2 на вакуумном стане и диффузионной сваркой необходимо обеспечить глубину вакуума не ниже 1×10^{-2} Па, а температура в процессе сварки должна составлять $T = 1170 \dots 1200\text{К}$;

– сварку прокаткой сеток из титанового сплава ВТ2 на установке «Атмосфера-1» необходимо выполнять в камере с предварительным вакуумированием до степени разряжения не ниже 1 Па и последующим заполнением аргоном, содержащем: 0,001 % O_2 , 0,005 % H_2 , 0,01 % N_2 , и 0,005 % H_2O , при температуре $T = 1170 \dots 1200\text{К}$;

– диффузионную сварку сеток из стали марки 12Х18Н10Т целесообразно осуществлять на стандартном оборудовании (СДВУ-2) при температуре $T = 1370 \dots 1420\text{К}$ в вакууме не ниже 10^{-2} Па, а сварку прокаткой в конвертах — при температуре $T = 1450 \dots 1470\text{К}$ в вакууме не ниже 1 Па.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: Справочник*. Москва, Металлургия, 1987, 338 с.
- [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] Мусин Р.А., Анциферов В.Н., Квасницкий В.Ф. *Диффузионная сварка жаропрочных сплавов*. Москва, Металлургия, 1979, 208 с.
- [5] Кофстад П. *Высокотемпературное окисление металлов*. Москва, Мир, 1969, 392 с.
- [6] Бернар Ж., ред. *Окисление металлов. Теоретические основы*. Москва, Металлургия, 1968, 493 с.
- [7] Хауффе К. *Реакции в твердых телах на поверхности*. Москва, Иностранная литература, 1963, 275 с.
- [8] Липкин Я.Н., Девяткина Т.Е., Гольштейн Я.И. *Химическая обработка стального проката*. Киев, Техника, 1980, 133 с.
- [9] Гельман А.С. *Основы сварки давлением*. Москва, Машиностроение, 1970, 312 с.
- [10] Nam J.L. Mechanisms of surface removal from metals in space. *Aerospace engineering*, 1961, no. 5, pp. 82–87.
- [11] Слепуха В.Т. Образование поверхностей, свободных от окисных пленок при диффузионной сварке в вакууме. *Сварочное производство*, 1965, № 5, с. 38–40.
- [12] Гельман А.С., Большаков М.В. Влияние окисных пленок на формирование соединения при сварке металлов давлением. *Сварочное производство*, 1967, № 10, с. 23–26.
- [13] Пешков В.В., Холодов В.П., Воронцов Е.С. Кинетика растворения оксидных пленок в титане при диффузионной сварке. *Сварочное производство*, 1985, № 4, с. 35–37.
- [14] Арчаков Ю.И. *Водородоустойчивость стали*. Москва, Металлургия, 1978, 152 с.
- [15] Фролов В.В. *Травление металлов и неметаллических материалов*. Москва, Машиностроение, 1980, 60 с.
- [16] Мороз А.И. *Водород и азот в стали*. Москва, Металлургия, 1968, 281 с.
- [17] 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.
- [18] Крупнин В.П., Лепецкий Б.А., Зарапин Ю.Л. и др. *Вакуумные прокатные станы*. Москва, Машиностроение, 1973, 232 с.
- [19] Синельников Ю.И., Третьяков А.Ф., Матурин Н.И. и др. *Пористые сетчатые материалы*. Москва, Металлургия, 1983, 64 с.
- [20] Третьяков Ф.Е., Третьяков А.Ф., Жеребцов М.В., Бакотин В.В. *Производство сварных конструкций из титана для гальванических цехов*. Москва, ЦНИИТЭстройдормаш, 1979, 42 с.
- [21] Севереденко В.П., Жилкин В.З. *Основы теории и технологии волочения проволоки из титановых сплавов*. Минск, Наука и техника, 1970, 203 с.
- [22] Мороз Э.С. *Титан и его сплавы*. Ленинград, Судпромгиз, 1960, 516 с.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

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

Study of the influence of the controlled gas environment composition and temperature on the quality of solid-state wire bonds in the manufacture of porous mesh materials

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1005005, Russia

Porous mesh materials are designed for the manufacture of products with a given shape and size, as well as hydraulic, filtering, thermal and other properties. At the same time, they must have the necessary mechanical and technological properties, which are formed to a large extent by the quality of weld solid-state bonds of mesh wires. Findings of the research that the increase in the strength of wire bonds during manufacture of porous mesh materials is influenced by the conditions for removing oxide layers by means of choosing the optimal protective gas environment and heating temperature during welding. The analysis of the processes occurring at the boundary of the metal–oxide and oxide–gas phases made it possible to establish that, depending on the structure of the alloy, the heating temperature, the composition and partial pressure of the gas protective environment, not only additional oxidation or thinning of the oxide layers but also gas saturation of the work surface are possible. For the manufacture of sizeable sheet porous mesh materials with high accuracy in thickness, the use of welding by rolling in a protective gas environment is the only possible process. Depending on the chemical composition of the wires, it is possible to carry out mesh briquette rolling welding on vacuum rolling mills, in an argon atmosphere of controlled purity and in evacuated envelopes. Within the research, we studied the influence of the composition of the gas environment and the process temperature on the quality of weld bonds and found that it is advisable to manufacture VT2 alloy sheet porous mesh materials by hot rolling in a vacuum mill and in an inert gas environment with a controlled composition. Porous mesh materials made of 12Kh18N10T steel can be made by hot rolling in vacuum envelopes, and products with limited dimensions can be made by diffusion welding. The study also specifies the modes of technological processes for manufacturing porous mesh materials made of VT2 alloy and 12Kh18N10T steel by rolling welding and diffusion welding.

Keywords: porous mesh material, gas environment, vacuum, argon, welding, rolling mill, welded bond, strength

REFERENCES

- [1] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnik* [Porous permeable materials: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 338 p.
- [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] Musin R.A., Antsiferov V.N., Kvasnitskiy V.F. *Diffuzionnaya svarka zharo-prochnykh splavov* [Diffusion welding of heat-resistant alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 208 p.
- [5] Kofstad P. *Nonstoichiometry, diffusion, and electrical conductivity in binary metal oxides (Wiley series on the science and technology of materials)*. Wiley-

- Interscience, 1972, 382 p. [In Russ.: Kofstad P. Vysokotemperaturnoe okislenie metallov. Moscow, Mir Publ., 1969, 392 p.]
- [6] Bernar J., ed. *Okislenie metallov. Teoreticheskie osnovy* [Oxidation of metals. Theoretical basis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968, 493 p. (In Russ.).
- [7] Hauffe K. *Reaktionen in und an Festen Stoffen*. Springer Verlag, Berlin, 1955, 696 p. [In Russ.: Hauffe K. *Reaktsii v tverdykh telakh na poverkhnosti*. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1963, 275 p.]
- [8] Lipkin Ya.N., Devyatkina T.E., Golshteyn Ya.I. *Khimicheskaya obrabotka stalnogo prokata* [Chemical treatment of rolled steel]. Kiev, Tekhnika Publ., 1980, 133 p.
- [9] Gelman A.S. *Osnovy svarki davleniem* [Fundamentals of pressure welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 312 p.
- [10] Ham J.L. Mechanisms of surface removal from metals in space. *Aerospace engineering*, 1961, no. 5, pp. 82–87.
- [11] Slepukha V.T. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 1965, no. 5, pp. 38–40.
- [12] Gelman A.S., Bolshakov M.V. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 1967, no. 10, pp. 23–26.
- [13] Peshkov V.V., Kholodov V.P., Vorontsov E.S. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 1985, no. 4, pp. 35–37.
- [14] Archakov Yu.I. *Vodoroda ustoychivost stali* [Hydrogen resistant steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 152 p.
- [15] Frolov V.V. *Travlenie metallov i nemetallicheskih materialov* [Etching of metals and non-metal materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 60 p.
- [16] Moroz A.I. *Vodorod i azot v stali* [Hydrogen and nitrogen in steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968, 281 p.
- [17] Andronov E.V., Borisov A.Ya., Gertsik M.A., et al. *Metallurgiya (Metallurgy)*, 1969, no. 12, pp. 80–85.
- [18] Krupnin V.P., Lepetskiy B.A., Zarapin Yu.L., et al. *Vakuumnye prokatnye stany* [Vacuum rolling mills]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 232 p.
- [19] Sinelnikov Yu.I., Tretyakov A.F., Maturin N.I., et al. *Poristye setchatye materialy* [Porous mesh materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 64 p.
- [20] Tretyakov F.E., Tretyakov A.F., Zherebtsov M.V., Bakotin V.V. *Proizvodstvo svarnykh konstruksii iz titana dlya galvanicheskikh tsekhov* [Manufacture of welded titanium structures for electroplating shops]. Moscow, TsNIITEstroidormash Publ., 1979, 42 p.
- [21] Severedenko V.P., Zhilkin V.Z. *Osnovy teorii i tekhnologii volocheniya provoloki iz titanovykh splavov* [Fundamentals of the theory and technology of drawing wire from titanium alloys]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1970, 203 p.
- [22] Moroz E.S. *Titan i ego splavy* [Titanium and its alloys]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1960, 516 p.

Trtyakov 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