

На правах рукописи

Хаз В

Хазгалиев Руслан Галиевич

Влияние аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi на прочность
диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку
никеля и сплава никель-хром

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте проблем сверхпластичности металлов
Российской академии наук (ИПСМ РАН), г. Уфа

Научный руководитель: **Мулюков Радик Рафикович**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ИПСМ РАН

Научный консультант: **Имаев Марсель Фанирович**, доктор физико-математических наук, в.н.с., ИПСМ РАН

Официальные оппоненты: **Алымов Михаил Иванович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ФГБУН Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института металловедения и физики металлов имени Г. В. Курдюмова ЦНИИчермет, профессор кафедры физического материаловедения НИТУ МИСиС

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится «26» марта 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.080.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, расположенном по адресу: 450001, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39, ученому секретарю диссертационного совета. Факс: +7 (347) 282-37-59

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИПСМ РАН по адресу: <http://www.imsp.ru/>

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Имаев Марсель Фанирович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В современных технических устройствах часто необходимо получить прочное соединение деталей из разнородных материалов, которое трудно получить сваркой плавлением. К таким парам материалов относятся, в частности, соединения титановых сплавов с нержавеющей стали. Титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, а нержавеющей стали – высокой износостойкостью и прочностью. Соединения этих материалов будут сочетать прочность стали с химической стойкостью титанового сплава. Конструкционные соединения деталей из титанового сплава и нержавеющей стали требуются, например, в парогенераторах и теплообменниках ядерных энергетических установок, криогенных структурах (гелиевые трубопроводы ускорительной техники), химической промышленности, для защиты стальных конструкций от химического воздействия.

Перспективным методом соединения этих материалов представляется сварка давлением, при которой можно избежать неконтролируемого образования охрупчивающих фаз, возникающих при сварке плавлением. Однако прямое соединение титанового сплава и нержавеющей стали сваркой давлением не удастся осуществить из-за образования хрупких интерметаллидных фаз системы Ti-Fe в зоне сварки. Избежать образования интерметаллидов можно используя прослойки между титановым сплавом и нержавеющей сталью, обеспечивающие соединение материалов и одновременно препятствующие образованию интерметаллидов системы Ti-Fe. Также на прочность соединения будут оказывать влияние напряжения в зоне сварки, возникающие при охлаждении изделий после сварки давлением.

Согласно [1] основными критериями выбора прослойки между титановым сплавом и нержавеющей сталью являются: обеспечение эффективного барьера диффузии титана и железа для исключения образования интерметаллидов системы Ti-Fe; промежуточное между титановым сплавом и нержавеющей сталью значение коэффициента термического расширения (КТР); достаточная пластичность для образования контакта свариваемых поверхностей. Прослойка должна соединяться сваркой давлением и с титановым сплавом, и с нержавеющей сталью. Известны способы соединения титанового сплава и нержавеющей стали с использованием различных прослоек [1-9]. Однако не удастся получить равнопрочное соединение, и разрушение происходит по одной из диффузионных зон. Причинами разрушения называют различие КТР соединяемых материалов и образующихся хрупких интерметаллидных фаз. При этом не учитывают возможные сильные изменения КТР в образующихся фазах в результате протекания в них фазовых превращений в интервале температур от комнатной до температур сварки. Так могут образовываться фазы, имеющие существенные изменения

КТР в результате низкотемпературных аустенитно - мартенситных превращений (АМП), или инварные сплавы с минимальным КТР. Эффект изменения КТР при АМП существует в соединениях Cu — Al — Ni, Cu — Al, Ti — Ni, Ni — Al, Co — Ni, а инварный эффект характерен для соединений Ti — Nb, Ni — Co — Fe, Fe — Ni и др.

Процесс сварки давлением титанового сплава и нержавеющей стали хорошо изучен при использовании никелевой прослойки в крупнозернистом (КЗ) состоянии [2-6]. Сварка давлением прослойки с соединяемыми материалами происходит по-разному. Если в диффузионной зоне прослойка / нержавеющая сталь не происходит образования интерметаллидных фаз, то в диффузионной зоне титановый сплав / прослойка образуются сплошные слои интерметаллидов TiNi, Ti₂Ni и TiNi₃ [2-6]. Две последние фазы могут охрупчивать соединение. На свойства образующихся при сварке давлением интерметаллидов влияют различные элементы в виде добавок в прослойку. Легирование прослойки никеля элементами: Cr, Fe, Al — приводит к повышению прочности соединения титановый сплав / нержавеющая сталь. Авторы работ не объясняют причин повышения прочности соединения при использовании сплава никеля с этими элементами [6-8]. Причиной разрушения соединения через прослойку, как из чистого никеля, так и сплава на основе никеля по интерметаллидным слоям называют отличия КТР исходных соединяемых материалов и хрупких фаз Ti₂Ni и TiNi₃.

Средний размер зерен прослойки также может влиять на качество сварного соединения. Интерес представляет соединение через наноструктурную (НС) прослойку. Уменьшение размера зерна до наноструктурного приведет к существенному повышению диффузионной активности материала [10]. Как следствие, это позволит снизить температуру сварки давлением и может привести к изменению процессов, происходящих при формировании сварного соединения, в частности, процессов образования интерметаллидных слоев в диффузионной зоне.

Для разработки технологии получения качественного соединения материалов необходимо детально рассмотреть механизм разрушения. Различие КТР титановых сплавов и сталей снижает никелевая прослойка, КТР которой имеет промежуточное значение. В процессе сварки давлением происходит образование хрупких интерметаллидных слоев Ti₂Ni и TiNi₃, однако в промежутке между Ti₂Ni и TiNi₃ образуется довольно пластичная фаза TiNi [2-8]. Указанные в литературе причины разрушения не достаточны для объяснения механизмов разрушения соединения титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку. В частности, при анализе разрушения не учитывается влияние скачка КТР при АМП в слое TiNi, протекающем при охлаждении с температуры сварки. Изменение прочности соединения при использовании прослоек из сплавов на основе никеля необходимо анализировать с точки зрения влияния легирующих добавок на состав, структуру и свойства

образующихся при сварке давлением интерметаллидов $TiNi$, Ti_2Ni и $TiNi_3$. Особое внимание необходимо обратить на изменение состава и свойств интерметаллида $TiNi$ при легировании никелевой прослойки различными элементами [11-13].

Цель работы:

Определение закономерностей формирования соединения сваркой давлением титанового сплава с нержавеющей сталью при использовании прослойки из никеля и никелевого сплава с различным размером зерна.

Задачи:

1. Определение влияния температуры сварки давлением на образование соединения титановый сплав ПТ-3В / прослойка никеля с различным размером зерна / нержавеющая сталь:
 - 1.1. Исследование микроструктуры и химического состава зон соединения титановый сплав ПТ-3В / прослойка и прослойка / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т;
 - 1.2. Изучение механических свойств сварного соединения титановый сплав ПТ-3В / прослойки / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т при комнатной температуре;
2. Определение влияние температуры сварки давлением на образование соединения титановый сплав ПТ-3В / прослойка никелевого сплава Х2Н98 / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т:
 - 2.1. Исследование микроструктуры и химического состава зон соединения титановый сплав ПТ-3В / прослойка и прослойка / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т;
 - 2.2. Изучение механических свойств сварного соединения при комнатной температуре;
3. Выявление структурных факторов, влияющих на разрушение соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из никеля и сплава Х2Н98;
4. Определение влияния времени и нагрузки при сварке давлением на образование соединения титановый сплав ПТ-3В / наноструктурная прослойка из никеля и сплава Х2Н98 / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т;
5. Определение влияния температуры выдержки после сварки давлением на механические свойства соединения титановый сплав ПТ-3В / наноструктурная прослойка из никеля и сплава Х2Н98 / нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

Методология и методы исследования. Для выполнения работы применяли апробированные методы исследования, такие как электронная микроскопия (ПЭМ и РЭМ), дифракция в обратно отраженных электронах (EBSD анализ), оптическая

металлография (ОМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), механические испытания на растяжение, измерение микротвердости. Интенсивную пластическую деформацию проводили методом кручения под высоким квазигидростатическим давлением. Сварку давлением образцов осуществляли на установке «АЛА-ТОО (тип ИМАШ 20-78)». Методологической основой исследований послужили научные труды отечественных и зарубежных научных школ в области металловедения, физики конденсированного состояния, физики прочности и пластичности.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением современных испытательных машин и регистрирующей аппаратуры при проведении экспериментальных исследований.

