

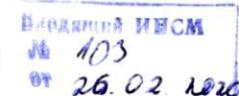
ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

На диссертационную работу Хазгалиева Руслана Галиевича «Влияние аустенитно-мар滕ситного превращения в слое TiNi на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля и сплава никель-хром», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность диссертационной работы

Развитие машиностроения, авиационной и химической промышленности невозможно без получения новых материалов с высокими механическими и антакоррозионными свойствами. Перспективно использовать биметаллические материалы, например, соединения титановых сплавов и нержавеющих сталей. Титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, а нержавеющие стали – высокой износостойкостью и прочностью. Соединения этих материалов будут сочетать прочность стали с химической стойкостью титанового сплава.

Перспективным методом соединения титановых сплавов и нержавеющих сталей представляется сварка давлением, которая позволяет избежать неконтролируемого образования охрупчивающих фаз, возникающих при сварке плавлением. Прочность и пластичность соединения при прямом контакте рассматриваемых материалов оказывается неудовлетворительной. Использование промежуточных прослоек из других материалов позволяет несколько улучшить механические свойства соединения, но уровень свойств пока не достаточен для практического применения. Низкий уровень свойств связывают с небольшой разницей коэффициентов термического расширения (КТР) и образованием хрупких интерметаллидных соединений в зоне соединения. Между тем, авторы не учитывают возможные гораздо более сильные изменения КТР в образующихся фазах в результате протекания в них фазовых превращений в интервале температур от комнатной до температур сварки. При диффузионной сварке могут образовываться фазы, имеющие существенные изменения КТР в результате низкотемпературных аустенитно - мар滕ситных превращений (АМП), или инварные сплавы с очень низким КТР. Эффект изменения КТР при АМП может проявлять себя 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.



По этой причине диссертационная работа Хазгалиева Р.Г., посвященная исследованию влияния АМП в слое TiNi на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля и сплава никель-хром, влиянию размера зерна прослойки на структуру и свойства соединения, а также особенности разрушения соединения, представляется актуальной и своевременной.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, общих выводов и списка литературы из 119 наименований. Работа изложена на 145 страницах, содержит 74 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения.

В введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложен литературный обзор по теме диссертации. В обзоре описаны способы соединения титановых сплавов и нержавеющих сталей с использованием различных прослоек чистых металлов, сплавов и сочетаний двух и более прослоек. При испытании полученных соединений разрушение происходит по одной из границ прослойка – соединяемый материал, а причиной разрушения называют различие КТР исходных материалов и образующихся хрупких интерметаллических фаз. Однако в диффузионной зоне могут образовываться фазы, имеющие существенные изменения КТР в результате низкотемпературных АМП, или инварные сплавы с минимальным значением КТР. При соединении нержавеющих сталей с титановыми сплавами через никелевую прослойку образуется слой TiNi, и Хазгалиев Р.Г. указывает на необходимость учета влияния АМП в слое TiNi на механические свойства и характер разрушения диффузионного соединения стали и титанового сплава.

Во второй главе подробно описаны использованные в работе материалы и методики эксперимента. Материалами для сварки служили титановый сплав ПТ-3В и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, а в качестве прослойки использовали пластины толщиной 0,2 мм из никеля и сплава Х2Н98 (Ni – 2 ат.% Cr). Сварку давлением образцов осуществляли в вакууме. Достоинством работы является использование современных методов исследования. В диссертационном исследовании применяли световой микроскоп, сканирующий электронный микроскоп с приставкой для энергодисперсионного анализа, дифракцию в обратно-отраженных электронах (EBSD), рентгеновский дифрактометр. Проводили также измерение механических свойств на одноосное растяжение и методом микротвердости. Все характеристики измеряли в соответствии с ГОСТами с относительной ошибкой не более 5-7 %. Использование современных методов

исследования структуры является доказательством надежности и достоверности полученных в работе результатов.

В третьей главе изложены результаты экспериментов по сварке давлением титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из крупнозернистого (КЗ) и наноструктурного (НС) никеля. Сравниваются структура и свойства полученных соединений, влияние температуры сварки на состав зоны соединения. Показано, что после сварки при 750 °C формируются все три слоя интерметаллидов Ti_2Ni , $TiNi$ и $TiNi_3$. Выше 750 °C в титановом сплаве наблюдается широкая область с плавным падением содержания никеля, в этой области формируется двухфазная пластинчатая структура $\alpha+\beta-Ti$. При сварке через НС прослойку образование интерметаллидов системы Ti - Ni происходило при более низкой температуре. Диффузионная зона соединения никель/12X18H10T не имеет слоистой структуры как зона ПТЗВ/никель. В этой зоне присутствуют мелкие частицы размером менее 1 мкм, обогащенные хромом. На образцах, сваренных при 750 °C и затем охлажденных до 10 °C, после электротравления были обнаружены периодически расположенные мелкие трещины. Трещины располагались в двух слоях – Ti_2Ni и $TiNi_3$. В слое $TiNi$ трещины не обнаружены. Расчет деформации для раскрытия трещины показал, что относительное удлинение фазы $TiNi_3$ за счет трещин составило 0,23 %. Показано, что после сварки через НС никелевую прослойку температура максимума прочности соединения на 50 °C ниже, чем после сварки через КЗ прослойку.

