

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Галиевой Эльвины Венеровны  
**«Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al и  
жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической  
деформации»**, представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности

05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время для разработки и изготовления газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения имеется острая потребность в новых перспективных технологиях получения неразъемных соединений, например, в узлах деталей типа блиск, диск–диск, диск–вал из жаропрочных никелевых и титановых сплавов с целью повышения надежности и снижения массы роторных конструкций. Для получения неразъемных твердофазных соединений применяются различные методы сварки давлением, а также разрабатываются новые перспективные ресурсосберегающие технологии. При этом, важным является также не только выбор метода сварки давлением, применимого для конкретного сочетания сплавов, но и определение оптимальных режимов деформации при осуществлении процесса соединения в твердом состоянии материалов, которые могут существенно различаться по структуре, технологическим и эксплуатационным свойствам. Одной из перспективных технологий получения твердофазных соединений является сварка давлением в условиях сверхпластичности (СП), которая, как известно на примере титановых сплавов, ускоряет кинетику формирования твердофазного соединения (ТФС), позволяет существенно снизить температуру деформации и сократить длительность процесса в сравнении с классической диффузионной сваркой. Однако, применительно к никелевым сплавам, вопрос об эффективности применения сверхпластичности в технологии получения неразъемных соединений, остается малоизученным. В этой связи большой интерес представляют исследования, связанные с разработкой научно-обоснованных материаловедческих решений, которые могли бы обеспечить получение надежных ТФС из разноименных сплавов

на основе никеля. Исходя из вышеизложенного следует, что тема исследования, выбранная диссидентом, является актуальной для авиационного машиностроения.

### **Оценка структуры и основного содержания работы**

Диссертационная работа Галиевой Э.В. состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы. Объем диссертации составляет 195 страниц, включая 82 рисунка, 9 таблиц, 1 приложение и 194 источника цитируемой литературы.

**Во введении** автором обоснована актуальность направления исследования, показана степень разработанности научной темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, апробация результатов работы, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор научной литературы по теме диссертации. Представлена общая характеристика жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС). Рассмотрены известные методы получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в ЖНС и их влияние на сверхпластические свойства. Описаны различные методы получения неразъемных соединений из металлов и сплавов, в том числе на основе никеля, а также представлены данные влияния термической обработки на микроструктуру и свойства никелевых сплавов.

**Во второй главе** описаны материалы исследования: деформируемые жаропрочные никелевые сплавы ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы, а также интерметаллидные сплавы типа ВКНА на основе фазы  $Ni_3Al$ . Представлены методики, применяемые в работе для исследования структуры и свойств исследуемых материалов после различных режимов обработки. Подробно описана методика сварки давлением в условиях СП выбранного деформируемого сплава, например, ЭП975, с использованием герметичного контейнера для обеспечения вакуума в процессе эксперимента.

**В третьей главе** представлены результаты механических испытаний на сжатие и растяжение, выполненные в широком интервале температур 600...1125 °C, деформируемых сплавов ЭК61 и ЭП975. Описаны микроструктурные изменения, возникшие в результате воздействия температуры и деформации. Показано, что формирование в результате низкотемпературной деформационно-термической обработки (ДТО) УМЗ структуры смешанного типа позволяет реализовать в никелевых сплавах ЭК61 и ЭП975 эффект низкотемпературной СП, максимальные характеристики ( $m \geq 0,4$ ,  $\delta > 1000\%$ ) которой достигаются при температурах 800-850 °C и 950 °C соответственно.

**В четвертой главе** описаны результаты сварки давлением сплава ЭК61 с использованием эффекта СП как в одноименном сочетании, так и в разноименном с экспериментальным сплавом ВКНА-моно. Продемонстрирована роль сверхпластической деформации при соединении сплавов на основе никеля в твердом состоянии при пониженной температуре 800 °C в условиях низкотемпературной СП. В этой главе приведены интересные результаты по экспериментальному и компьютерному моделированию влияния формы рельефа, созданного на поверхности сплава ВКНА-моно, на микроструктуру и картину распределения сдвиговой деформации в зоне ТФС. Показано, что предпочтительной формой рельефа, который может быть создан на соединяемой поверхности более прочного интерметаллидного сплава типа ВКНА-моно, является плоская или синусоидальная.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментов по сварке давлением с использованием сверхпластической деформации сплава ЭП975 со сплавами ВКНА-моно и ВКНА-25. На сварных образцах в сочетании ЭП975//ВКНА-25 проанализировано влияние исходной микроструктуры сплава ЭП975, а также влияние степени деформации и температуры на формирование ТФС. Представлен очень подробный и качественный анализ закономерностей формирования градиентных структур и изменения фазового состава в зоне ТФС, происходящих при сварке давлением в результате развития сверхпластической деформации и процессов гетеродиффузии, приводящих к монотонному изменению распределения легирующих элементов в зоне ТФС при переходе от одного соединяемого материала к другому.