Научная новизна:

1. Наноструктурирование никелевой прослойки позволяет снизить температуру сварки давлением титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.
2. Эффект значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении слоя интерметаллидной фазы $TiNi$, образующейся при сварке давлением титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через никелевую прослойку, приводит к возникновению микротрещин в образующихся соседних слоях Ti_2Ni и $TiNi_3$ при охлаждении после сварки давлением и снижению прочности соединения.
3. Использование прослойки из хромсодержащего наноструктурного никелевого сплава Х2Н98 вместо никелевой прослойки приводит к уменьшению эффекта значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении интерметаллида $TiNi$ и к отсутствию микротрещин в слоях Ti_2Ni и $TiNi_3$. Хром из прослойки проникает в образующийся интерметаллид $TiNi$, что снижает температурный интервал АМП.

Теоретическая и практическая значимость. На прочность соединения титанового сплава и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением через никелевую прослойку, оказывает влияние не только разница КТР соединяемых материалов, но и КТР образующихся при сварке интерметаллидных фаз системы $Ti-Ni$ и эффект значительного изменения КТР при АМП интерметаллидного слоя $TiNi$.

Использование наноструктурных прослоек из никеля позволяет снизить температуру сварки давлением на 50 °С.

Использование прослойки из наноструктурного никелевого сплава Х2Н98 вместо никелевой прослойки приводит к повышению прочности сварного соединения.

При использовании и хранении изделий с соединением титанового сплава и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением через прослойку из никеля и сплава Х2Н98, следует контролировать температуру их хранения и эксплуатации. Снижение температуры хранения может привести к снижению прочности соединения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сваркой давлением титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через никелевую прослойку в наноструктурном состоянии получено соединение прочностью 390 МПа при температуре 700 °С, что на 50 °С ниже, чем при сварке давлением через крупнозернистую прослойку никеля.
2. Эффект значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении в слое интерметаллида TiNi, образующегося на границе титановый сплав – прослойка из никеля при сварке давлением, влияет на прочность соединения. Этот эффект приводит к образованию микротрещин в образующихся при сварке давлением смежных слоях интерметаллидов Ti₂Ni и TiNi₃. При использовании прослойки из сплава Х2Н98 в области соединения титановый сплав – прослойка после сварки давлением при 750 °С не обнаружено микротрещин, как в случае использования прослойки из никеля.
3. Использование в качестве прослойки вместо никеля сплава Х2Н98 в наноструктурном состоянии при сварке давлением титанового сплава и нержавеющей стали приводит к повышению прочности соединения до 490 МПа. Повышение прочности обеспечивается легированием хромом образующегося интерметаллида TiNi, что снижает температуру начала аустенитно-мартенситного превращения и, как следствие, ослабляет эффект значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении интерметаллида TiNi. В этом случае микротрещины в слоях Ti₂Ni и TiNi₃, снижающие прочность соединения, не обнаруживаются.
4. Температура хранения и эксплуатации может оказывать существенное влияние на прочность соединения титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением через прослойку из никеля или сплава Х2Н98. При снижении температуры выдержки в интервале температур 25...-10°С происходит падение прочности соединения. В результате выдержки при температуре 10 °С соединения через прослойку из никеля эффект значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении TiNi приводит к снижению прочности соединения до 200 МПа. Использование прослойки из сплава Х2Н98 позволяет уменьшить величину падения прочности соединения. Прочность такого соединения при охлаждении до -10 °С составляет 250...300 МПа.

Диссертационная работа выполнялась в рамках государственного задания ИПСМ РАН № АААА-А17-117041310221-5

Апробация работы

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и российских конференциях: II Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения», Абхазия, 16-22 мая 2011 г.; международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых

«Фундаментальная математика и ее приложение в естествознании», г. Уфа, 2-6 октября 2011 г.; международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы прочности», г. Уфа, 4-8 октября 2012 г.; открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы (УМЗНМ)», Уфа, 8-12 октября 2012 года; III-я Молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения» Абхазия, 9-14 сентября, 2013 г.; открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 6-10 октября 2014 г.; LVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», г. Севастополь, 24–27 мая 2016 г.; открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 3-7 октября 2016 г.; открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 1-5 октября 2018 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАК. Список основных публикаций приведен в конце списка литературы диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и списка используемой литературы. Общий объем диссертации 145 страниц, в том числе 74 рисунков, 9 таблиц, 2 приложения. Список литературы содержит 119 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении показана актуальность диссертационной работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования.

Первая глава представляет аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены проблемы соединения разнородных материалов на примере соединения титанового сплава и нержавеющей стали. Представлено практическое применение таких соединений. Показаны различные методы получения неразъемных соединений титанового сплава и нержавеющей стали. Описано использование прослоек других материалов в качестве барьера для образования интерметаллидов системы титан-железо. Проведен анализ литературы по соединению титановых сплавов и нержавеющей сталей с помощью никелевой прослойки.

Взаимная диффузия элементов между титановым сплавом и нержавеющей сталью осуществляется миграцией атомов поперек плоскости соединения и вызывает образование интерметаллидов на основе Fe - Cr - Ti и Fe - Ti в зоне реакции; эти хрупкие интерметаллиды ухудшают механические свойства образованного соединения [1-3]. Поэтому использование промежуточного материала, предотвращающего образование особо хрупких интерметаллидных фаз в процессе диффузионной сварки, имеет определяющее значение для качества сварного соединения. В этой связи никель может

рассматривать как полезный промежуточный материал, одновременно обеспечивающий удовлетворительную коррозионную стойкость. Никель имеет высокую растворимость в железе в твердом состоянии, а в диффузионной паре никель / нержавеющая сталь не образуются особо хрупкие интерметаллидные фазы. Двойная фазовая диаграмма Ni - Ti показывает, что с повышением содержания никеля формируются следующие интерметаллиды: Ti_2Ni , $TiNi$ и $TiNi_3$.

При использовании никелевой прослойки большое значение имеет режим сварки. Например, в работах Кунду С., Чаттерджи С.[1-3;7;8] соединение титанового сплава и стали через никелевую прослойку получали при высоких температурах 850...950 °С. В результате этого из-за высокой диффузионной активности титана в никеле хрупкие интерметаллиды системы Fe - Ti образовались даже на границе никель / сталь, что значительно снизило прочность соединения образцов. Для предотвращения диффузии титана к стали необходимо снизить температуру или время соединения. При использовании наноструктурной прослойки никеля возможно снижение температур до 650...750 °С, что позволит избежать образования интерметаллидов системы Fe - Ti, и прочность соединения может оказаться выше, чем после сварки давлением в интервале температур 850...950 °С.

Известно, что в интерметаллиде $TiNi$ при охлаждении в области температур 20...100 °С из-за АМП происходит аномально сильное изменение КТР [10, 11]. Результатом такого превращения может быть резкое повышение напряжений, что приведет к образованию трещин в смежных слоях Ti_2Ni и $TiNi_3$ и снижению прочности соединения титановый сплав - нержавеющая сталь. На температуру АМП оказывает влияние состав и размер зерна интерметаллида $TiNi$ [11, 12]. В этой связи для улучшения прочности соединения представляется перспективным попытаться за счет легирования слоя $TiNi$ снизить температуру АМП ниже рабочих температур изделия. Известно, что наиболее сильно температуру АМП в $TiNi$ снижает Cr. Добавка ~1 ат.% Cr снижает температуру АМП в $TiNi$ почти на 150 °С [10]. Ожидается, что если вместо Ni использовать сплав Ni с Cr, то диффузия Cr в образующийся интерметаллид $TiNi$ приведет к снижению температуры АМП ниже комнатной температуры.