В четвертой главе описан механизм образования соединения титанового сплава с нержавеющей сталью через прослойку никеля. Приводится расчет, согласно которому при снижении температуры в интервале -10...100 °C учет вклада АМП в слое $TiNi$ приводит к значительно большей деформации диффузационной зоны, чем при учете лишь стандартных значений КТР при комнатной температуре соединяемых материалов и образующихся интерметаллидов. Так при охлаждении образцов на 15 °C линейные термические деформации составят 0,013 % для сплава ПТ-3В и до 0,025 % для нержавеющей стали. В то же время АМП приводит к сильному изменению КТР в слое $TiNi$ и увеличению термических деформаций до 0,165 %. При этом слой интерметаллида $TiNi_3$ подвергся деформации на 0,23 %. Такое поведение $TiNi$ приводит к существенному росту растягивающих напряжений на границе фаз с $TiNi$, а образующиеся пластины мартенситной фазы играют роль концентраторов напряжений.

Анализируется характер разрушения соединений. Показано, что использование НС никелевой прослойки не привело к решению проблемы получения надежного соединения титанового сплава с нержавеющей сталью. В зоне соединения продолжает присутствовать интерметаллид $TiNi$, АМП которого приводит к разрушению соединения по слоям Ti_2Ni и

$TiNi_3$. Автор приходит к выводу, что для повышения прочности соединения необходимо снизить температуру АМП в слое $TiNi$. Для этого предлагается легировать зону соединения небольшим количеством хрома, т.к. по литературным данным этот элемент наиболее сильно снижает температуру АМП.

В пятой главе изложены результаты соединению титанового сплава и нержавеющей стали через НС прослойку сплава X2H98. Наибольшая прочность наблюдается после сварки при 700 °C, и разрушение проходит по поверхности X₂H98/нержавеющая сталь. Это свидетельствует о повышении прочности соединения титанового сплава ПТ-3В с прослойкой при использовании X2H98. Показано, что в слое $TiNi$ содержание хрома 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 образуется интерметаллид $TiCr_2$.

Шестая глава посвящена исследованию 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 никеля и сплава X2H98. Наибольшей прочностью в 390 МПа обладал образец, полученный после сварки через прослойку X2H98 при температуре 700 °C в течение 20 мин. 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 °C наибольшая прочность в 380 МПа достигалась после сварки в интервале давлений 4-8 МПа. После выдержки образцов при 10 °C прочность соединения упала до 150...250 МПа. В образцах с прослойкой X2H98 после выдержки при 25 °C наибольшая прочность в 490 МПа была достигнута после сварки под давлением 12 МПа, что составляет 82% прочности нержавеющей стали. После выдержки сваренных образцов при -10 °C прочность соединения упала до 150...300 МПа, при этом наибольшая прочность также наблюдалась после сварки под давлением 12 МПа.

Таким образом, понижение температуры выдержки приводит к снижению прочности соединения при использовании прослойки, как из никеля, так и из сплава X2H98. Однако с уменьшением температуры выдержки прочность соединения через прослойку X2H98 падает медленнее, чем в случае никеля. Так после выдержки при температуре на 20 °C 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 °С, 20 мин, происходило по границе X2H98/12X18H10T. После сварки при более высоком давлении и выдержке при 25 °С разрушение проходило по границе интерметаллидов $Ti_2Ni+TiNi/TiNi_3$. После выдержки при -10 °С образцы, сваренные через прослойку X2H98, разрушались по интерметаллидам $Ti_2Ni+TiNi/TiNi_3$.

При использовании прослойки из X2H98 факт увеличения прочности соединения после выдержки при 25 °С, а также более медленное падение прочности при уменьшении температуры выдержки объясняется смещением температурного интервала АМП интерметаллида TiNi к более низким температурам. Высказывается предположение; что 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.

