

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Хазгалиева Руслана Галиевича  
**«ВЛИЯНИЕ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОГО 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**

Получение новых материалов с высокими механическими и антакоррозионными свойствами важно для развития машиностроения, авиационной и химической промышленности. Расширить диапазон свойств материалов можно различными методами, и одним из перспективных направлений является использование биметаллов, например, соединений титановых сплавов с нержавеющими сталями. Соединения данных материалов позволяют совместить в одном изделии прочность стали и стойкость к коррозии титанового сплава.

Сварка давлением титановых сплавов и нержавеющих сталей перспективна, т. к. позволяет избежать дефектов, возникающих при сварке плавлением. Непосредственный контакт титана и железа при сварке давлением приводит к невысоким показателям прочности и пластичности соединения. Использование промежуточных прослоек из других материалов, обеспечивающих соединение материалов, позволяет избежать образования интерметаллидов системы Ti-Fe. В литературе основными причинами низких свойств соединения называют небольшую разницу коэффициентов теплового расширения (КТР) и образование хрупких интерметаллидных соединений в зоне соединения. При этом не учитывают возможные гораздо более сильные изменения КТР в образующихся фазах в результате протекания в них фазовых

превращений при охлаждении от температуры сварки до комнатной температуры. В процессе сварки давлением в диффузионной зоне могут образовываться фазы, которые имеют аномальные изменения КТР в результате низкотемпературных фазовых превращений. К таким превращениям относятся аустенитно-мартенситные превращение (АМП), имеющее место в соединениях Cu — Al, Cu — Al — Ni, Ni — Al, Co — Ni, Ti — Ni, а также инварный эффект, наблюдающийся в соединениях Ti — Nb, Ni — Co — Fe, Fe — Ni.

Таким образом, диссертация 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 среднего размера зерна прослойки на структуру и свойства соединения, а также причины разрушения соединения, является актуальной.

### **Структура и основное содержание диссертации**

Диссертация объемом в 145 страниц состоит введения, 6 глав, общих выводов и списка литературы из 119 наименований. Работа содержит 74 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения.

**Во введении** автор обосновывает актуальность темы исследования, сформулировал цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** (литературный обзор) описаны способы соединения титановых сплавов и нержавеющих сталей, как без прослоек, так и с использованием прослоек из чистых металлов, сплавов и сочетаний нескольких прослоек. Разрушение полученных соединений происходило по одной из границ прослойка – соединяемый материал, а причиной разрушения авторы исследований называли различие КТР исходных материалов и образующихся хрупких интерметаллидных фаз. Между тем, в зоне диффузионной сварки могут образовываться фазы, свойства

которых не учитывали при анализе причин разрушения. Например, при диффузионной сварке нержавеющих сталей с титановыми сплавами с использованием тонкой прослойки из никеля со стороны титанового слоя формируются слои интерметаллидов  $Ti_2Ni$ - $TiNi$ - $TiNi_3$ . Если в слоях  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$  не обнаружено каких либо фазовых превращений, то в слое  $TiNi$  в температурном интервале вблизи комнатной температуры имеет место АМП. Ранее на влияние АМП в слое  $TiNi$  на свойства соединения не обращали внимание. Хазгалиев Р.Г. впервые указывает на необходимость учета влияния АМП в слое  $TiNi$  на механические свойства и характер разрушения диффузионного соединения стали и титанового сплава. Кроме того, Хазгалиев Р.Г. предлагает уменьшить возможное негативное влияние АМП в слое  $Ti-Ni$  путем легирования этого слоя элементами, снижающими температурный интервал АМП.

Во второй главе изложены составы использованных материалов и методики исследования. Для сварки давлением в вакууме использовали титановый сплав ПТ-3В и нержавеющую сталь 12Х18Н10Т, а в качестве прослойки использовали тонкие пластины из никеля и сплава Х2Н98 (Ni – 2 ат.% Cr). Для анализа микроструктуры применяли световой микроскоп, растровый электронный микроскоп с приставками для локального химического анализа (EDX) и дифракции в обратно-отраженных электронах (EBSD), рентгеновский дифрактометр. Структурные исследования и механические испытания на одноосное растяжение и микротвердость проводили на аттестованном оборудовании в ЦКП ИПСМ РАН.