Увеличение прочности соединения титановых сплавов типа Ti64 и сталей MDSS или PHSS при использовании в качестве прослойки сплавов никеля с Cr, Fe, Mo и Al было обнаружено ранее. Данные результаты не анализировались с точки зрения понижения температуры АМП [6-8]. Легирующие элементы снижают температуру АМП, о чем свидетельствуют полученные высокие значения прочности. Кроме того, не исследовано влияние снижения температуры на стабильность механических свойств соединения.

Во второй главе описаны методы получения соединений, методика исследования структуры. Материалами для сварки служили титановый сплав ПТ-3В и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, а в качестве прослойки использовали пластины толщиной 0,2 мм из Ni и сплава Х2Н98 (Ni – 2 ат.% Cr). Для получения в Ni и сплаве Х2Н98 наноразмерной структуры (НС) их деформировали методом кручения под квазигидростатическим давлением. После кручения под давлением размеры зерен в никеле и сплаве Х2Н98 составляли 200...400 нм. Размеры соединяемых заготовок составляли 5х5х16 мм³. Сварку давлением образцов осуществляли на установке «АЛА-ТОО (тип ИМАШ 20-78)». Режимы сварки: давление $P = 4...16$ МПа, температура 650, 700, 750 и 850 °С, время сварки $t = 20, 60, 120$ и 180 мин, давление вакуума 2×10^{-3} Па. Полученные образцы разрезали на электроэрозионном станке как перпендикулярно, так и под углом 30° к поверхности сварного шва. Далее образцы шлифовали абразивной шкуркой, полировали алмазными пастами различной зернистости и коллоидной суспензией ОР-S (Struers) с размером абразива 0,04 мкм. Микроструктуру исследовали на растровом электронном микроскопе Tescan Vega с приставкой для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments X-act. Образцы на разрыв вырезали на электроэрозионном станке и затем шлифовали, все испытания проводили при комнатной температуре. Для измерения среднего значения предела прочности на растяжение (σ_B) использовали три образца.

В третьей главе показаны результаты экспериментов сварки давлением титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из крупнозернистого и наноструктурного никеля. Определена возможность получения соединения в температурном интервале 650...850 °С. Сравниваются свойства полученных соединений, влияние температуры сварки давлением на состав зоны соединения.

Микроструктура диффузионной зоны титановый сплав / прослойка одинакова для НС и КЗ прослойки. После сварки давлением при 650 °С образуются слои TiNi и TiNi₃, а слой Ti₂Ni не наблюдается. После сварки давлением при 700 °С на зависимостях состав-расстояние появляется ступенька, соответствующая фазе Ti₂Ni, толщины слоев TiNi и TiNi₃ увеличились. После сварки при 750 °С формируются все три слоя интерметаллидов Ti₂Ni, TiNi и TiNi₃ (рисунок 1). На зависимостях состав-расстояние ступеньки постоянного состава соответствуют слоям интерметаллидов, а переходные области между ступеньками – двухфазным областям. При температуре сварки давлением выше 750 °С в титановом сплаве наблюдается широкая область с плавным падением содержания никеля от 10%, в этой области формируется двухфазная пластинчатая структура $\alpha + \beta\text{-Ti}$.

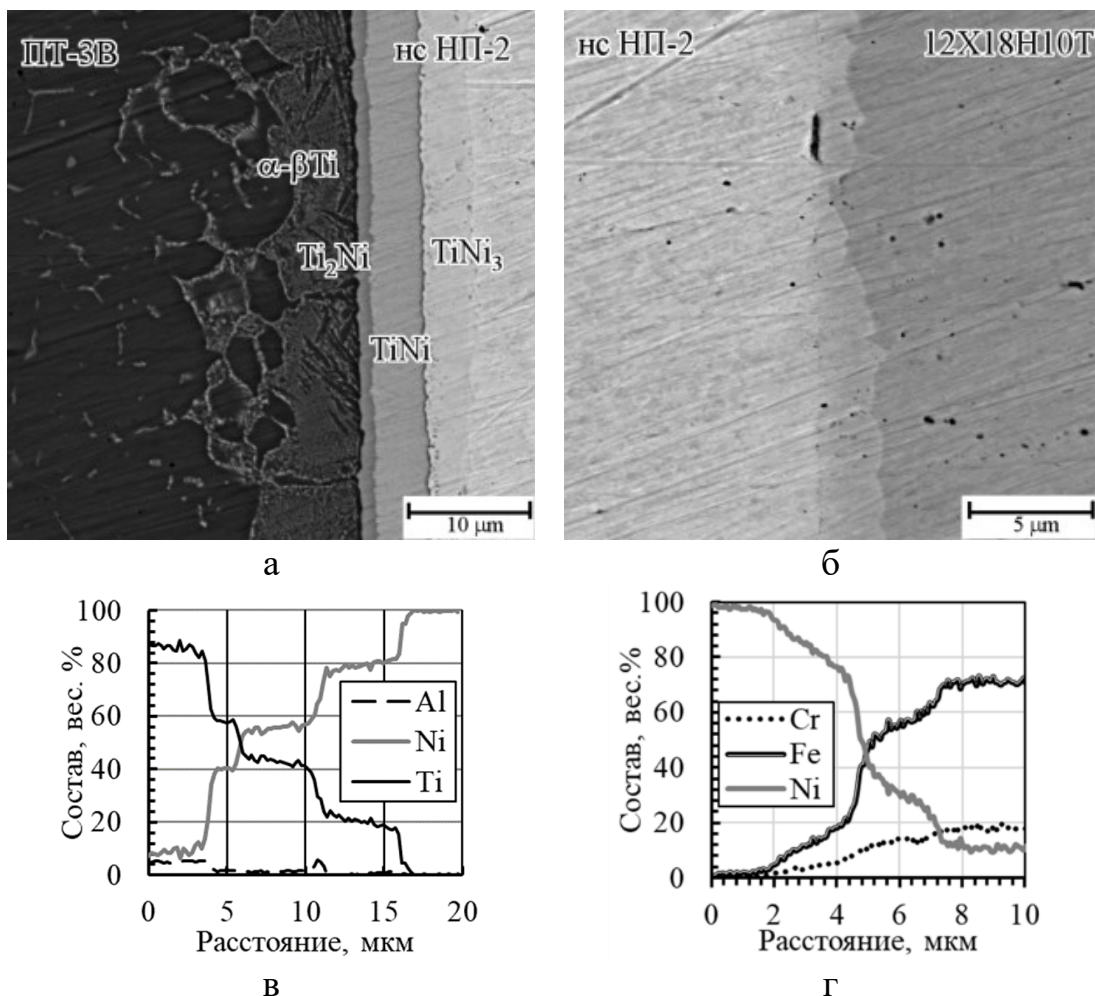


Рисунок 1 – Микроструктура и распределение элементов в зонах соединения ПТ-3В / НС никель и НС никель / 12Х18Н10Т после сварки давлением при температуре 750 °С. Косой шлиф

С увеличением температуры сварки толщина слоев на границе ПТ-3В / никель увеличивается в ряду: Ti_2Ni , TiNi_3 и TiNi (рисунок 2). Слой Ti_2Ni имеет наименьшую толщину, т. к. формирование соединений на границе ПТ-3В/никель связано с диффузией никеля в титановый сплав, а слой Ti_2Ni расположен дальше всего от никеля.

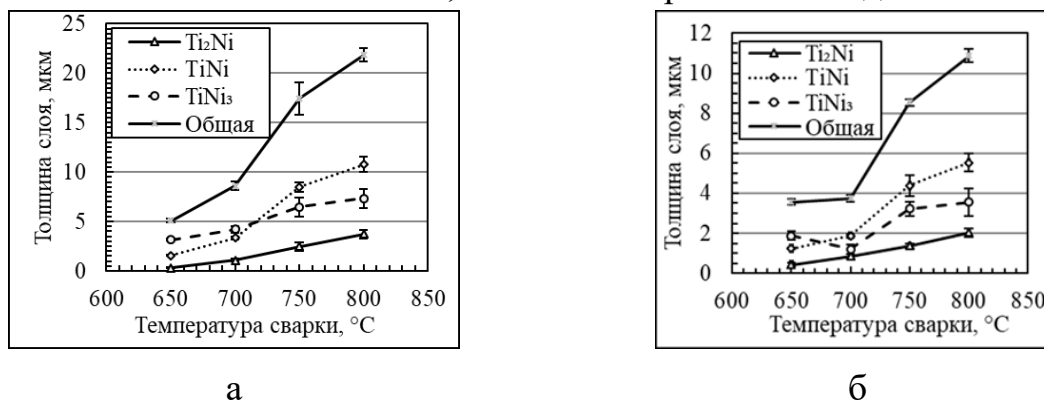
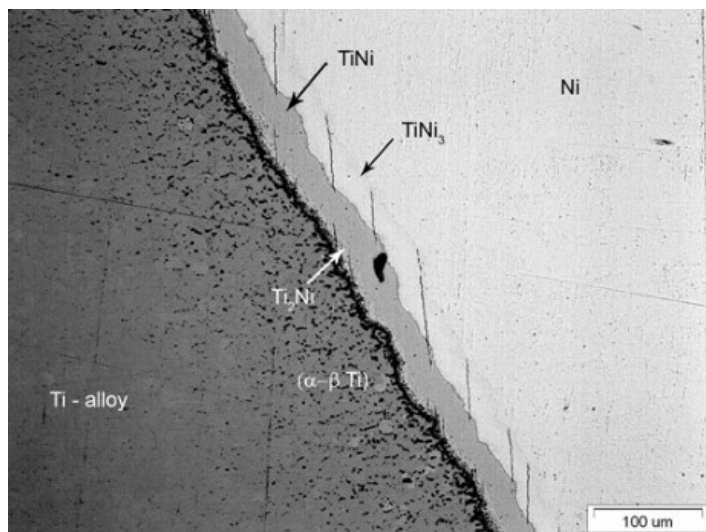


Рисунок 2 – Толщина интерметаллидных слоев в зависимости от температуры сварки давлением в течение 20 мин с использованием прослойки КЗ никеля (а) и НС никеля (б)

При сварке через НС прослойку образование интерметаллидов системы Ti - Ni происходило при более низкой температуре. Это привело к снижению скорости диффузии элементов через слои интерметаллидов с повышением температуры в процессе сварки давлением. Таким образом толщина диффузионных слоев меньше в случае сварки давлением через прослойку из НС никеля.

Диффузионная зона соединения никель / 12Х18Н10Т не имеет слоистой структуры как зона ПТ-3В / никель. В этой зоне присутствуют мелкие частицы размером менее 1 мкм, обогащенные хромом. Ширина зоны соединения никель / 12Х18Н10Т слабо зависит от температуры сварки и составляет 6-8 мкм. Структура зоны представляет собой рекристаллизованные зерна, при этом новые зерна имеют относительно однородный состав.



Следует отметить, что на образцах, сваренных при 750 °С и затем охлажденных до 10 °С, после электроотравления были обнаружены периодически расположенные мелкие трещины (рисунок 3). Трещины располагались в двух слоях – Ti_2Ni и $TiNi_3$. В слое $TiNi$ трещины не обнаружены. Среднее расстояние между микротрещинами составляло 70 ± 38 мкм, а средний угол наклона микротрещин к межфазной границе - 30°. Средняя толщина фазы $TiNi_3$, определенная металлографически, равна 13 ± 1 мкм. Средняя толщина трещины составила $0,16 \pm 0,04$ мкм. Для определения деформаций необходимых для образования трещин подобного размера взяли отношение ширины трещины к расстоянию между трещинами. Расчет деформации для раскрытия трещины выполнили из отношения ширины трещины к среднему расстоянию между трещинами вдоль границы соединения. Относительное удлинение фазы $TiNi_3$ за счет трещин составило 0,23 %.

Механические свойства образцов, сваренных через КЗ и НС прослойку никеля, показаны на рисунке 4. Соединение прочностью в 400 МПа получено при сварке через как НС, так и КЗ прослойку никеля. Однако при сварке через НС прослойку никеля соединение высокой прочности получается при температуре 700 °С, что на 50 °С ниже, чем соединение через КЗ прослойку.

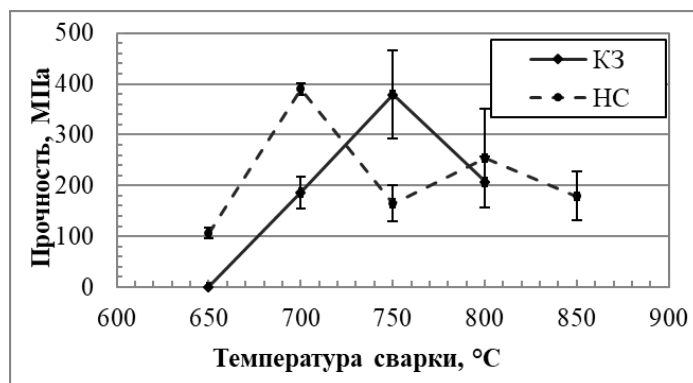


Рисунок 4 – Прочность соединения ПТ-3В и 12Х18Н10Т через прослойку из КЗ никеля (а) и НС никеля (б)

Методами рентгеноструктурного анализа подтверждено наличие интерметаллидных фаз в диффузионной зоне соединения (рисунок 5). Также обнаружено, что фаза TiNi находится в 2 состояниях, а именно В2 и В19'. Данный факт говорит о прохождении АМП при охлаждении до комнатной температуры.

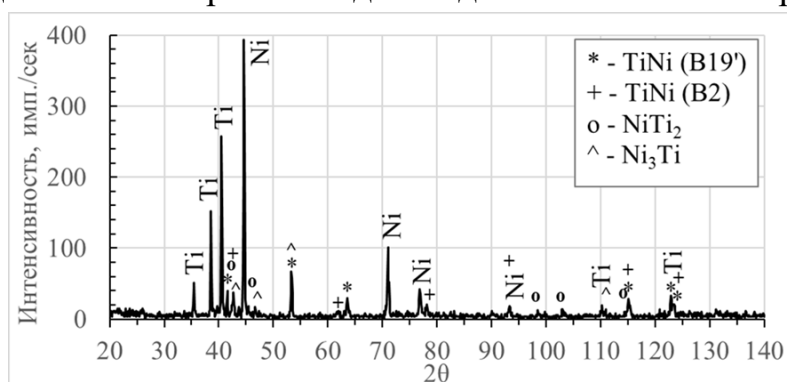


Рисунок 5 – Рентгеноструктурный анализ в зоне титановый сплав ПТ-3В / НС никель после сварки при 750 °C.

В четвертой главе описан механизм образования соединения титанового сплава с нержавеющей сталью через прослойку никеля. В отличие от соединения с использованием КЗ прослойки соединение через прослойку из НС никеля получается при более низкой температуре. Это связано с высокой диффузионной активностью материала в НС состоянии [13]. Так как размер зерна никеля существенно увеличивается при нагреве до температуры сварки давлением, сварочное усилие необходимо прикладывать на стадии нагрева соединяемых материалов. В процессе роста зерна никелевой прослойки миграция границ зерен способствует очищению поверхности от оксидов и снижению прочности выступов и неровностей, которые мешают образованию физического контакта свариваемых поверхностей. Образование большего количества активных центров приводит к снижению температуры сварки давлением при использовании НС прослойки.