**В шестой главе** изложены результаты влияния термической обработки сварных соединений в сочетании сплавов ЭП975 и ВКНА-25 на микроструктуру и свойства. Представлены результаты механических испытаний сварных соединений в сочетании сплава ЭП975 со сплавом ВКНА-25 как после сварки давлением, так и после термической обработки. По результатам исследований, приведенных в данной главе, автором также показано, что усовершенствованная методика высокотемпературной сварки давлением, направленная на улучшение глубины вакуума на порядок с  $5 \cdot 10^{-1}$  Па до  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, обеспечивает достижение прочности ТФС в сочетании сплавов ЭП975//ВКНА-25 до значений 1075-1326 МПа при комнатной температуре, которые соответствуют уровню прочности сплава ВКНА-25, а в ряде случаев даже превышают его. Разрушение сварных образцов при механических испытаниях на растяжение происходило по основному соединяемому материалу - сплаву ВКНА-25, а не по области ТФС.

**В заключении** диссертации представлены основные выводы.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность выводов и достоверность результатов определяется тем, что все эксперименты выполнены на аттестованном научно-исследовательском оборудовании центра коллективного пользования ИПСМ РАН. Результаты получены с применением комплекса современных независимых методов исследования структуры и механических свойств и стандартных методик статистической обработки экспериментальных данных. Выводы и научные положения, изложенные в диссертации Галиевой Э.В., получены на основе анализа результатов многочисленных экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Все представленные в диссертационной работе результаты в полной мере апробированы и обсуждены на различных международных и российских конференциях и съездах, и представлены в 20 статьях, опубликованных в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах, среди которых 14 статей

опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. 8 статей автора индексируются в базе данных Web of Science, а 12 - в базе данных Scopus, причем 1 статья имеет принадлежность к quartile Q1. 5 научных публикаций - в трудах конференций.

По результатам научно-технических разработок автором созданы 1 технологические рекомендации, а также заявка на изобретение, на которую получен патент РФ №2608118.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, не вызывает сомнений.

### **Научная новизна диссертации**

1. На примере деформируемых жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 впервые показано, что формирование «смешанной ультрамелкозернистой структуры» позволяет реализовать эффект низкотемпературной сверхпластичности в условиях пониженных температур деформации до 675-900 °C и 900-1000°C, соответственно.

2. Впервые проведены системные исследования и установлены закономерности формирования градиентных структур в зоне твердофазного соединения из разноименных сплавов на основе никеля при сварке давлением в условиях сверхпластичности, а также последующей термической обработки.

3. Впервые показано, что сварка давлением в условиях сверхпластичности является эффективным методом для получения качественных твердофазных соединений из высокожаропрочных сплавов на основе никеля: деформируемого сплава ЭП975 и литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с монокристаллической структурой, прочность которых соответствует материалу ВКНА-25.

Научные положения и выводы, изложенные в диссертации, являются обоснованными, достоверными и имеющими новизну.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные в диссертации научные результаты впервые на примере конкретных жаропрочных сплавов на основе никеля подтверждают эффективность влияния структурной сверхпластичности на формирование качественных

твердофазных сварных соединений при сварке металлических сплавов в твердом состоянии. Практическая значимость работы определяется разработкой конкретных режимов получения ультрамелкозернистой структуры в объемных полуфабрикатах из жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975. Также разработаны научно-обоснованные режимы получения твердофазных соединений интерметаллидного сплава ВКНА-25 с деформируемым сплавом ЭП975, прочность которых соизмерима с основным материалом ВКНА-25. Новизна разработанных технических решений по сварке давлением разноименных никелевых сплавов защищена патентом РФ № 2608118 «Способ изготовления биметаллического изделия».

