

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический



С. В. Брованов

«17» апреля 2021 г.

**ОТЧЫТ**

ведущей организации 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 к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

В диссертационной работе Галиевой Э.В. исследованы закономерности структурно-фазовых изменений при формировании твердофазных соединений из разноименных сплавов на основе никеля, полученных при сварке давлением в условиях сверхпластичности и подвергнутых дополнительной термической обработке.

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач материаловедения является разработка научно-обоснованных технологических режимов получения качественных твердофазных соединений (ТФС) из разноименных жаропрочных сплавов, в частности, на основе никеля. Получение таких ТФС из никелевых сплавов, существенно различающихся по жаропрочным характеристикам, позволит создать научно-технический задел, необходимый для разработки инновационных технологий изготовления различных биметаллических деталей, например, типа «Блиск» (представляющих собой цельный диск с лопatkами), что позволит обеспечить существенный прогресс в авиа двигателестроении при создании новых газотурбинных двигателей (ГТД) 5-го и 6-поколений. При этом, применение в конструкциях типа «Блиск» лопаточных интерметаллидных сплавов типа ВКНА-25 с монокристаллической структурой, которые имеют по сравнению с традиционными литейными никелевыми сплавами повышенную жаропрочность и более низкую плотность позволит снизить вес таких конструкций. Кроме того, применение биметаллических деталей создаст условия для реализации новых конструкторских решений при разработке новых ГТД, направленных на уменьшение их массы, а также повышения их энергоэффективности и увеличения ресурса. Несмотря на известные достижения по применению различных методов сварки и пайки для получения неразъемных соединений из разноименных сплавов на основе никеля представляется весьма перспективным метод сварки давлением в условиях сверхпластичности, который продемонстрировал свою эффективность на примере титановых сплавов. По-видимому, этот метод может быть весьма эффективен для получения качественных ТФС из разноименных сплавов на основе никеля, существенно отличающихся по химическому составу, структуре и свойствам. В связи с этим тема диссертационной работы Галиевой Э.В., связанная с разработкой научно-обоснованных технологических режимов получения качественных ТФС из разноименных жаропрочных сплавов на основе никеля является актуальной.

Л. А. Брованов  
№ 266  
от 30.04.21

## **Структура и основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 194 наименований. Общий объем диссертации составляет 195 страниц, в том числе 82 рисунка, 9 таблиц, 1 приложение.

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, изложены степень разработанности темы исследования, методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту. Данна характеристика научных публикаций и личного вклада соискателя.

**В первой главе** представлен обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Рассмотрены известные методы получения неразъемных соединений из металлов и сплавов. Особое внимание уделено анализу методов сварки давлением, в том числе диффузионной сварки, а также метода высокотемпературной пайки для получения твердофазных соединений из одноименных и разноименных сплавов на основе никеля. В данном разделе описаны также известные методы деформационно-термической обработки для получения в гетерофазных никелевых сплавах мелкозернистой и ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и их влияние на сверхпластические свойства. На основе проведенного обзора научной литературы сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** представлены данные об исследуемых материалах, и методах их обработки, а также методах исследования структуры и свойств. Следует отметить, что в качестве объектов исследования выбраны деформируемые никелевые сплавы с различным типом упрочняющей фазы: ЭК61 ( $\gamma''$ -фаза –  $Ni_3Nb$ ) и ЭП975 { $\gamma'$ -фаза –  $Ni_3(Al,Ti)$ } с крупнозернистой и мелкозернистой структурой, соответственно, а также монокристаллические литье интерметаллидные сплавы типа ВКНА на основе  $Ni_3Al$ . Такой подход позволил автору, во-первых, установить особенности формирования мелкозернистой (1-10 мкм) или УМЗ (менее 1 мкм) структуры дуплексного типа в деформируемых сплавах ЭК61 и ЭП975 и их влияние на проявление эффекта сверхпластичности. Во-вторых, оценить эффективность выбранного метода сварки давлением в условиях сверхпластичности для получения твердофазных соединений из одноименных и разноименных сплавов на основе никеля, которые относятся к группе «свариваемых» традиционными методами сварки плавлением сплавов (ЭК61), а также «несвариваемых» (склонных к образованию термических трещин) высоколегированных деформируемых сплавов типа ЭП975 и интерметаллидных сплавов типа ВКНА-25. Для получения ТФС из разноименных сплавов на основе никеля использована разработанная и усовершенствованная при непосредственном участии автора оригинальная установка для высокотемпературной сварки давлением УВСД-1, установленная на испытательной машине Schenck Trebel типа RMS100, которая позволяет осуществлять сварку давлением образцов из разноименных сплавов на основе никеля при температурах до 1200 °C и скоростях деформации  $10^{-3} \text{ c}^{-1} \dots 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , соответствующих условиям сверхпластической деформации деформируемых никелевых сплавов. При этом образцы, например, в сочетании сплавов ЭП975//ВКНА-25, помещаются в герметичный контейнер из нержавеющей стали в котором обеспечивается вакуум ( $5 \cdot 10^{-2}$  Па) в течении всего процесса сварки давлением. Для исследования изменений микроструктуры, фазового состава и свойств исследуемых материалов после сварки давлением и других видов обработки автором использованы современные методы материаловедения: растровая и просвечивающая электронная микроскопия, EBSD, энергодисперсионный анализ, высокотемпературные механические испытания на сжатие и растяжение, измерение микротвердости.