Расчет показал, что при снижении температуры в интервале -10...100 °C учет вклада АМП в слое TiNi приводит к значительно большей деформации диффузионной зоны,

чем при учете лишь стандартных значений КТР при комнатной температуре соединяемых материалов и образующихся интерметаллидов, приведенных в справочнике [14]. Так при охлаждении образцов на 15 °С линейные термические деформации составят 0,013 % для сплава ПТ-3В и до 0,025 % для нержавеющей стали. КТР интерметаллидных фаз, образующихся при сварке давлением, имеют тот же порядок величины, что и КТР титанового сплава и нержавеющей стали (таблица 1). При АМП значение КТР фазы TiNi увеличивается примерно в 10 раз. Если учесть пиковое изменение КТР $110 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [11], то при охлаждении с 25 до 10 °С линейная деформация фазы TiNi составит 0,165 %. Как показано в главе 3 слой интерметаллида TiNi_3 подвергается деформации на 0,23 %. Деформация TiNi_3 превышает деформацию TiNi из-за АМП (0,23 % против 0,165 %). По-видимому, дополнительная деформация в 0,06 % возникла в результате релаксации остаточных напряжений в зоне соединения при охлаждении с температуры сварки давлением.

Таблица 1 – КТР и тепловое расширение фаз в диффузионной зоне соединения. В круглых скобках указаны пиковые значения КТР и теплового расширения фазы TiNi при АМП [11]

	ПТ-3В	Ti_2Ni	TiNi	TiNi_3	Ni	12X18H10T
КТР, 10^{-6} K^{-1}	8,6	16	11 (110)	12	13	16,6
Тепловое расширение при $\Delta T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, %	0,013	0,024	0,0165 (0,165)	0,018	0,02	0,025

Разрушение образцов, полученных сваркой давлением ПТ-3В и 12X18H10T через никелевую прослойку при 650 °С, проходит по границе прослойка / нержавеющая сталь. Как показано в главе 3, в зоне соединения нержавеющей стали / никель после сварки давлением при 650 °С присутствуют поры и непровары.

Анализ микроструктуры и состава поверхности разрушения образцов, полученных сваркой давлением при температуре выше 700 °С через никелевую прослойку, показал, что разрушение проходит по границе титановый сплав / прослойка. Поверхности разрушения проходят по слоям интерметаллидов, на поверхности разрушения обнаружено наличие интерметаллидов TiNi и TiNi_3 , либо Ti_2Ni - TiNi.

Использование НС никелевой прослойки не привело к решению проблемы получения надежного соединения титанового сплава с нержавеющей сталью. Уменьшение толщины образующихся интерметаллидов на границе ПТ-3В / никелевая прослойка и снижение температуры образования соединения не привели к повышению прочности соединения. В зоне соединения продолжает присутствовать интерметаллид

TiNi, АМП которого приводит к разрушению соединения по интерметаллидам Ti_2Ni и $TiNi_3$.

Как известно из литературы, наиболее эффективным способом снизить температуру АМП в интерметаллиде TiNi является легирование различными элементами. Например, введение 1% хрома в TiNi снижает температуру АМП на 150 °C [10]. Для введения хрома в диффузионную зону в качестве прослойки был использован сплав никеля, содержащий 2% хрома (X2H98).

Пятая глава посвящена исследованию соединения титанового сплава и нержавеющей стали через НС прослойку сплава X2H98. Показано, что использование сплава X2H98 повышает прочность соединения ПТ-3В / прослойка и меняет место разрушения при испытании на разрыв.

При использовании прослойки из X2H98 наибольшей прочностью $\sigma_B=400\pm 20$ МПа (82% от прочности нержавеющей стали) обладают образцы, полученные сваркой давлением при температуре 700 °C. Повышение температуры сварки давлением приводит к снижению прочности соединения (рисунок 6). Из сравнения этих результатов с данными для никелевой прослойки видно, что, хотя максимальные значения прочности в случае X2H98 и никеля приблизительно совпадают, падение прочности в случае X2H98 не столь резкое: при 750 °C прочность заметно выше, чем при использовании никеля.

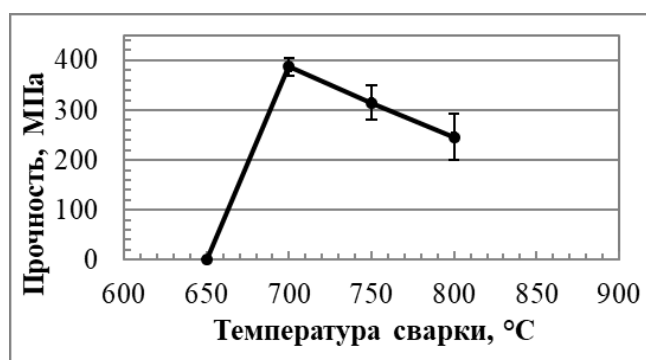


Рисунок 6 – Прочность на отрыв соединения ПТ-3В и 12Х18Н10Т через прослойку из сплава X2H98

Исследование шлифов выявило следующую закономерность. После сварки при 650 °C обнаруживается цепочка пор на границе $TiNi_3/X2H98$. После сварки при 700 °C пор и трещин в зоне соединения не видно (рисунок 7). После сварки при 750 °C обнаруживается протяженная трещина в слое $TiNi_3$, а после сварки при 800 °C - в слое Ti_2Ni .

Формирование слоев интерметаллидов происходит примерно так же, как и в случае прослойки из никеля. В составе зоны интерметаллидов Ti-Ni присутствует хром. В слое TiNi его содержание после сварки при 700, 750 и 800 °C составляет примерно 0,2%, 0,25%, и 0,6%, соответственно. Основная часть хрома накапливается в тонком слое у границы $TiNi_3/X2H98$. В этом слое соотношение Cr:Ti близко к 2:1, что свидетельствует об образовании интерметаллида $TiCr_2$.

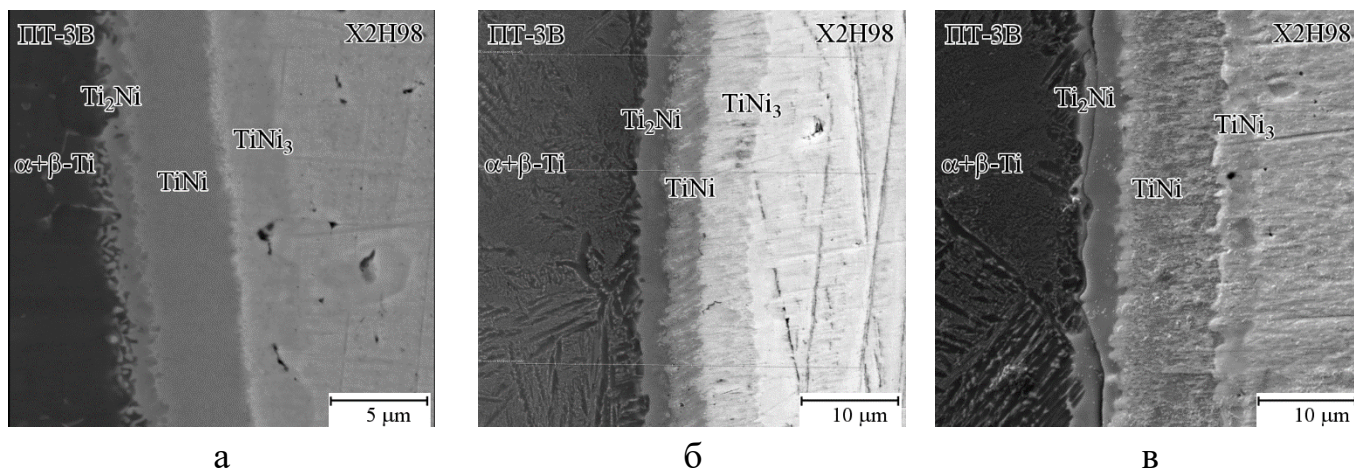


Рисунок 7 – Микроструктура зоны соединения титановый сплав ПТ-3В / X2H98 при различных температурах и времени сварки 20 мин: а) 700 °С, б) 750 °С, в) 800 °С

Формирование слоев интерметаллидов происходит примерно так же, как и в случае прослойки из никеля. В составе зоны интерметаллидов Ti-Ni присутствует хром. В слое TiNi его содержание после сварки при 700, 750 и 800 °С составляет примерно 0,2%, 0,25%, и 0,6%, соответственно. Основная часть хрома накапливается в тонком слое у границы TiNi₃/X2H98. В этом слое соотношение Cr:Ti близко к 2:1, что свидетельствует об образовании интерметаллида TiCr₂.