Наиболее важные научные результаты, полученные в диссертации

1. После диффузационной сварки титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через прослойку никеля разрушение происходит по межфазным границам $Ti_2Ni/TiNi$ и $TiNi/TiNi_3$ из-за значительного знакопеременного изменения КТР в результате аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi.
2. При использовании прослойки X2H98 в разрушение не вовлечен слой TiNi, что свидетельствует о том, что легирование интерметаллида TiNi хромом в количестве 0,2-0,6 ат.% смешает температурный интервал аустенитно-мартенситного превращения к более низким температурам.
3. Сваркой давлением в 12 МПа при 700 °С в течение 20 мин титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку X2H98 удалось получить прочность на отрыв 490 МПа, что составляет 82% прочности нержавеющей стали.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертационной работы подтверждаются большим объемом экспериментальных данных, их корректной статистической обработкой, применением современного исследовательского оборудования и анализом полученных результатов в соответствии с современными концепциями физики конденсированного состояния.

Научная ценность и практическая значимость работы

Научная ценность работы заключается в том, что впервые показано, что 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. Использованиеnanoструктурной прослойки из никеля позволяет снизить температуру сварки давлением на 50 °С. Использование прослойки из nanoструктурного никелевого сплава X2H98 вместо никелевой прослойки приводит к повышению прочности сварного соединения.

Практическая значимость работы заключается в том, что с использованием прослойки из сплава X2H98 удалось получить прочность на отрыв 490 МПа, что составляет 82% прочности нержавеющей стали. Кроме того, показана важность учета температурного интервала хранения и эксплуатации изделий, в которых присутствует диффузионное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через различные прослойки. Снижение температуры хранения может привести к снижению прочности соединения.

Замечания по диссертации

1. Использование в качестве прослойки чистого никеля не вполне оправдано. Наноструктурирование никеля дало слабый эффект. При нагреве до температуры сварки размер зерна никеля сильно вырос, и оптимальная температура сварки, обеспечивающая максимальную прочность, уменьшилась по сравнению с крупнозернистым состоянием всего на 50°С. Автору стоило выбрать нанокомпозит, представляющий собой никелевую матрицу с внедренными в нее мелкими дисперсными частицами, эффективно тормозящими рост зерна никеля при нагреве.
2. В работе показано, что снижение температуры выдержки ниже комнатной приводит к падению прочности соединения при комнатной температуре. Образцы с прослойкой из никеля охлаждали до +10°С, в то время как образцы с прослойкой из сплава X2H98 охлаждали до -10°С. Почему не охлаждали до одной температуры? Было бы интересно провести охлаждение до нескольких температур, чтобы проследить зависимость падения прочности от температуры выдержки.
3. В работе обнаружено влияние АМП интерметаллида TiNi на прочность соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из никеля. Однако не ясно, каков температурный интервал АМП TiNi, и как он меняется при

легировании интерметаллида TiNi хромом. Следовало бы определить температурный интервал АМП.

4. Применение в качестве материала прослойки сплава X2H98 позволило увеличить прочность соединения. При этом в зоне образования интерметаллида TiNi содержание хрома не превышает 0,5%. Были ли попытки использовать прослойку с большим содержанием хрома или провести поиск другого легирующего элемента, снижающего температуру АМП фазы TiNi?

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение

Р.Г. Хазгалиевым выполнено серьезное научное исследование по установлению влияния 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, на микроструктуру и прочность соединения. Показано, что использование прослойки из хромсодержащего наноструктурного никелевого сплава X2H98 вместо никелевой прослойки приводит к уменьшению эффекта значительного изменения КТР при аустенитно-мартенситном превращении интерметаллида TiNi и увеличению прочности соединения. Полученные результаты являются новыми, имеют научное и практическое значение. Автореферат и публикации правильно и достаточно полно отражают содержание диссертационной работы. Основные результаты диссертации полностью опубликованы в 14 работах, из которых 5 - в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Представленные в диссертации результаты докладывались и обсуждались на авторитетных научных конференциях. Диссертация Хазгалиева Руслана Галиевича является законченным квалификационным исследованием. Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. По актуальности, достоверности, научно-методическому уровню исследования, научной новизне и значимости полученных результатов диссертация, безусловно, соответствует пп.9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней» и п.1. паспорта специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Я, Алымов Михаил Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Директор ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им.

А.Г. Мержанова», доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Тел.: 8 (49652) 46-376

e-mail: director@ism.ac.ru

адрес: ул. Академика Осипьяна, д.8, г.
Черноголовка, Московская область, 142432,
Россия

Алымов Михаил Иванович
«07» 02 2020 г.

«Подпись М.И. Алымова удостоверяю»

Начальник отдела кадров ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова»