



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ УрО РАН

академик РАН

Н.В. Мушников

«21» февраля 2020 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 темы диссертации

Проблема создания прочных соединений разнородных материалов, которые трудно получить сваркой плавлением, является одной из важных научно-технических задач в современной физике конденсированных состояний. В частности, к таким парам соединяемых материалов относятся, в частности, титановые сплавы и нержавеющие сплавы и стали железа. При этом титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, а нержавеющие стали – высокой износостойкостью и прочностью. Композитные материалы на их основе будут сочетать прочность стали с высокой химической стойкостью титанового сплава и востребованы в технике, например, в парогенераторах и теплообменниках ядерных энергетических установок, изделиях и устройствах для химической промышленности при защите стальных конструкций от активного внешнего химического или иного воздействия.

Одним из перспективных методов соединения подобных материалов может служить сварка давлением, при которой исключается неконтролируемое образование охрупчивающих фаз, возникающих, например, при сварке плавлением. Однако прямое соединение титанового сплава и нержавеющей стали сваркой давлением не удается осуществить из-за образования хрупких интерметаллидных фаз в зоне сварки. Избежать образования интерметаллидов возможно, используя прослойки между титановым сплавом и нержавеющей сталью, обеспечивающие, с одной стороны, их прочное соединение, а с другой, препятствующие образованию хрупких интерметаллидов.

Процесс сварки давлением титанового сплава и нержавеющей стали был изучен при использовании крупнозернистой никелевой прослойки. Оказалось, что в диффузионной зоне «титановый сплав / прослойка» образуются сплошные слои интерметаллидов  $TiNi$ ,  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$ . При этом две последние фазы могут охрупчивать соединение. Основной причиной разрушения соединения через прослойку, как из чистого никеля, так и сплава на основе никеля по интерметаллидным слоям предполагают различия КТР исходных соединяемых материалов и хрупких фаз  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$ .

На качество сварного соединения может влиять размер зерен прослойки. Соединение черезnanoструктурную прослойку приведет к существенному повышению диффузионной активности материала и, как следствие, позволит снизить температуру сварки давлением и привести к изменению процессов, происходящих при формировании сварного соединения, в частности, процессов образования интерметаллидных слоев в диффузионной зоне.

В связи с этим диссертационная работа Хазгалиева Р.Г., посвященная определению закономерностей формирования соединения сваркой давлением титанового сплава с нержавеющей сталью при использовании прослойки из никеля и никелевого сплава с различным размером зерна и изучению влияние аустенитно-марテンситного превращения в буферном слое  $TiNi$  на прочность диффузионного соединения, безусловно, является актуальной.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа Хазгалиева Р.Г. состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы из 119 цитируемых источников. Во введении обоснована актуальность темы и степень разработанности диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, описаны научная новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, достоверность и обоснованность, а также представлены положения, выносимые на защиту. Основное содержание диссертации представлено в 14 научных публикациях, в том числе в 5 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Диссертация содержит 145 страниц текста, 74 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены проблемы соединения разнородных материалов на примере соединения титанового сплава и нержавеющей стали. Представлено практическое применение таких соединений. Описаны различные методы получения соединений титанового сплава и нержавеющей стали и использования прослоек других материалов в качестве барьера для образования интерметаллидов системы титан-железо.

Во второй главе описаны методы получения соединений и 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 X2H98 (Ni – 2 ат.% Cr). Для получения наноструктурного никеля и его сплава, легированного 2% Cr, с размерами зерен в никеле и сплаве X2H98 200...400 нм их деформировали методом кручения под квазигидростатическим давлением. Размеры соединяемых заготовок составляли 5x5x16 мм<sup>3</sup>. Сварку давлением образцов осуществляли на установке «АЛА-ТОО (тип ИМАШ 20-78)». Использовали режимы сварки: давление Р = 4...16 МПа, температура 650, 700, 750 и 850°C, время сварки t = 20, 60, 120 и 180 мин. Микроструктуру исследовали на растровом электронном микроскопе Tescan Vega с энергодисперсионным анализом. Измеряли механические свойства соединений.

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

В четвертой главе рассмотрен механизм образования соединения титанового сплава с нержавеющей сталью через прослойку никеля. В отличие от соединения с использованием крупнозернистой прослойки соединение через прослойку из наноструктурированного никеля действительно получается при более низкой температуре. Это связано с высокой диффузионной активностью наноструктурного материала. 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 препятствуют образованию физического контакта свариваемых поверхностей. Появление большего количества активных центров приводит к снижению температуры сварки давлением при использовании наноструктурной прослойки.

В пятой главе приведены результаты исследования соединения титанового сплава и нержавеющей стали через наноструктурную прослойку сплава X2H98. Показано, что использование хромсодержащего никелевого сплава повышает прочность соединения ПТ-3В / прослойка и меняет место разрушения при испытании на разрыв.

Шестая глава содержит результаты исследования влияния сварочного давления и выдержки при пониженных температурах после сварки давлением, на прочность

диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через НС прослойки из Ni и сплава X2H98.

Выводы, в которых сформулированы основные результаты исследования, завершают диссертационную работу.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

В работе получен ряд новых и важных и методологических результатов. К наиболее существенным относятся следующие результаты:

1. Показано, что наноструктурирование никелевой прослойки позволяет снизить температуру сварки давлением титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

2. Установлен эффект значительного изменения коэффициента термического расширения при аустенитно-martенситном превращении слоя интерметаллидной фазы TiNi, образующейся при сварке давлением титанового сплава ПТ-3В и нержавеющей стали 12Х18Н10Т через никелевую прослойку, что приводит к возникновению микротрещин в образующихся соседних слоях  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$  при охлаждении после сварки давлением и снижению прочности соединения.

3. Обнаружено, что использование прослойки из хромсодержащего наноструктурного никелевого сплава X2H98 вместо никелевой прослойки приводит к уменьшению эффекта значительного изменения коэффициента термического расширения 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 результатов диссертационной работы**

Фундаментальные результаты, полученные в диссертации, развиваются и расширяют представления физики конденсированного состояния о физических явлениях, механизмах и закономерностях формирования соединения титанового сплава и нержавеющей стали сваркой давлением через никелевую прослойку. Показано, что оказывает влияние на прочность соединения не только разница коэффициента термического расширения соединяемых материалов, но и коэффициента термического расширения образующихся при сварке интерметаллидных фаз системы Ti-Ni и эффект значительного изменения коэффициента термического расширения при аустенитно-мартенситном превращении в интерметаллидном слое TiNi. Применение наноструктурных прослоек из никеля позволяет снизить температуру сварки давлением на 50°C. Выполнение прослойки из

nanoструктурного никелевого сплава X2H98 вместо никелевой прослойки приводит к повышению прочности сварного соединения. Важно, что при этом при использовании и хранении готовых изделий с соединением титанового сплава и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением через прослойку из никеля и сплава X2H98, следует контролировать температуру их хранения и эксплуатации. Снижение температуры хранения может привести к снижению прочности соединения.

#### **Достоверность и обоснованность результатов исследования**

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов, выводов и положений определяется применением современных апробированных методов и подходов, модельных представлений, комплексным исследованием на современном сертифицированном экспериментальном оборудовании, воспроизводимостью и соответствием известных данных с результатами, полученными автором разными взаимодополняющими методами.

#### **Апробация работы**

Результаты работы широко обсуждались на многочисленных профильных научных конференциях, хорошо представлены в достаточном количестве публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях, что свидетельствует об их признании. Автореферат работы полностью воспроизводит содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует указанной специальности. Диссертационная работа выполнена в рамках госзадания ИПСМ РАН.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и российских конференциях: II Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения», Абхазия, 2011 г.; Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложение в естествознании», г. Уфа, 2011 г.; Международная школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы прочности», г. Уфа, 2012 г.; Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и nanoструктурные материалы (УМЗНМ)», Уфа 2012 года; III-я Молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения» Абхазия, 2013 г.; Открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 2014 г.; LVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», г. Севастополь, 2016 г.;

Открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 2016 г.; Открытая школа-конференция стран СНГ «УМЗНМ», г. Уфа, 2018 г.

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАК.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Не вполне корректно использован термин наноструктурный для линейных размеров зерен (например, во второй главе).
2. Существенно недостает как в исследовании, так и в результативной части диссертации применения просвечивающей электронной микроскопии более высокого разрешения и информативности, чем использованная в работе растровая электронная микроскопия.
3. Осталось не вполне ясным почему потребовалось дополнительное легирование никелевой прослойки 2% хрома, а не другим количеством. В нержавеющей стали 12H18X10T его гораздо больше и очевидно его участие в диффузионном процессе сварки давлением.
4. Какого влияние наиболее диффузионно активного углерода кроме его роли связующего в карбидах.

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы и ее высокой положительной оценки.

### **Общая оценка диссертационной работы**

В целом диссертационная работа Хазгалиева Р.Г. «Влияние аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля и сплава никель-хром» является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены важные теоретические и экспериментальные результаты. Диссертация имеет все необходимые разделы от постановки задачи, методов их решения до результатов расчетов и экспериментов, их анализа и выводов. Материалы работы представлены в большом числе публикаций. Автореферат диссертации и публикации полно и правильно отражают содержание работы. Диссертационное исследование Хазгалиева Русланом Галиевичем соответствует пунктам 1 и 3 паспорта специальности 01.04.07.

### **Заключение**

Считаем, что диссертационная работа «Влияние аустенитно-мартенситного превращения в слое TiNi на прочность диффузионного соединения титанового сплава и нержавеющей стали через прослойку никеля и сплава никель-хром» удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, изложенным в пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Хазгалиева Р.Г. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на объединенном научном семинаре лаборатории механических свойств и цветных сплавов ИФМ УрО РАН 23 октября 2019 г (Протокол № 6).

Отзыв утвержден на заседании Ученого совета ИФМ УрО РАН 5 февраля 2020 г. (протокол № 5 от 5.02.2020 г.).

Главный научный сотрудник лаборатории механических свойств ИФМ УрО РАН,

член-корреспондент РАН, доктор техн. наук

В.В. Сагарадзе

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

тел.: (343) 374-42-14; e-mail: vsagaredze@imp.uran.ru

Я, Сагарадзе Виктор Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Учёный секретарь ИФМ УрО РАН

кандидат физ.-мат. наук

И.Ю. Арапова