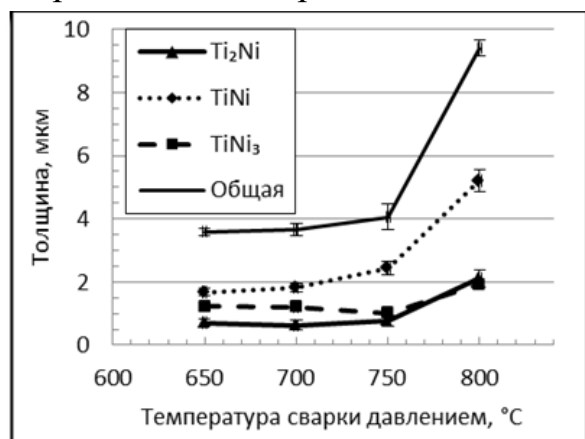


Рисунок 8 – Зависимость ширины интерметаллидных зон от температуры сварки давлением с использованием прослойки из сплава X2H98

После сварки через сплав X2H98 при 700 °С значения толщины интерметаллидных зон примерно такие же, как в случае никеля (рисунок 8). Выше 700 °С суммарная толщина интерметаллидных слоев меньше, чем в случае никелевой прослойки. Особенно сильна разница после сварки при температуре 750 °С, где суммарная толщина отличается более, чем в 2 раза (около 4 мкм в случае X2H98 и 9 мкм в случае никеля). При 800 °С разница уменьшается (9 мкм и 11 мкм, соответственно).

Наибольшая прочность наблюдается после сварки при 700 °С (рисунок 6), и разрушение проходит по поверхности X2H98/нержавеющая сталь. Это свидетельствует о повышении прочности соединения титанового сплава ПТ-3В с прослойкой при использовании X2H98. Для повышения прочности соединения прослойка / нержавеющая сталь необходимо увеличить время выдержки или усилие при сварке давлением. Повышение температуры не приводит к повышению прочности соединения.

Провели исследование поверхности разрушения при испытании на отрыв образцов, сваренных через прослойку сплава X2H98. При 650 °С соединение разрушилось по исходным поверхностям на границе X2H98/12X18H10T. После сварки при 700 °С, 20 мин разрушение происходило по границе X2H98/12X18H10T. После сварки при 750 °С большая часть разрушения проходила по границе TiNi₃/X2H98, а минимальная часть (на краю образца) по слою Ti₂Ni. После сварки при 800 °С образец разрушился по поверхности Ti₂Ni, и только небольшая часть разрушения (по-видимому, в зоне долома) проходила по границе TiNi₃/TiNi.

Несмотря на то, что хром сильно снижает температуру АМП, образующийся слой интерметаллида TiCr₂ связывает часть хрома, препятствует диффузии элементов и создает растягивающие напряжения на границе раздела TiNi₃ и X2H98. В дальнейшей работе планируется использовать легирующие добавки, снижающие температуру АМП, но не приводящие к образованию интерметаллидов с титаном. Важно также скорректировать толщину прослойки, т.к. даже при T=800 °С суммарная толщина диффузионного слоя не превышает 30 мкм, а прочность шва приблизилась к нижней границе прочности никеля (450-640 МПа), поэтому имеет смысл уменьшить толщину прослойки до 30 мкм.

Шестая глава содержит результаты исследования влияния сварочного давления, а также выдержки при пониженных температурах после сварки давлением, на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через НС прослойки из Ni и сплава X2H98.

Оптимизацию времени выдержки под давлением проводили при 700 °С, т.к. именно при этой температуре было достигнуто максимальное значение σ_B . Увеличение времени выдержки под давлением более 20 мин приводит к снижению σ_B . Зависимость толщины интерметаллидных слоев от времени сварки при 700 °С неравномерная (рисунок 9). Высокая скорость роста толщины наблюдается до 60 мин, далее скорость уменьшается.

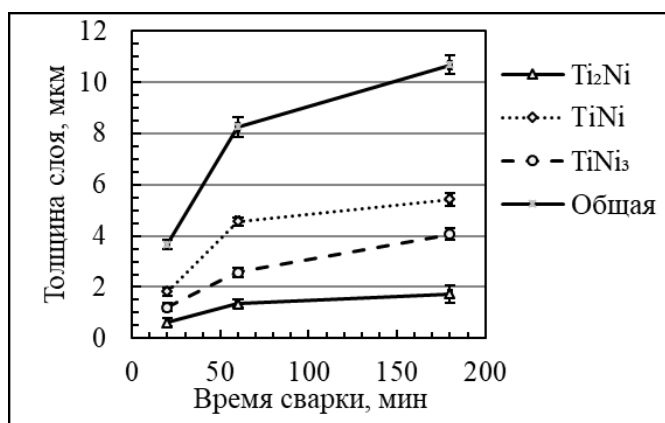


Рисунок 9 – Изменение толщины зоны соединения ПТ-3В / X2H98 после сварки давлением при 700 °С и давлении 4 МПа

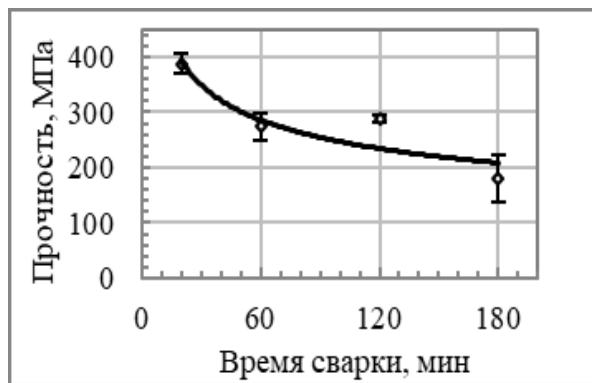
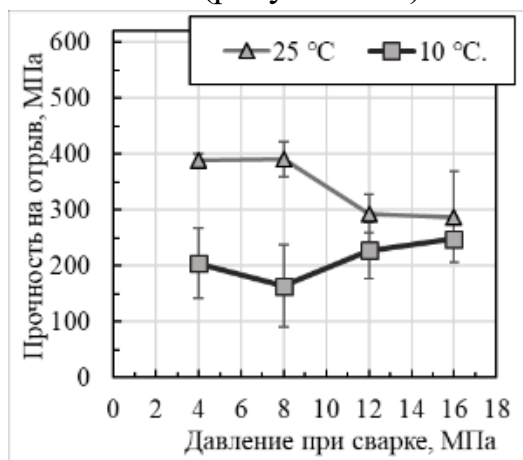


Рисунок 10 – Прочность соединения через прослойку Х2Н98 после сварки давлением 4 МПа при 700 °С в зависимости от времени выдержки

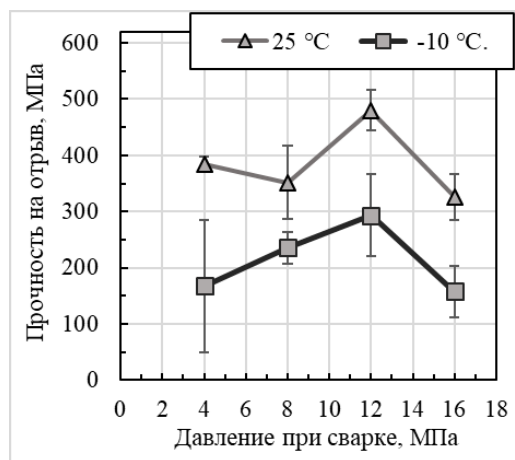
Наибольшей прочностью в 390 МПа обладал образец, полученный после сварки при температуре 700 °С в течение 20 мин; повышение времени выдержки привело к снижению прочности (рисунок 10). Разрушение соединения при этом происходило по границе титановый сплав / прослойка, а именно по интерметаллидам $TiNi_3$ и Ti_2Ni .

У образцов с никелевой прослойкой после выдержки при 25°С наибольшая прочность в 380 МПа достигалась после

сварки в интервале давлений 4-8 МПа. Дальнейшее увеличение сварочного давления привело к уменьшению прочности соединения до 300 МПа (рисунок 11а). После выдержки сваренных образцов при 10 °С прочность соединения упала до 150...250 МПа (рисунок 11а). В образцах с прослойкой Х2Н98 после выдержки при 25 °С наибольшая прочность в 490 МПа была достигнута после сварки под давлением 12 МПа (рисунок 11б). После выдержки сваренных образцов при -10 °С прочность соединения упала до 150...300 МПа, при этом наибольшая прочность также наблюдалась после сварки под давлением 12 МПа (рисунок 11б).



а



б

Рисунок 11 – Влияние сварочного давления на прочность соединения ПТ-3В с 12Х18Н10Т через прослойку из никеля (а) и сплава Х2Н98 (б). Сварка давлением при 700 °С, 20 мин

Как видим, понижение температуры выдержки приводит к снижению прочности соединения при использовании прослойки как из никеля, так и из сплава Х2Н98. Однако с уменьшением температуры выдержки прочность соединения через прослойку Х2Н98 падает медленнее, чем в случае никеля. Так после выдержки при температуре на 20 °С

ниже (10°C против -10°C) свойства соединения через прослойку из сплава X2H98 примерно такие же, как в случае использования никелевой прослойки.

Исследование микроструктуры зон разрушения показало, что образцы, сваренные через никелевую прослойку, независимо от температуры выдержки, всегда разрушались с «участием» слоя TiNi: либо по границе $Ti_2Ni/TiNi$, либо по границе $TiNi/TiNi_3$. Разрушение образцов, сваренных через прослойку X2H98 при 4 МПа, 700 °C, 20 мин, происходило по границе X2H98 / 12X18H10T (рисунок 12а). После сварки при более высоком давлении и выдержке при 25 °C разрушение проходило по границе интерметаллидов $Ti_2Ni+TiNi/TiNi_3$ (рисунок 12в). После выдержки при -10°C образцы, сваренные через прослойку X2H98, разрушались по интерметаллидам $Ti_2Ni+TiNi/TiNi_3$ (рисунок 12б).

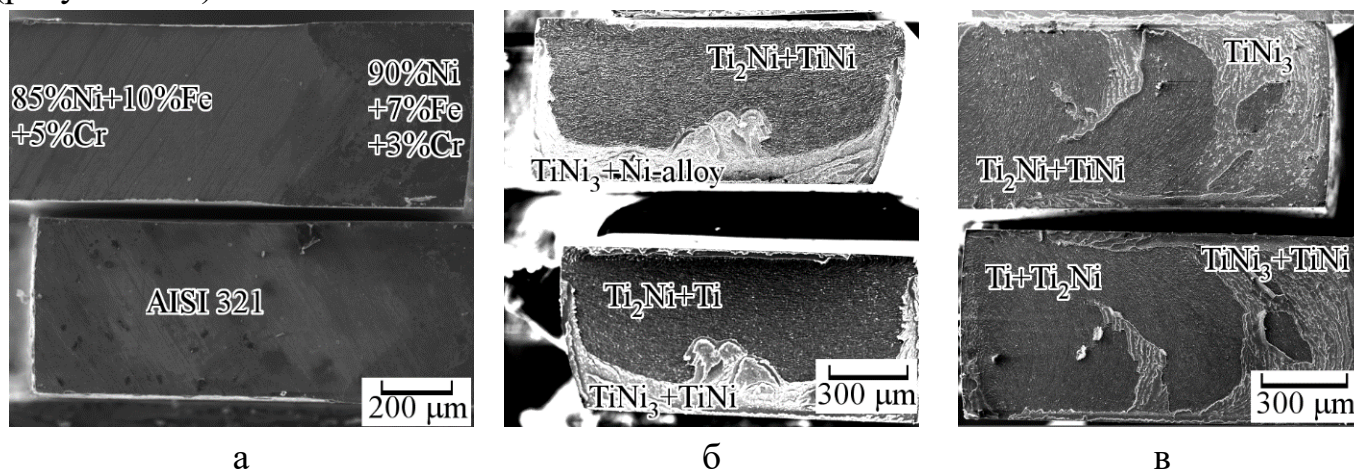


Рисунок 12 – Зоны разрушения образцов сваренных через прослойку X2H98 при 700 °C, 20 мин под давлением 4 МПа (а, б) и 16 МПа (в) после выдержки при 25 °C (а, в) и -10 °C (б)

При использовании прослойки из X2H98 факт увеличения прочности соединения после выдержки при 25 °C, а также более медленное падение прочности при уменьшении температуры выдержки можно объяснить смещением температурного интервала АМП интерметаллида TiNi к более низким температурам. По-видимому, в случае X2H98 при комнатной температуре АМП только начинается и его негативное влияние на прочность меньше, чем в случае никелевой прослойки, где АМП развилось в большей степени. Дальнейшее увеличение прочности при комнатной температуре возможно в случае, если удастся довести концентрацию элементов, снижающих температурный интервал АМП в интерметаллиде TiNi, до такой степени, чтобы этот интервал оказался ниже комнатной температуры.

Выводы

1. При использовании никелевой прослойки наибольшая прочность на отрыв составляет около 400 МПа как для наноструктурного, так и для крупнозернистого состояния. Однако температура формирования максимума прочности при

использовании НС никеля на 50 °С ниже, чем при использовании крупнозернистого никеля.

2. Образцы, сваренные через никелевую прослойку, разрушаются по межфазным границам $Ti_2Ni/TiNi$ и $TiNi/TiNi_3$ из-за значительного знакопеременного изменения КТР в результате аустенитно-мартенситного превращения в слое $TiNi$.

3. После сварки давлением титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку при температурах выше 700 °С в слоях Ti_2Ni и $TiNi_3$ обнаружены равномерно распределенные микротрещины, в то время как в слое $TiNi$ они не обнаружены. Возникновение трещин обусловлено значительным изменением КТР при аустенитно-мартенситном превращении в слое $TiNi$.

4. При использовании прослойки Х2Н98 в разрушение не вовлечен слой $TiNi$, что свидетельствует о том, что легирование интерметаллида $TiNi$ хромом в количестве 0,2-0,6 ат.% сместило температурный интервал аустенитно-мартенситного превращения к более низким температурам.

5. При сварке давлением через прослойку из сплава Х2Н98 на границе титановый сплав / прослойка происходит образование тонкого слоя $TiCr_2$, препятствующего диффузии хрома и никеля в формирующиеся слои интерметаллидов Ti_2Ni , $TiNi$ и $TiNi_3$. При одинаковых условиях сварки это приводит к формированию более тонких слоев интерметаллидов $Ti-Ni$, чем при сварке через прослойку из чистого никеля.

6. Сварка давлением 12 МПа при 700 °С в течение 20 мин титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через прослойку Х2Н98 позволяет получить прочность на отрыв 490 МПа, что составляет 82% прочности нержавеющей стали.

7. Выдержка сваренных образцов при температуре ниже комнатной приводит к снижению прочности соединения при комнатной температуре как в случае никелевой прослойки, так и сплава Х2Н98. Однако в случае сплава Х2Н98 сопоставимое снижение прочности происходит при охлаждении до более низких температур, что свидетельствует о том, что легирование слоя $TiNi$ хромом приводит к смещению температурного интервала аустенитно-мартенситного превращения к более низким температурам.

Цитированная литература

[1] Kundu, S. Effects of Intermetallic Phases on the Bond Strength of Diffusion Bonded Joints between Titanium and 304 Stainless Steel using Nickel Interlayer / S. Kundu, S. Chatterjee, D.L. Olson, B. Mishra // Metallurgical and materials transactions A – 2007. – V. 38A. – P. 2053-2060.

[2] Kundu, S., Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer / S. Kundu, S. Chatterjee // Materials Characterization – 2008. – V. 59 – I. 5. – P. 631-637.

[3] Kundu, S. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded titanium–stainless steel joints using a nickel interlayer / S. Kundu, S. Chatterjee // Materials Science and Engineering A. – 2006. – V. 425. – I. 1-2. – P. 107-113.