### **Соответствие автореферата диссертации**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и научным статьям, опубликованным Галиевой Э.В.

### **По диссертации имеется ряд замечаний**

1. В главе 1 при выборе способа сварки для соединения жаропрочных никелевых сплавов в качестве основного аргумента против применения сварки трением указывается наличие значительных микроструктурных изменений в поперечном направлении сварного соединения. Однако градиенты микроструктуры и концентрации химических элементов неизбежны при любом способе сварки деталей, имеющих отличающийся химический состав, они выявлены автором и в твердофазных соединениях ЭП975//ВКНА-25, ЭП975//ВКНА-моно, ЭК61//ВКНА-моно.

2. Методики оценки качества твердофазного соединения и механических испытаний разработаны без учета предполагаемой области применения предложенной технологии (изготовление узлов турбины ГТД), и не включают испытаний на ползучесть и циклическую прочность. Данное замечание, учитывая большой объем полученных в работе результатов, автор может рассматривать как пожелание для дальнейших исследований.

3. В работе показано, что микроструктура деформируемой детали может оказывать определяющее воздействие на процесс формирования ТФС. Вместе с тем

не описано, как состояние образцов, полученных методами ДТО с использованием технологической схемы ВИК, соотносится с микроструктурой серийных заготовок, получаемых по имеющимся технологиям изготовления валов и дисков из сплавов ЭП975 и ЭК61.

4. На страницах 124 и 154 диссертации автор упоминает эффект Киркендалла, однако далее по тексту этот эффект не обсуждается. Поэтому, исходя из текста диссертации, непонятно, обнаруживается ли этот эффект при сварке давлением сплава ЭП975 со сплавом ВКНА-25, а также сплава ЭК61 со сплавом ВКНА-моно?

5. По тексту диссертации некоторые микроструктуры, например, приведенные на рисунках 4.4-4.6 достаточно темные, что затрудняет анализ микроструктурных составляющих.

6. Предложенная автором технология сварки разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25 предполагает деформацию детали из сплава ЭП975 на величину от 24 до 40%. Достижение такой деформации при переходе от образцов к реальным конструкциям валов и дисков потребует серьезной технологической проработки и разработки нового оборудования.

7. В диссертации на рисунке 5.15 карты контрастов совмещены с EBSD картами. Такое совмещение затрудняет совместный анализ особенностей микроструктурных изменений в зоне ТФС.

8. Установленное автором влияние на качество ТФС таких трудно контролируемых в производственных условиях факторов, таких как состояние поверхности и форма рельефа, микроструктура деформируемой заготовки, степень вакуума свидетельствует о необходимости проработки технологии неразрушающего контроля, обеспечивающего выявление возможной пористости в твердофазных соединениях.

9. В таблице 6.1 по всей видимости имеются ошибки. Так, в ней указано, что при пределе прочности соединения ЭП975//ВКНА-25  $\sigma_{B}^{850}=507$  МПа, и прочности основного материала (ВКНА-25)  $\sigma_{B}^{850}=789$  МПа относительная прочность соединения составляет 0,5.

В целом, указанные замечания не снижают ценности и общей положительной оценки диссертации.

## **Заключение**

Диссертационная работа Галиевой Эльвины Венеровны на тему «Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей паспорту специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (п. 1-4 и 6). Диссертация Галиевой Э.В. соответствует требованиям ВАК РФ и критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата наук (пп. 9-11, 13, 14), установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор Галиева Эльвина Венеровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Я, Медведев Александр Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

## **Официальный оппонент:**

Доцент, доктор технических наук по специальности 05.16.08 - Нанотехнологии и наноматериалы (металлургия и материаловедение), доцент кафедры «Сварочных, литейных и аддитивных технологий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

E-mail: 79174567066@ya.ru

Адрес: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 2

Тел. +73472730866

Медведев  
Александр Юрьевич

137

«18» апреля 2021 г.



Медведева А. И.  
верю « 28 » 04 2021 г.  
ник отдела документационного обеспечения  
з. Роженкова А.Ф.

Подпись А.Ю. Медведева удостоверяю: