

На правах рукописи

УДК 621.791.18:621.793:620.17

Уваров Андрей Андреевич

**ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
АУСТЕНИТНАЯ СТАЛЬ – ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА НИКЕЛЯ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в АО «НИКИЭТ»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Черепнин Юрий Семенович
АО «НИКИЭТ», Главный Конструктор

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
ДОРОНИН Юрий Викторович
ООО «АЦГХ», начальник лаборатории сварки

кандидат технических наук
МИХЕЕВ Роман Сергеевич
МГТУ имени Н.Э.Баумана, доцент кафедры
технологий сварки и диагностики

Ведущая организация: **НИУ «МЭИ» (Москва)**

Защита состоится «22» марта 2018 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного
совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени. Н.Э. Баумана и
на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Коновалов А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. С развитием промышленности в России все большее применение находят трубчатые биметаллические переходники сталь-титан, позволяющие решить ряд технических задач, связанных с более эффективным и экономным использованием материалов. Например, в трубопроводных системах, теплообменных аппаратах, системах управления и защиты и т. д.

Химическая активность титана при высоких температурах, характер его взаимодействия с железом, в том числе ограниченная взаимная растворимость в твёрдом состоянии, наличие легкоплавкой эвтектики и ряда интерметаллидов создают значительные технологические трудности при изготовлении биметаллических соединений титана со сталью традиционными методами сварки плавлением. Поэтому актуальна задача по разработке способов получения надежных соединений титана со сталью методами сварки в твердой фазе.

В настоящее время успешно применяют диффузионную сварку для изготовления биметаллических переходников титан-сталь, но у данной технологии есть ряд недостатков. Во-первых, временное сопротивление у получаемых соединений не превышает в среднем 250 МПа, что ограничивает их применение, в частности, в реакторах нового поколения. Во-вторых, брак из-за несплошностей (недопрессовок), выявляемый при металлографическом и ультразвуковом контроле готовых изделий, составляет до 10 % от партии.

Известно, что для повышения механических свойств диффузионных соединений при сварке стали с титаном применяются промежуточные слои: пластичные металлы (никель, медь, алюминий, tantal, ниобий и др.) в виде фольги, проволоки, порошков и пленок, наносимых на соединяемые поверхности гальваническим методом или вакуумным напылением. Инновационным решением видится применение в качестве промежуточного слоя ультрадисперсного порошка (УДП) никеля. Благодаря сверхвысокой химической активности порошковых нанотел их применение позволяет снизить температуру диффузионной сварки на десятки и даже сотни градусов. При снижении температуры сварки разнородных материалов создаются благоприятные условия для ограничения образования интерметаллидных фаз в сварных соединениях. Как следствие, повышаются механические свойства соединений. Помимо вышесказанного, применение пластичных промежуточных слоев предупреждает появление несплошностей в сварных соединениях сложной конструкции. Литературные данные о применении УДП никеля при сварке титана со сталью не найдены.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и практической реализации способа получения соединений в трубчатых переходниках аустенитная сталь – титановый сплав методом диффузионной сварки с применением промежуточного слоя из УДП никеля.

Для достижения поставленной цели в рамках настоящей работы необходимо решить следующие теоретические и практические **задачи**:

1. Выполнить аналитический литературный и патентный обзор.

2. Провести теоретическое исследование с последующей экспериментальной отработкой на образцах с проведением механических испытаний и металлографических исследований.

3. По данным, полученным в ходе экспериментальной работы, провести расчеты параметров, характеризующих условия получения качественной сварки давлением разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью, а также расчет одного из параметров режима сварки – времени выдержки.

4. Разработать основы технологии диффузионной сварки биметаллических переходников с применением промежуточного слоя из УДП никеля с последующим практическим применением разработанной технологии.

Методы исследований: поставленные задачи решали путем проведения экспериментальных и теоретических исследований. В работе использовали теоретические положения по диффузионной сварке, опубликованные в литературе, производственный опыт АО «НИКИЭТ» по разработке технологии и конструкции и изготовлению переходников сталь-титан и сталь-цирконий, а также результаты анализа публикаций по тематике работы. Экспериментальные исследования проводили на опытном производстве АО «НИКИЭТ». В ходе работы применяли методы определения временного сопротивления сварных соединений, методы современного металлографического и рентгеноспектрального анализа.

Достоверность и обоснованность результатов исследования, полученных выводов и рекомендаций подтверждается применением аттестованных приборов и методик, хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, положительными результатами производственных испытаний опытных образцов и изделий.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1) установлено, что при диффузионной сварке в соединениях аустенитной стали с титановым сплавом через промежуточный слой из УДП никеля с ростом температуры с 760 °С до 790 °С при выдержке 15 минут интерметаллидная прослойка вырастает с 18 мкм до 22 мкм, при температуре 815 ± 5 °С образуется жидкая эвтектика между титаном и никелем. Таким образом, определена максимальная температура сварки равная 815 ± 5 °С;

2) установлено, что величина диффузионной зоны во время выдержки при диффузионной сварке аустенитной стали с титановым сплавом через промежуточный слой из УДП никеля при температуре 790 °С растет в среднем со скоростью 6,5 мкм/мин. Это позволяет осуществить выбор необходимого времени выдержки для формирования оптимальной величины диффузионной зоны сварного соединения;

3) изучено строение и установлен фазовый состав микроструктуры диффузионной зоны соединений аустенитной стали с титановым сплавом, полученных диффузионной сваркой через промежуточный слой из УДП никеля: между слоем никеля и титановым сплавом наблюдается

интерметаллидная прослойка Ti_2Ni , зона взаимодиффузии и слой $(\alpha+\beta)$ - Ti толщиной, образованный вследствие диффузии никеля в титан. Наличие такого строения диффузионной зоны характерно для качественного и прочного сварного соединения;

4) проведен сравнительный анализ исходной технологии сварки и предлагаемого способа, который показал, что временное сопротивление диффузионных соединений аустенитной стали с титановым сплавом, полученных через УДП никеля, на 24 % выше, чем у диффузионных соединений, полученных без применения УДП. При этом установлено, что при температуре сварки 790 °С временное сопротивление диффузионных соединений не зависит от времени выдержки в пределах 20 минут.

Практическая значимость работы: разработаны и обоснованы оптимальные условия диффузионной сварки переходников аустенитная сталь - титановый сплав через промежуточный слой из УДП никеля, обладающих повышенными механическими свойствами. С использованием полученных результатов изготовлена партия переходников сталь-титан. Переходники были приняты Заказчиком и будут использованы при создании модели высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах.

Результаты работы по диффузионной сварке с использованием УДП никеля будут использованы в АО «НИКИЭТ».

Личный вклад автора: автор выполнил литературный обзор по теме диссертации, провел анализ существующих актуальных технологических проблем в производстве переходников сталь-титан и предложил способ для их решения с помощью использования УДП никеля. Автором лично проведены все описанные в работе эксперименты по диффузионной сварке образцов и технологических переходников и определены оптимальные режимы диффузионной сварки и материал промежуточного слоя для новой технологии. Диссидентом проведен анализ результатов металлографических, рентгеноспектральных исследований и механических испытаний соединений экспериментальных образцов и переходников. Автор принимал непосредственное участие в изготовлении по разработанной технологии переходников для модели высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах. Автор провел расчетные и теоретические оценки параметров, характеризующих получение качественного соединения диффузионной сваркой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа микроструктуры и строения диффузионной зоны соединения, механических испытаний на временное сопротивление соединений аустенитной стали с титановым сплавом, полученных диффузионной сваркой с применением УДП никеля.

2. Результаты расчета параметров, характеризующих качество соединения, полученного диффузионной сваркой с применением УДП никеля: длительность взаимодействия, длительность схватывания контактных поверхностей по всей площади соединения, длительность релаксации напряжений в зоне контакта, длительность инкубационного периода.

3. Технологическую схему и результаты апробации метода сварки с использованием УДП никеля для конкретного изделия.

Апробация работы: основные положения и результаты работы представлены на научных мероприятиях:

- 14-й научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта» (Санкт-Петербург, 2012);
- международных научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одинга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2014);
- конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», АО «НИКИЭТ» (Москва, 2014);
- конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», АО «НИКИЭТ» (Москва, 2017).

По теме диссертации автором подготовлены 10 публикаций, включая 5 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России. Получен патент RU 2617807 «Способ диффузионной сварки трубчатых переходников титан – нержавеющая сталь» от 22.01.2016 и подана заявка на второй патент. Общий объем равен 2,465 п.л./1,1 п.л.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 77 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается сущность исследуемой проблемы, обоснована актуальность диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, определяющие научную новизну и практическую ценность работы, сформулированы цели исследования.

В первой главе приведен литературный обзор по проблеме сварки титана со сталью, в котором показано, что из-за их ограниченной взаимной растворимости не применяют сварку плавлением, так как в зоне соединения образуется эвтектика и интерметаллические фазы. Пайка переходников сталь-титан высокозатратна из-за большой стоимости серебряных припоев и не обеспечивает необходимый уровень коррозионных свойств соединений. Поэтому переходники сталь-титан изготавливают сваркой в твердой фазе. В промышленности широкое применение нашел способ диффузионной сварки в вакууме при температуре сварки $T_{\text{св}} < 0,7T_L$ (температура ликвидуса наиболее легкоплавкого сплава). Способ имеет ряд ключевых преимуществ: созданы условия для ограничения образования интерметаллических фаз в соединении, надежная защита от атмосферы, высокое качество соединения с сохранением исходных свойств и структуры, отсутствие пор, трещин, короблений. В главе рассмотрены механизмы формирования соединения при диффузионной сварке, основные закономерности процесса диффузии в металлах, процессы и факторы, обуславливающие получение соединения диффузионной сваркой.

Объектом исследования в работе является биметаллический переходник аустенитная сталь – титановый сплав (Рисунок 1). Переходник представляет собой нахлесточное (коаксиальное) сварное соединение, наружная часть которого выполнена из аустенитной стали, а внутренняя – из титанового сплава. Изготавливают переходник методом дорновой диффузионной сварки с механическим подкреплением, разработанном в АО «НИКИЭТ».

Схема сборки и сварки показана на Рисунке 2.

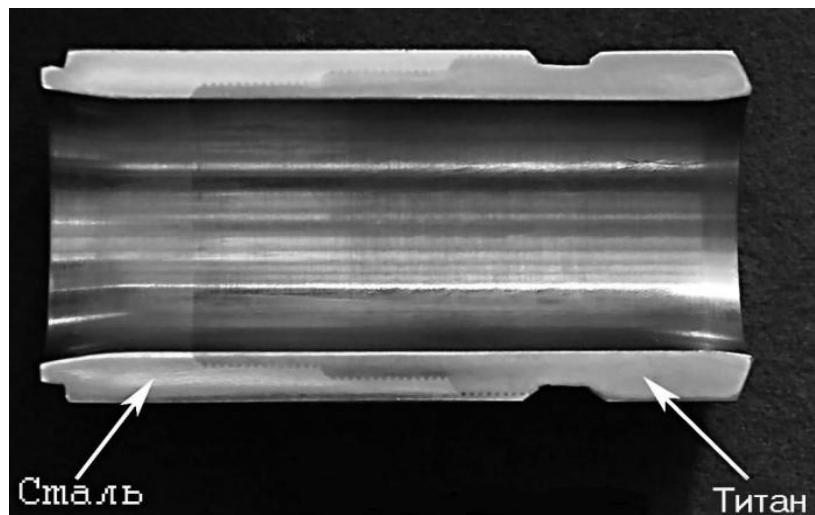


Рисунок 1. Биметаллический переходник

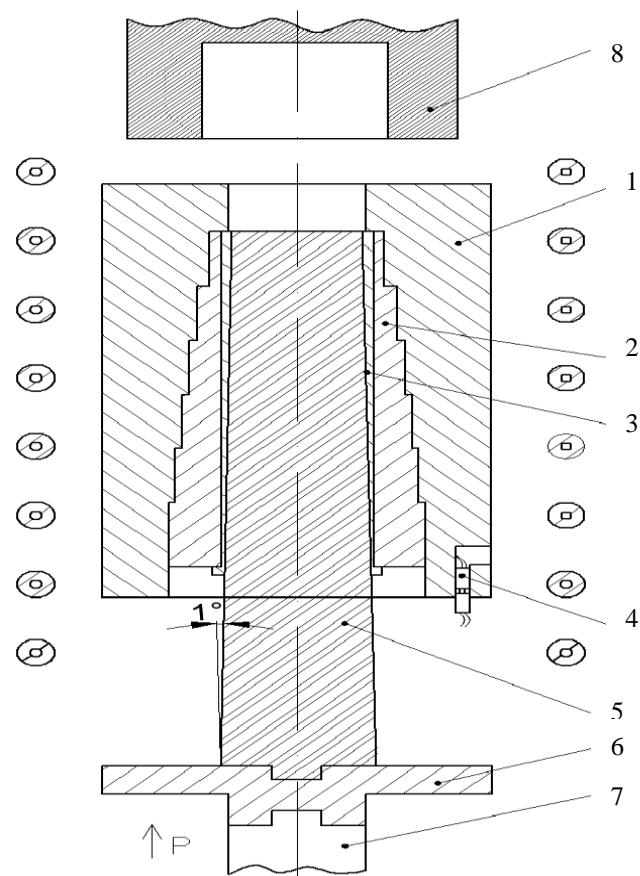


Рисунок 2. Принципиальная схема сборки и сварки переходников сталь-титан:
1 – стальной штуцер; 2 – ниппель из сплава ПТ-3В; 3 – втулка из Ст3;
4 – ХА термопара; 5 – дORN из 12Х18Н10Т; 6 – технологическая подставка;
7 – подъемный шток; 8 – верхний упор

Для повышения конструкционной прочности сварку ведут по профилированной контактной поверхности. Деформацию в процессе сварки осуществляют запрессовкой конусного дорна. Нагрев ведется индукционным способом в вакууме.

У данной технологии есть ряд недостатков. Во-первых, как показал анализ литературных источников, временное сопротивление при растяжении у получаемых соединений не превышает в среднем 250 МПа, что может привести к их разрушению в особо жестких условиях эксплуатации (рисунок 3, *a*). Во-вторых, 5–10 % от партии изделий бракуется при металлографическом и ультразвуковом контроле из-за несплошностей (недопрессовок) и трещин (см. Рисунок 3, *б* и *в*).

Повысить временное сопротивление соединений и устраниТЬ недопрессовки можно путем применения при диффузионной сварке промежуточных слоев из пластичных металлов (никель, медь, алюминий, tantal, ниобий и др.) в виде фольги, проволоки, порошков и пленок, наносимых на соединяемые поверхности гальваническим методом или вакуумным напылением. В качестве перспективного промежуточного материала для пары сталь-титан можно предложить ультрадисперсный порошок (УДП) никеля. Он обладает высокой химической активностью за счет большого количества свободной энергии, высокого уровня дислокаций в порошковом теле и большого количества центров схватывания при соединении с другими металлами. Такие свойства УДП никеля могут позволить снизить температуру сварки на 100–200 °С и, как следствие, ограничить образование интерметаллидных фаз в диффузионных соединениях.

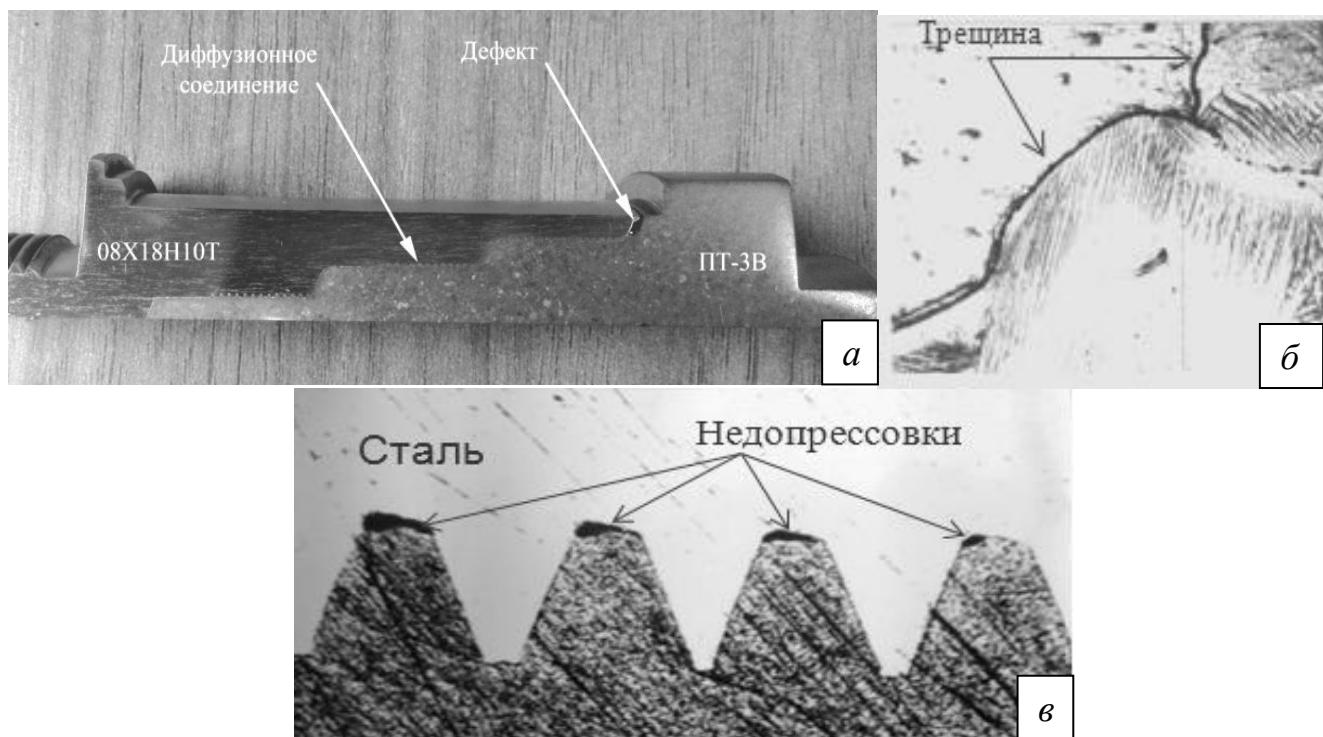


Рисунок 3. Дефекты сварных соединений, полученных диффузионной сваркой:
а – разрушение стыка, *б* – трещина; *в* – недопрессовки

В итоге, при использовании УДП никеля в качестве промежуточного слоя и правильном подборе режима диффузионной сварки существует перспектива повысить временное сопротивление сварных соединений сталь-титан. В литературных источниках соответствующие данные не найдены. Поэтому целесообразно проведение исследовательской работы в этом направлении.