В третьей главе представлены результаты исследования сварки давлением титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку из крупнозернистого и наноструктурного никеля. Рассмотрено влияние температуры сварки на состав зоны соединения, микроструктуру и механические свойства. Определена возможность получения соединения в температурном интервале 650...850 °С. Установлено, что после сварки

через наноструктурную никелевую прослойку температура максимума прочности соединения на 50<sup>0</sup>C ниже, чем после сварки через крупнозернистую прослойку. Показано, что при сварке при 750<sup>0</sup>C формируются три слоя интерметаллидов Ti<sub>2</sub>Ni, TiNi и TiNi<sub>3</sub>. При сварке выше 750<sup>0</sup>C в титановом сплаве вблизи зоны соединения формируется двухфазная пластинчатая структура а+β-Ti. При использовании наноструктурной никелевой прослойки интерметаллиды Ti - Ni образовывались при более низких температурах. В диффузационной зоне соединения никель/12Х18Н10Т слоистую структуру новых фаз не наблюдали. Электротравление позволило выявить мелкие периодически расположенные трещины в слоях Ti<sub>2</sub>Ni и TiNi<sub>3</sub>. При этом, в слое TiNi трещины не обнаружены. Согласно расчету относительное удлинение фазы TiNi<sub>3</sub> за счет трещин составляет 0,23 %. Также установлено, что фаза TiNi присутствует в двух модификациях - В2 и В19'.

**В четвертой главе** обсуждается механизм образования соединения титанового сплава с нержавеющей сталью через прослойку никеля. Хазгалиев Р.Г. делает расчет в первом приближении, согласно которому при снижении температуры учет вклада АМП в слое TiNi приводит к значительно большей деформации зоны диффузационной сварки, чем при учете лишь стандартных значений КТР при комнатной температуре соединяемых материалов и образующихся интерметаллидных фаз. Согласно расчету при охлаждении образцов на 15<sup>0</sup>C линейные термические деформации составляют 0,013 % для сплава ПТ-3В и почти 0,025 % для нержавеющей стали. В то же время АМП, сопровождающееся сильным изменением КТР в слое TiN, приводит к увеличению термических деформаций до 0,165 %. При этом согласно расчетам, приведенным в главе 3, слой интерметаллида TiNi<sub>3</sub> подвергается деформации на 0,23 %. Таким образом, АМП превращение в слое TiNi сопровождается значительным ростом растягивающих напряжений на границе смежных с

TiNi фаз -  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$ . По-видимому, концентраторами напряжений служат пластины мартенситной фазы.

Несмотря на снижение температуры диффузационной сварки при использовании исходно наноструктурной никелевой прослойки, в зоне разрушения присутствует интерметаллид  $TiNi$ , аустенитно-мартенситное превращение в котором АМП разрушает слои  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$ . На основе полученных результатов Хазгалиев Р.Г. логично приходит к выводу о том, что для повышения прочности соединения необходимо снизить температуру АМП в слое  $TiNi$  путем легирования зоны соединения небольшим количеством хрома. Согласно литературным данным добавление хрома наиболее сильно снижает температуру АМП интерметаллиде  $TiNi$ .

Пятая глава посвящена соединению титанового сплава и нержавеющей стали через наноструктурную 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  $\sigma_B=400\pm20$  МПа (82% от прочности нержавеющей стали) обладают образцы, полученные сваркой давлением при температуре  $700^0C$ . При этом разрушение проходит по поверхности X2H98/нержавеющая сталь.

Формирование слоев интерметаллидов происходит примерно так же, как и в случае никеля. Несмотря на то, что основная часть хрома скапливается у границы  $TiNi_3/X2H98$  в виде  $TiCr_2$ , часть хрома проникает в слой  $TiNi$ . Его содержание в слое  $TiNi$  при  $700$ ,  $750$  и  $800^0C$  составляет примерно 0,2%, 0,25% и 0,6% соответственно. Автор приходит к выводу, что для повышения прочности соединения прослойка / нержавеющая сталь необходимо увеличить время выдержки или усилие при сварке давлением. Повышение температуры не приводит к повышению прочности соединения.

**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 наноструктурные прослойки из никеля и сплава Х2Н98.

Установлено, что 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.

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 Х2Н98 при 4 МПа, 700 °С, 20 мин, происходило по границе Х2Н98/12Х18Н10Т. 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 Х2Н98 разрушались по интерметаллидам  $Ti_2Ni+TiNi/TiNi_3$ .