[4] Thirunavukarasu, G. Effect of Bonding Temperature on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Joint Between Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Nickel as an Intermediate Material / G. Thirunavukarasu, S. Kundu B. Mishra S. Chatterjee // Metallurgical and materials transactions A. – 2014. – V. 45A. – P. 2067-2077.

[5] Thirunavukarasu, G. Effect of Bonding Time on Interfacial Reaction and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Joint Between Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Nickel as an Intermediate Material / G. Thirunavukarasu, S. Kundu B. Mishra S. Chatterjee // Metallurgical and materials transactions A. – 2014. – V. 45A. – P. 2078-2090.

[6] Sam, S. Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a nickel alloy interlayer: Interface microstructure and strength properties. / S. Sam, S. Kundu, S. Chatterjee // Materials and Design. – 2012. – V. 40 – P. 237-244.

[7] Kundu, S. Diffusion Bonding of 17-4 Precipitation Hardening Stainless Steel to Ti Alloy with and Without Ni Alloy Interlayer: Interface Microstructure and Mechanical Properties / S. Kundu, G. Anand, S. Chatterjee // Metallurgical and materials transactions A. – 2013. – V. 44A. – P. 2196-2011.

[8] Kundu S Interfacial reactions and strength properties of diffusion bonded joints of Ti64 alloy and 17-4PH stainless steel using nickel alloy interlayer / S. Kundu, B. Mishra, D.L. Olson, S. Chatterjee // Materials and Design. – 2013. – V. 51. – P.714-722.

[9] Rahman, A.H.M.E. Strength and microstructure of diffusion bonded titanium using silver and copper interlayers / A.H.M.E. Rahman, M.N. Cavalli // Materials Science and Engineering A. – 2010. – V. 527. – P. 5189-5193.

[10] Otsuka, K. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys / K. Otsuka, X. Ren // Progress in Materials Science. – 2005. – V. 50. – P. 511-678.

[11] Uchil, J. Thermal expansion in various phases of Nitinol using TMA // J. Uchil, K. P. Mohanchandra, K. Ganesh Kumara, K. K. Mahesh, T. P. Murali // Physica B. – 1999. – V. 270. – P. 289-297.

[12] Kuranova, N.N. Thermo- and Deformation Induced Martensitic Transformations in Binary TiNi-Based Alloys Subjected to Severe Plastic Deformation / N.N. Kuranova, V.V. Makarov, V.G. Pushin, A.N. Uksusnikov // Materials Science Forum. – 2013. – Vols 738-739. –P. 530-534.

[13] Nazarov, A.A., Mulyukov, R.R. Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology / A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov – CRC Press, Boca Raton, 2003. – pp. 22-1–22-41.

[14] Физические величины: Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 1232 с.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Журналы, рекомендованные ВАК РФ:

1. Хазгалиев, Р.Г. Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава / Р. Г. Хазгалиев, М. Х. Мухаметрахимов, Р. Р. Мулюков, Р. Я. Лутфуллин // Перспективные материалы. – 2011. - № 12. – С. 529-533.

2. Хазгалиев, Р.Г. Особенности разрушения твердофазного соединения титановый сплав – никель – нержавеющая сталь / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, М.Ф. Имаев, Р.У. Шаяхметов, Р.Р. Мулюков // Известия вузов. Физика. – 2015. – том 58, № 6. – С. 74-79, (Khazgaliev, R.G. Special features of fracture of a solid-state titanium alloy – nickel – stainless steel joint / R.G. Khazgaliev, M.K. Mukhametrakhimov, M.F. Imaev, R.U. Shayakhmetov, R.R. Mulyukov // Russian Physics Journal – 2015. – V. 58. – № 6. – P. 822-827).

3. Хазгалиев, Р.Г. Исследование возможности упрочнения соединения титанового сплава с коррозионностойкой сталью, полученного диффузионной сваркой через промежуточную прослойку / Р. Г. Хазгалиев, М.Ф. Имаев, Р. Р. Мулюков // Деформация и Разрушение Материалов. – 2017. – № 5. – С. 18-24. (Khazgaliev, R.G. Possibility to strengthen the joint between a titanium alloy and stainless steel formed by diffusion welding through an interlayer / R.G. Khazgaliev, M.F. Imaev, R.R. Mulyukov // Russian metallurgy (Metally). – 2018. – V. 2018. – I. 4. – P. 341-347.)

4. Хазгалиев, Р.Г. Влияние температуры и времени на образование соединения титанового сплава и сплава Х2Н98 / И.И. Ибрагимова, Р.Г. Хазгалиев, М.Ф. Имаев, Р.Р. Мулюков //, журнал «Вектор науки Тольяттинского государственного университета». – 2017. – №4 (42). – С. 40-45.

5. R. G. Khazgaliev, I. I. Ibragimova, M. F. Imaev, M. Kh. Mukhametrakhimov and R. R. Mulyukov. The effect of holding temperature on the strength of the diffusion bond of Ti-alloy and stainless steel through the ultrafine-grained interlayers of Ni and Ni-2%Cr alloy // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 447 (2018) 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012051

Прочие публикации

1. Хазгалиев, Р.Г. Химический анализ твердофазного соединения титанового сплава с нержавеющей сталью с помощью никелевой прослойки / Р. Г. Хазгалиев, Р. Р. Мулюков // сборник трудов II Всероссийской молодежной школы-конференции «Современные проблемы металловедения», Абхазия. – 2011. – С. 207-214

2. Хазгалиев, Р.Г. Прочность диффузионного соединения титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через прослойку из сплава Х2Н98. / И.И. Ибрагимова, Р.Г. Хазгалиев // В сборнике: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы IX Международной научно-инновационной молодежной конференции. 2017. – С. 101-103.

3. Хазгалиев, Р.Г. Микроструктура зоны твердофазного соединения титановый сплав – никель / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, М.Ф. Имаев, Р.Р. Мулюков // тезисы докладов международной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы прочности», Уфа 4-8 июня 2012 г. / Уфа: РИЦ БашГУ. – 2012. – С. 31
4. Хазгалиев, Р.Г. Прочность интерметаллидов в зоне соединения титан – никель / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, Р.У. Шаяхметов // сборник трудов российской конференции «Современные проблемы металловедения», сборник трудов российской конференции «Современные проблемы металловедения», 10-13 сентября 2013 г., Пицунда, Абхазия. / Изд. Дом МИСиС. – 2013. – С. 97-102.
5. Хазгалиев, Р.Г. Прочность твердофазного соединения титановый сплав – никелевая прослойка – нержавеющая сталь, / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, М.Ф. Имаев, Р.Р. Мулюков // VI Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 10-13 ноября 2015 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН. – 2015. – С. 200 – 202.
6. Хазгалиев, Р.Г. Модифицирование поверхности прослойки никеля для делокализации деформации при сварке давлением образцов титанового сплава и нержавеющей стали / Р.Г. Хазгалиев, М.Ф. Имаев, Р.Р. Мулюков, Ф.Ф. Сафин // Письма о материалах. – 2015. – Т.5, №2. – С.133-137.
7. Хазгалиев, Р.Г. Деформация прослойки никеля в процессе соединения титанового сплава и нержавеющей стали. / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, Р.Я. Лутфуллин, Р.Р. Мулюков // Современное состояние и проблемы естественных наук: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014. – С. 230-233.
8. Хазгалиев, Р.Г. Моделирование процесса сварки давлением титана и никеля в приближении недеформируемой кристаллической решетки / Р.Г. Хазгалиев, А.Р. Халиков, С.В. Дмитриев // Современное состояние и проблемы естественных наук: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – (357 с.) – С. 167-172.
9. Хазгалиев, Р.Г. Процесс сварки давлением титанового сплава с нержавеющей сталью через никелевую прослойку / Р.Г. Хазгалиев, М.Х. Мухаметрахимов, Ф.Ф. Сафин / Материалы V Международной научно-инновационной молодёжной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», Тамбов, 31 октября – 1 ноября 2013 г. / Под общей редакцией оргкомитета. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В. – 2013. – С. 146-148.