Во второй главе проведена расчетно-экспериментальная работа по диффузионной сварке и исследованию образцов «сталь 08Х18Н10Т – сплав титана ПТ-3В», сваренных с использованием промежуточного слоя из УДП никеля с целью подбора оптимальных режимов сварки.

Экспериментальные образцы представляли собой цилиндрические заготовки диаметром $\varnothing 14$ мм, длиной $L=30$ мм из титанового сплава марки ПТ-3В и стали марки 08Х18Н10Т, полученные диффузионной сваркой (Рисунок 4).

В качестве промежуточного слоя использован УДП никеля, прокатанного в ленту толщиной 60 мкм и пористостью 55 %. Размер частиц исходного УДП составил менее 0,01 мкм.

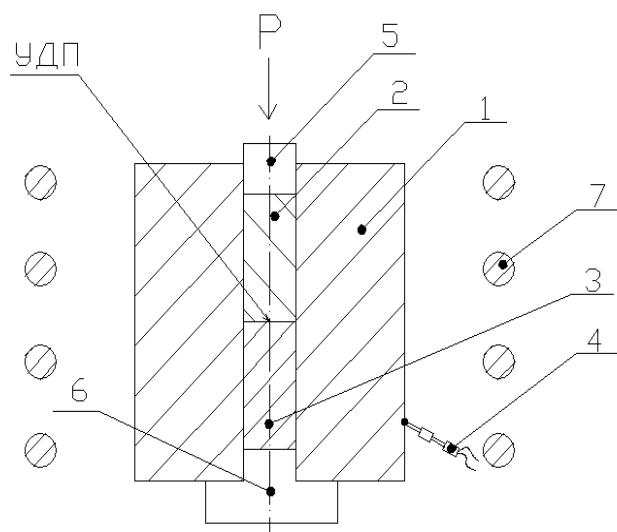


Рисунок 4. Схема диффузионной сварки экспериментальных образцов:

- 1 – стальной бандаж;
- 2 – образец из стали марки 08Х18Н10Т;
- 3 – образец из сплава ПТ-3В;
- 4 – термопара хромель алюмель;
- 5 и 6 – верхняя и нижняя заглушки;
- 7 – медный индуктор

Образцы были сварены на трех режимах:

- 1) $T = 965 \pm 20$ °C, выдержка $t = 1\text{--}3$ мин;
- 2) $T = 890 \pm 20$ °C, выдержка $t = 1\text{--}3$ мин;
- 3) $T = 760\text{--}790$ °C, выдержка $t = 5\text{--}20$ мин (Таблица 1).

Величина сварочного давления при этом была фиксированной и не менялась. Режимы подобраны на основании производственного опыта, анализа литературных данных и диаграмм состояния двойных металлических систем.

Проведено металлографическое исследование микроструктуры сваренных образцов. Образцы запрессовали в автоматическом гидравлическом прессе для горячей запрессовки образцов SIMPLIMET 1000. Шлифы приготовили на полуавтоматическом шлифовально-полировальном станке EcoMet 250. Финишную полировку провели на активном коллоидном кварце зернистостью 0,05 мкм. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе марки Неофот-2 при 50- и 250-кратном увеличении и на растровом электронном микроскопе CamScan-4DV, оборудованном спектрометрическими приставками (энергодисперсионной и волновой) для проведения рентгеноспектрального микроанализа INCA Energy и Inca Wave.

Таблица 1.
Перечень образцов и режимы сварки

Номер образца	Режим сварки	
	Температура, °C	Выдержка, мин
1	965 ±10	1
2	890 ±10	1
3	965 ±10	3
4	890 ±10	3
5	790 ±10	10
6	790 ±10	5
7	790 ±10	20
8	760 ±10	15
9	790 ±10	15
10	820 ±10	15

Образцы, сваренные на режимах 890 и 965 °C с выдержкой в течение 1 мин, имеют широкий слой интерметаллидных фаз шириной 28–32 мкм. При повышении времени выдержки до 3 мин образовалась эвтектика шириной до 152 мкм (Рисунок 5).

Образцы, сваренные на режимах 760–790 °C (Рисунок 6), имеют многослойную структуру, отличающуюся от традиционной микроструктуры диффузионного соединения сталь-титан. Со стороны стали наблюдается слой никеля толщиной в среднем 40 мкм. Отсутствует слой α -Fe и β -Ti, характерные для диффузионного соединения стали с титаном, что указывает на отсутствие взаимодиффузии стали и титана через слой никеля. Между слоем никеля и титановым сплавом наблюдается интерметаллидная прослойка Ti_2Ni толщиной до 12 мкм, зона взаимодиффузии толщиной 10 мкм и слой ($\alpha+\beta$)-Ti толщиной 30 мкм, образованный вследствие диффузии никеля в титан.

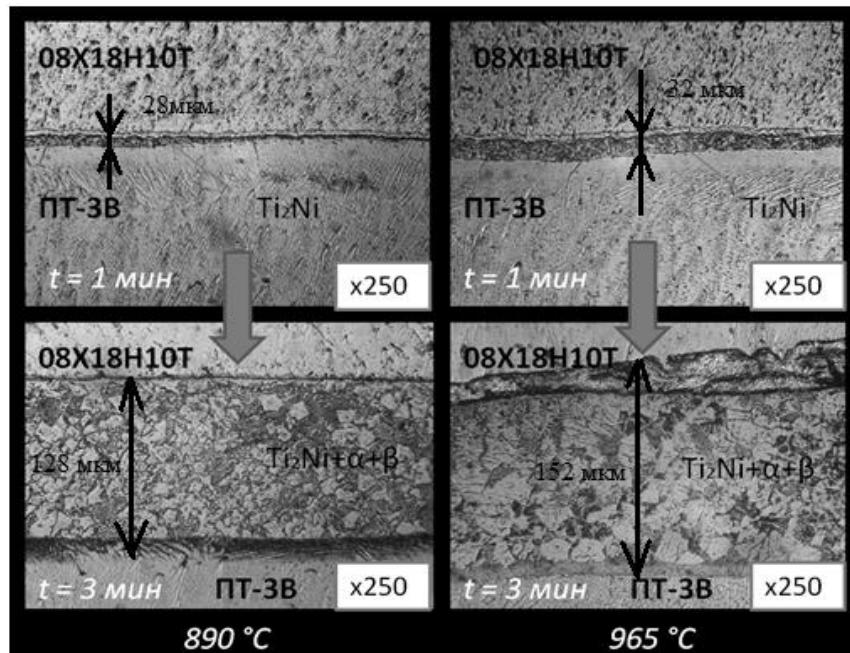


Рисунок 5. Микроструктура образцов № 1–4, выполненных через прослойку из УДП никеля, при ув. 250

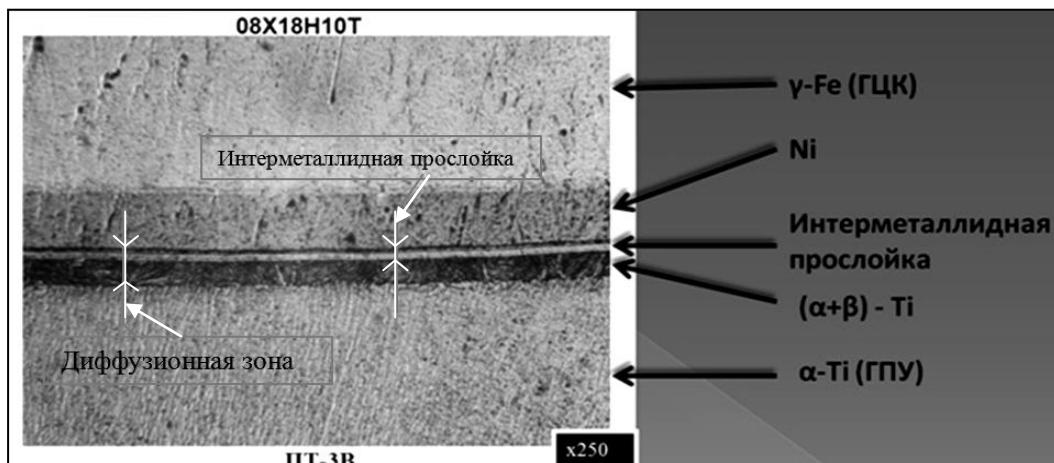


Рисунок 6. Строение диффузионной зоны соединения сталь-титан, выполненного через прослойку из УДП никеля на режиме $T = 790 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 10 \text{ мин}$

Построены графики зависимости величины диффузионной зоны от времени выдержки и величины интерметаллидной прослойки от температуры (см. Рисунок 7). При повышении температуры сварки и времени выдержки идет увеличение ширины диффузионной зоны и интреметаллидной прослойки.

Проведены рентгеноспектральные исследования образцов. Рентгеноспектральный анализ показал:

1. УДП никеля активно взаимодействует с соединяемыми материалами. Как видно из графиков концентрации элементов, никель активно диффундирует в направлении как титана, так и стали на расстояние 30–40 мкм.

Взаимодиффузия Ti и Fe практически отсутствует, что обуславливает отсутствие α -Fe и β -Ti структур в переходной зоне (см. Рисунок 8).

2. Высокотемпературные режимы сварки ($T = 890$ °C и $T = 965$ °C) при времени выдержки 3 мин привели к нарастанию хрупких фаз в соединении, предположительно интерметаллидов или эвтектики.

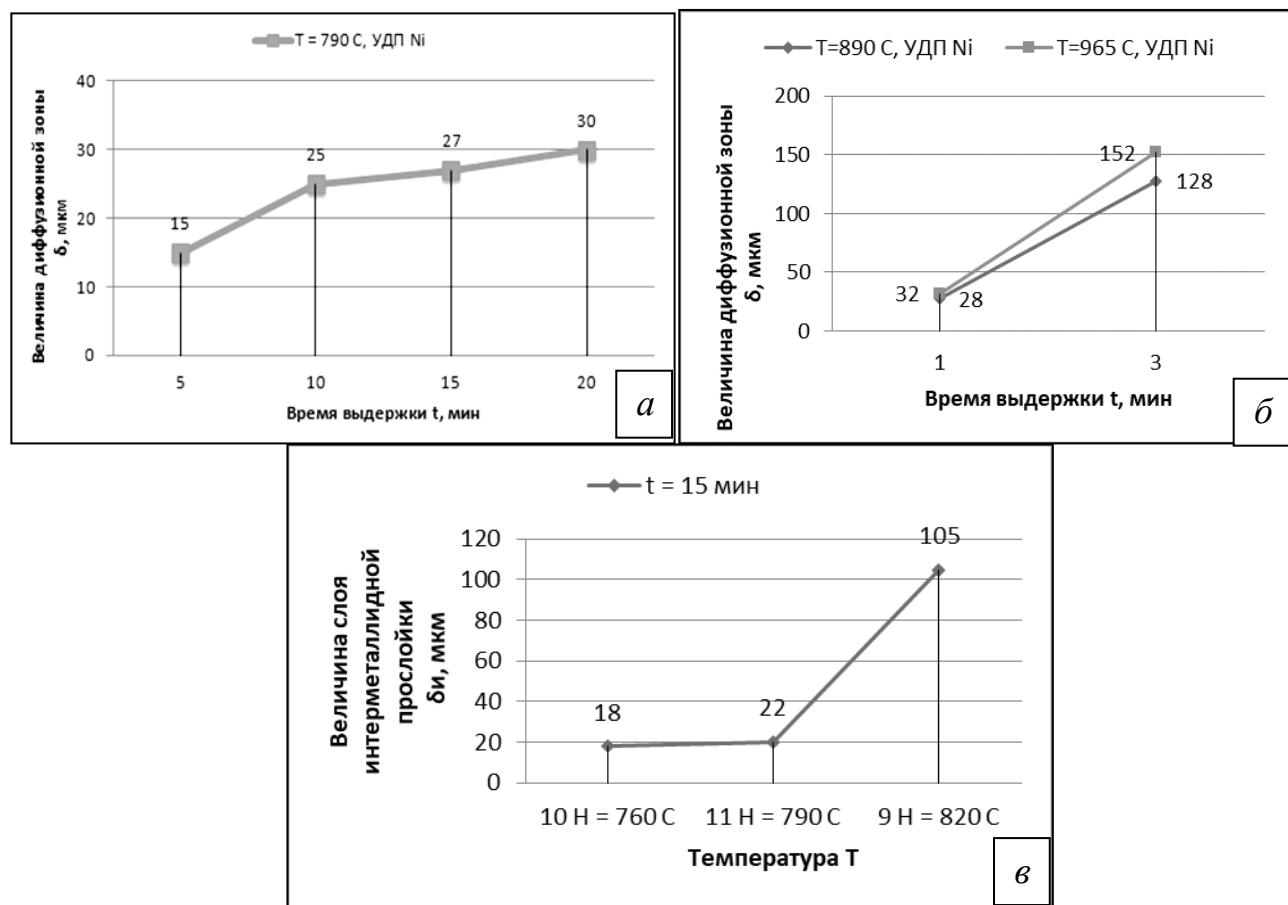


Рисунок 7. Графики зависимости величины диффузионной зоны от времени выдержки (а, б) и величины интерметаллидной прослойки от температуры (в)

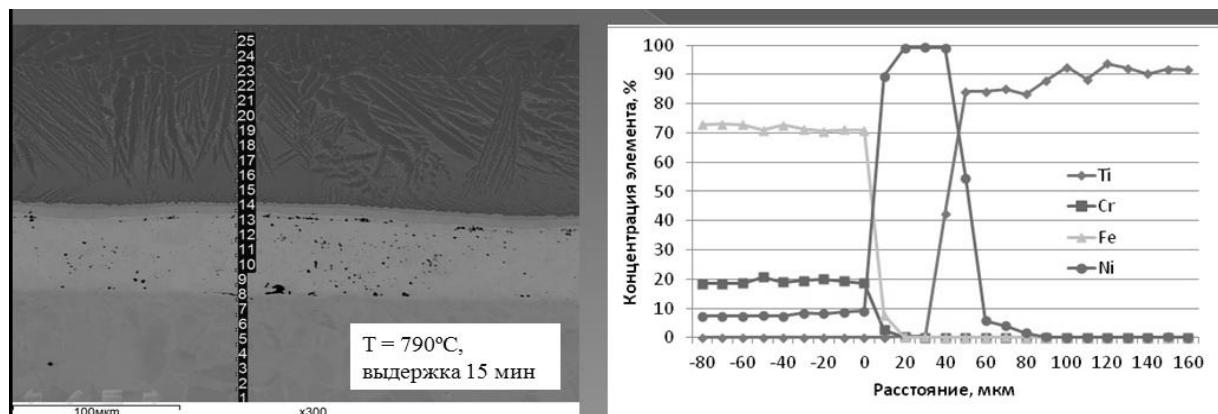


Рисунок 8. Результаты рентгеноспектральных исследований образцов № 8, 9

Для механических испытаний на временное сопротивление (σ_v) дополнительно были сварены 11 образцов. Испытания проводили согласно ГОСТ 6996-66 при комнатной температуре на разрывной машине стандартного типа.

В Таблице 2 представлены результаты механических испытаний на временное сопротивление разрушению при растяжении образцов, полученных диффузионной сваркой без применения УДП. Получить сварные соединения при $T = 790^{\circ}\text{C}$ без применения УДП не удалось.

Таблица 2.

Результаты испытаний на растяжение образцов, сваренных без применения промежуточных покрытий на высокотемпературном режиме

Маркировка образца	Режим сварки		Промежуточный слой	Предел прочности σ , МПа
	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Выдержка, мин		
1СТ	965 \pm 20	2	Отсутствует	253
2СТ	965 \pm 20	2	Отсутствует	265
3СТ	965 \pm 20	4	Отсутствует	282
4СТ	965 \pm 20	4	Отсутствует	207
В среднем				252

Режимы сварки и результаты испытаний образцов, сваренных с использованием УДП никеля, указаны в Таблице 3. Образцы разрушались по диффузионному соединению. Из Таблицы 3 видно, что у образцов, сваренных при $T = 790\pm10^{\circ}\text{C}$, величина временного сопротивления разрушению при растяжении составила в среднем 321 МПа. У образцов, сваренных при $T = 965^{\circ}\text{C}$ и $T = 890^{\circ}\text{C}$, низкий показатель σ_v – в среднем 96,5 МПа, что коррелирует с результатами металловедческих исследований, показавших наличие хрупкой сплошной эвтектики в диффузионных соединениях.

На основании полученных данных построен график (см. Рисунок 2.19 в Главе 2 диссертации), из которого видно, что при температуре сварки $T = 790\pm10^{\circ}\text{C}$ с увеличением времени выдержки σ_v практически не меняется, т. е. σ_v сварных соединений не зависит от времени выдержки в интервале 5–20 мин.

Таблица 3.