Эксперимент по исследованию влияния выдержки сваренных образцов при различных температурах показал, что выдержка 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-маргентитного превращения к более низким температурам. Таким

образом, в случае Х2Н98 при комнатной температуре аустенитно-мар滕ситное превращение только начинается и его отрицательное влияние на прочность меньше, чем в случае никелевой прослойки, где степень превращения выше.

### **Наиболее важные научные результаты диссертации.**

1. 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-мар滕ситного превращения в слое TiNi.
2. Сварка давлением 12 МПа при  $700^{\circ}C$  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.
3. 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-мар滕ситного превращения к более низким температурам.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием методик испытания, соответствующих ГОСТ, поверенного оборудования, обоснованностью поставленных задач, корректной статистической обработкой полученных данных.

Результаты работы прошли апробацию на многих всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в научных статьях,

входящих в список ведущих рецензируемых научных изданий. Личный вклад автора не вызывает сомнений, во всех публикациях он является первым по списку автором.

### **Научная ценность и практическая значимость работы**

Научная ценность работы заключается в том, что использованиеnanoструктурной никелевой прослойки позволяет на 50°C снизить температуру сварки давлением. Впервые показано, что на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через никелевую прослойку оказывает влияние сильное изменение КТР при аустенитно-марテンситном превращении в фазе TiNi. Использование в качестве прослойки никелевого сплава с небольшим содержанием хрома (Х2Н98) повышает прочность сварного соединения. Обнаруженное влияние аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi указывает на необходимость недопущения охлаждения ниже определенной температуры изделий, в которых присутствует соединение разнородных сплавов через различные металлические прослойки.

Практическая значимость работы заключается в том, что с использованием прослойки из сплава Х2Н98 удалось получить прочность на отрыв 490 МПа, что составляет 82% прочности нержавеющей стали.

### **Замечания по диссертации**

1. При нагреве nanoструктурного никеля до температуры сварки давлением размер зерна никеля существенно вырастает, вследствие чего эффект такого nanoструктурирования не высок. Возможно, стоило использовать сплав никеля с более термостабильной структурой.

2. Автором показано влияние АМП фазы TiNi на прочность соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля и сплава Х2Н98. Не ясно, как сильно под влиянием хрома изменился температурный интервал АМП, на какую величину уменьшилась

температура начала данного превращения? Представляется ли возможным сместить АМП к еще более низким температурам, учитывая, что хром слабо проникает в слой фазы TiNi с увеличением температуры и времени выдержки?

3. В работе показано, что с повышением давления до 12 МПа прочность образующегося соединения растет, что явно связано с деформацией заготовок при сварке давлением особенно в зоне образования соединения. Проводился ли анализ влияния локализации деформаций на прочность соединения, планируются ли такие исследования локализации и распределения деформаций при сварке давлением?

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

### **Общее заключение**

Диссертационная работа Хазгалиева Р.Г. представляет собой логично построенное комплексное исследование, написанное понятным и грамотным языком. Диссертация содержит большое количество графиков и иллюстраций, помогающих пониманию её содержания. Основные научные результаты диссертации опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, и доложены как на Всероссийских, так и на Международных конференциях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Р.Г. Хазгалиева выполнена на достаточно высоком научно-исследовательском уровне и представляет собой завершенную научно-квалификационную работу. По своему содержанию диссертационное исследование Р.Г. Хазгалиева безусловно соответствует паспорту специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния» и соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени

кандидата наук, а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Я, Глезер Александр Маркович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой докторской совета, и их дальнейшую обработку.

Директор Научного Центра  
металловедения и физики металлов  
им. Г.В. Курдюмова в составе ФГУП  
«Центральный научно-исследователь-  
ский институт черной металлургии  
имени И.П. Бардина»,  
доктор физ.-мат. наук (01.04.07),  
профессор

Глезер Александр Маркович

14 февраля 2020 г.

тел.: 7(916) 122-19-74  
e-mail: [a.glezer@mail.ru](mailto:a.glezer@mail.ru)  
адрес: 105005 Москва, ул. Радио,  
д.23/9, строение 2.

Подпись А.М. Глезера ЗАВЕРЯЮ  
Ученый секретарь  
ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина



Москвина Татьяна Павловна