Результаты механических испытаний образцов

№ образца	Слой	Режим сварки		Предел прочности σ_v , МПа
		Температура, $^{\circ}\text{C}$	Выдержка, мин	
1М	Ni	965 \pm 20	3	140
2М	Ni	890 \pm 20	3	53
3М	Ni	790 \pm 10	5	311
4М	Ni	790 \pm 10	10	319
5М	Ni	790 \pm 10	15	307
6М	Ni	790 \pm 10	20	311

Из диаграмм (Рисунок 9) видно, что показатели временного сопротивления, полученные при использовании промежуточного слоя из УДП никеля, при $T_{\text{св}} = 790 \pm 10$ °С составили в среднем 312 МПа, что на 24 % выше, чем при сварке без применения ультрадисперсных порошков.

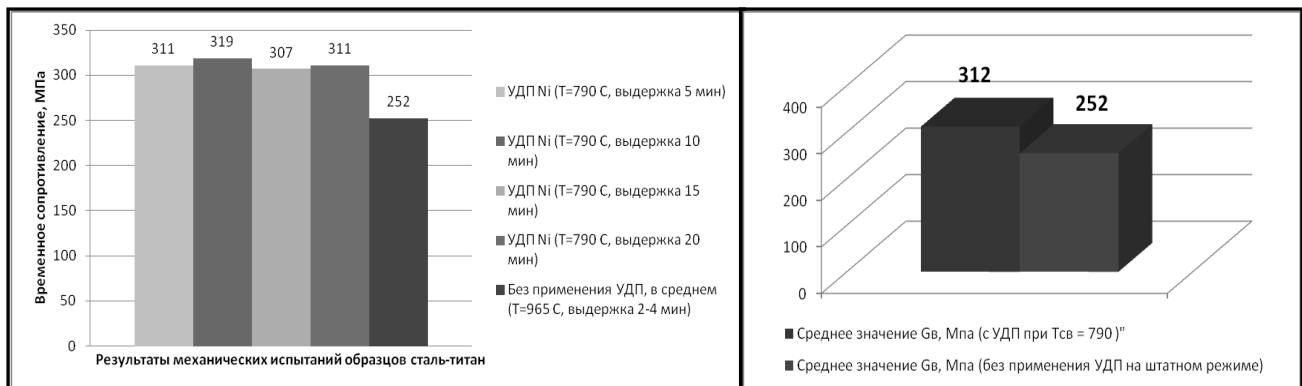


Рисунок 9. Диаграммы сравнения результатов испытаний образцов на временное сопротивление разрушению, сваренных с применением УДП и без него

По данным, полученным в ходе экспериментальной работы, проведены расчеты параметров, характеризующих получение качественного соединения диффузионной сваркой при $T = 790$ °С согласно теории Э.С. Каракозова, а также расчет оптимального времени выдержки.

Согласно Э.С. Каракозову условия получения качественной сварки давлением разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью можно записать в виде соотношений:

$$t_{\text{в}} \geq t_{\text{с}} \geq t_{\text{р}}; \quad (1)$$

$$t_{\text{и}} > t_{\text{н}} + t_{\text{ox}}; \quad (2)$$

$$t_{\text{с}} < t_{\text{и}}, \quad (3)$$

Время взаимодействия $t_{\text{в}}$ при данном способе сварки можно определить по формуле:

$$t_{\text{в}} = \delta_3 / v_{\text{д}} = 3 \cdot 10 = 0,3 \text{ с},$$

где δ_3 – величина запрессовки, мм; $V_{\text{д}}$ – скорость деформации, мм/с.

Время полного схватывания контактных поверхностей $t_{\text{с}}$ определяется необходимостью активации всей контактной поверхности, так как атомы, достигшие активированного состояния, мгновенно образуют межатомные связи, т. е. $t_{\text{с}} = t_{\text{а}}$. Данное утверждение верно для ювенильных поверхностей, в реальных условиях необходимо учитывать класс шероховатости поверхности ΔH (класс подготовки поверхности):

$$t_{\text{с}} = t_{\text{а}} + \Delta H / v_{\text{деф}} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Известно, что релаксация напряжений $t_{\text{р}}$ выражается зависимостью:

$$t_{\text{р}} = t_0 \exp(U/kT) = 8 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

Отсюда видно, что условие (1) соблюдается:

$$t_{\text{в}} > t_{\text{а}} > t_{\text{р}} = 0,3 > 4,2 \cdot 10^{-6} > 8 \cdot 10^{-9}$$

Время инкубационного периода для образования интерметаллидной прослойки определяем также по уравнению Аррениуса:

$$t_i = t' \exp(E/RT) = 159 \text{ с.}$$

Таким образом, разработанный способ удовлетворяет условиям (1) – (3) образования качественного соединения.

В итоге, на основе исследовательской работы и расчетов определены оптимальные режимы сварки: $T = 790 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а время выдержки не должно превышать t_i , т. е. 159 с. Тогда примем оптимальную величину времени выдержки равной $t = 120 \pm 20 \text{ с.}$ Показана перспектива применения ультрадисперсных порошков при сварке титановых сплавов со сталью.

В третьей главе представлены результаты практического применения способа диффузионной сварки сталь – титановых переходников с использованием промежуточного слоя из УДП никеля для конкретного изделия.

Для этих целей решено было изготовить по новой технологии технологический переходник сталь-титан штатной конструкции для тепловой модели проектируемого высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах (см. Рисунок 1). Конструкция переходника испытывает внутреннее давление порядка 5,2 МПа, большие осевые и вибрационные нагрузки. Переходник работает в газовой среде при температуре до $150 \pm 25^{\circ}\text{C}$ и в условиях резких перепадов температур.

Для реализации двойного типа соединения - механического и металлургического на внутренней ступенчатой поверхности стальной детали заготовки под сварку создан рельеф в виде кольцевых канавок.

Перед сборкой на внешнюю поверхность титановой детали и на внутреннюю поверхность стальной детали нанесли УДП в виде суспензии, состоящей из поливинилбутираля и 60–80 % УДП никеля. В процессе сварки при $T > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ поливинилбутираль разложился и полностью испарился из зоны соединения.

Диффузионную сварку проводили в камере установки СДВУ-100 в вакууме величиной $5 \cdot 10^{-5}$ торр. Режим сварки: $T_{\text{св}} = 790 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{выд}} = 120$ секунд. Нагрев осуществляли с помощью медного индуктора, создающего в металле заготовки вихревые токи Фуко. Сварочное радиальное давление на детали осуществляли путем запрессовки дорна с помощью подъемного штока. После запрессовки дорна выполняли выдержку при температуре сварки в течение 2 мин. Затем заготовки переходников охлаждали в вакууме до температуры $200 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем на воздухе.

Сваренный технологический переходник прошел неразрушающий контроль с положительным результатом, удовлетворяет требованиям нормативной документации по герметичности и отсутствию внутренних дефектов. Результаты механических испытаний подтвердили экспериментальные данные, полученные на образцах: временное сопротивление разрушению сварного соединения у технологического переходника составило 315 МПа, что на 24 % выше, чем у штатной продукции. Металлографический контроль показал, что недопрессовки отсутствуют.

Ширина диффузионной прослойки не превышает 20 мкм, а ширина интерметаллидного слоя находится в пределах 2–4 мкм, что удовлетворяет требованиям стандарта организации.

По разработанной технологии изготовлена партия из 5 переходников (Рисунок 10). Переходники были приняты заказчиком и будут использованы для создания и испытаний тепловой модели высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах.



Рисунок 10. Готовая партия переходников первого (a) и второго (б) типа

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного литературного и патентного обзора в диссертационной работе предложено и обосновано решение, заключающееся в использовании ультрадисперсного порошка никеля в качестве промежуточного слоя при диффузионной сварке переходников аустенитная сталь-титановый сплав. Проведено теоретическое исследование с последующей экспериментальной отработкой на образцах.

Впервые были проведены металлографические и рентгеноспектральные исследования соединений сталь-титан, полученных диффузионной сваркой с использованием промежуточного слоя из УДП никеля. Проведены испытания на микротвердость соединений. В результате установлены фазовый состав и закономерности роста диффузионной зоны и интерметаллидной прослойки в зависимости от параметров режима сварки. Результаты механических испытаний экспериментальных образцов показали, что временное сопротивление у сварных соединений стали с титаном, полученных диффузионной сваркой с использованием промежуточного слоя из УДП никеля, существенно выше, чем у сварных соединений, полученных диффузионной сваркой без использования УДП.

По данным, полученным в ходе экспериментальной отработки, подобраны оптимальные режимы сварки и проведены расчеты параметров, характеризующих условия получения качественного соединения разнородных материалов методом диффузионной сварки с УДП никеля.

Выполнено практическое апробирование новой технологии получения соединений. Изготовлен технологический переходник сталь-титан штатной конструкции для тепловой модели высокотемпературного реактора на быстрых нейтронах по новой технологии с применением режимов, подобранных в ходе экспериментальной работы. При этом предложена и опробована технология нанесения промежуточного слоя в виде суспензии на основе УДП никеля на внутреннюю поверхность стальной детали заготовки.

Предварительное частичное заполнение профиля свариваемых поверхностей технологического переходника УДП снизило требуемую величину пластической сварочной деформации деталей, необходимой для заполнения этого профиля. Благодаря данному технологическому приему в изготовленном переходнике отсутствуют несплошности (недопрессовки). Результаты механических испытаний подтвердили экспериментальные данные, полученные на образцах: временное сопротивление разрушению у переходника в среднем выше, чем у штатной продукции на 24 %.

По разработанной технологии для испытываемого изделия изготовлена и принята отделом технического контроля и Заказчиком партия сталь-титановых переходников.

Список публикаций по теме диссертации

1. Уваров А.А., Никитина Е.В. Разработка новой геометрии резьбы применительно к изготовлению биметаллических трубных переходников // НМТ-2010.: Материалы Всероссийской научно-технической конференции в 8 т. Москва. 2010. Т 1. С. 52–53. (0,13 п.л./0,1 п.л.).
2. Диффузионная сварка титанового сплава с аустенитной сталью через промежуточные покрытия / А.А.Уваров [и др.] Сварочное производство. 2012. № 5. С. 43–46. (0,25 п.л./0,05 п.л.)
3. Применение промежуточных покрытий при диффузионной сварке титанового сплава с аустенитной сталью / А.А.Уваров [и др.] Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика.: Материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. Санкт-Петербург, 2012. Ч.1. С. 200–204. (0,3 п.л./0,05 п.л.).
4. Уваров А.А., Никитина Е.В. Разработка технологии дорновой диффузионной сварки с механическим подкреплением применительно к биметаллическим трубным переходникам // XXXVIII Гагаринские чтения.: Научные труды Международной молодежной конференции. Москва, 2012. Т.1. С. 323–325. (0,2 п.л./0,15 п.л.).
5. Уваров А.А., Никитина Е.В. Определение коэффициентов взаимной диффузии в системе титан-медь // Сборник Научных трудов МАТИ. 2013. № 20. С. 65–70. (0,4 п.л./0,2 п.л.).
6. Технология изготовления биметаллических переходников аустенитная сталь – сплав α -титана / А.А.Уваров [и др.] Сварочное производство. 2014. № 4. С. 34–36. (0,2 п.л./0,05 п.л.).

7. Уваров А.А., Никитина Е.В. Исследование прочностных свойств сварных соединений аустенитной стали с титановым сплавом, полученных диффузионной сваркой через пористые ленты ультрадисперсных порошков // Механические свойства современных конструкционных материалов. Межд. науч. чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одинга.: сб. мат. Москва, 2014. С. 299–300. (0,125 п.л./0,1 п.л.).

8. Исследование свойств сварных соединений титана со сталью, полученных диффузионной сваркой через ультрадисперсный порошок никеля / А.А.Уваров [и др.] Титан. 2015. № 1. С. 23–29. (0,43 п.л./0,2 п.л.).

9. Способ диффузионной сварки трубчатых переходников титан - нержавеющая сталь: пат. 2617807 РФ / А.А.Уваров, С.Н. Новожилов, А.Н. Семенов; заявл. 22.01.2016; опубл. 26.04.2017. 3 с.

10. Исследования структуры сварных соединений сталь-титан, полученных диффузионной сваркой с применением ультрадисперсного порошка никеля / А.А.Уваров [и др.] Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. №8. С. 57-61. (0,43 п.л./0,2 п.л.).