**В третьей главе** представлены особенности структурообразования при деформационно-термической обработке (ДТО) дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов ЭП975 и ЭК61. Показано, что для сплава ЭК61, упрочняемого интерметаллидной фазой  $Ni_3Nb$ , весьма эффективной для получения УМЗ структуры является ДТО с использованием схемы всесторонней изотермической ковки. Причем, за счет стадийного снижения температуры обработки достигается поэтапное измельчение УМЗ структуры, которая приобретает смешанный

типа. В тоже время более жаропрочный деформируемый сплав ЭП975, может подвергаться только ДТО, представляющей собой преимущественно дробную осадку с промежуточными отжигами с поэтапным снижением температуры обработки. Такая обработка также позволяет получить в деформированных заготовках из этого сплава УМЗ структуру смешанного типа. В работе предложен механизм формирования УМЗ смешанного типа.

Автором впервые показано, что формирование в указанных сплавах УМЗ структуры смешанного типа обеспечивает проявление эффекта низкотемпературной сверхпластичности, которые фактически соответствуют температурам старения сплавов ЭК61 и ЭП975.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований структурообразования одноименных (ЭК61//ЭК61) и разноименных (ЭК61//ВКНА-моно) при сварке давлением в условиях сверхпластичности сплава ЭК61 с УМЗ структурой. По результатам экспериментального и конечно-элементного моделирования сварки давлением выявлены особенности напряженно-деформированного состояния в зависимости от формы рельефа на соединяемых поверхностях и ее влияния на микроструктурные изменения в зоне ТФС. Проведена оценка прочности ТФС, полученных в том числе с использованием прослойки из сплава ЭК61 с УМЗ структурой.

Представлены результаты экспериментов, отражающие перспективность использования промежуточной прослойки с УМЗ структурой, а также особенности использования плоской поверхности соединения или рельефа на поверхности более прочного материала (ВКНА-25) в виде синусоиды.

**Пятая глава** диссертационной работы посвящена изучению закономерностей формирования ТФС при сварке давлением литого интерметаллидного сплава ВКНА-25 с монокристаллической структурой с деформируемым сплавом ЭП975. Приведены результаты исследований по влиянию исходной структуры сплава ЭП975, степени и температуры деформации на формирование ТФС при сварке давлением в условиях сверхпластичности разноименных сплавов на основе никеля в сочетании ЭП975//ВКНА-25. Автором проведен детальный анализ закономерностей формирования градиентных структур в зоне ТФС вышеуказанного сочетания сплавов. Показано, что при сварке давлением в зоне ТФС имеет место развитие процессов гетеродиффузии легирующих элементов соединяемых сплавов, в результате чего происходит образование переходной диффузионной зоны, ширина которой определяется условиями сварки давлением. Отмечено также, что при сварке давлением пластическая деформация локализуется в деформируемом сплаве ЭП975 с мелкозернистой или ультрамелкозернистой структурой, в то время как деформация интерметаллидного сплава ВКНА-25 не превышает 1%, что очень важно для сохранения монокристаллического строения и, соответственно, обеспечения максимальных жаропрочных свойств.

В работе показано, что с технологической точки зрения для получения твердофазных соединений в сочетании сплавов ЭП975//ВКНА-25 предпочтительно использовать сплав ЭП975 с мелкозернистой структурой дуплексного типа, а не с УМЗ структурой, получение которой связано со значительной трудоемкостью. Отмечается, что вышеуказанное сочетание сплавов перспективно для изготовления детали типа «Блиск», предназначенных для применения в новых конструкциях ГТД.

**В шестой главе** приведены данные по влиянию термической обработки, направленной на восстановление жаропрочных свойств сплава ЭП975 сварных образцов в сочетании сплавов ЭП975//ВКНА-25. Проведен анализ изменений микроструктуры и распределения легирующих элементов в зоне ТФС, произошедших в результате термической обработки и проведена оценка их влияния на прочность сварных образцов. Отмечено, что усовершенствованная при участии Галиевой Э.В. методика сварки давлением разноименных сплавов ЭП975//ВКНА-25, проводимая в условиях улучшенного вакуума ( $5 \cdot 10^{-2}$  Па), и последующая термическая обработка обеспечивают получение качественных, практически беспористых ТФС, прочность которых сопоставима с прочностью интерметаллидного сплава ВКНА-25. При этом разрушение сварных образцов, полученных при температуре сварки 1025 и 1175°C соответствует прочности сплава ВКНА-25, а в ряде случаев даже несколько превышает. Оч-

видно поэтому, как показано в работе, разрушение сварных образцов происходит не в зоне ТФС, а вдали от нее по соединяемому материалу – сплаву ВКНА-25.

**В заключении** представлены основные выводы по диссертационной работе и отмечена перспективность практического применения разработанных технических решений, новизна которых защищена патентом РФ, по получению ТФС между интерметаллическими сплавами типа ВКНА-25 на основе  $Ni_3Al$  с монокристаллической структурой и деформируемыми сплавами типа ЭП975 в условиях СП для изготовления детали типа «Блиск», применение которых планируется в новых конструкциях газотурбинных двигателей.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в диссертационной работе Галиевой Э.В., обоснована корректно поставленными целью и задачами исследования, применением современных методик для их решения, согласованием экспериментальных результатов, полученных различными методами, в том числе, методами компьютерного моделирования и их сопоставлением с работами других авторов.

Результаты диссертационной работы апробированы на всероссийских и международных конференциях и изложены в 27 печатных работах, в том числе 20 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, 14 статей из этого числа в журналах, рекомендованных ВАК, 12 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, 8 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science, одна из которых опубликована в зарубежном научном журнале с квартилем Q1; 5 работ в сборниках материалов конференций, входящих в базы данных РИНЦ. При непосредственном участии Галиевой Э.В. разработаны технологические рекомендации Изв. № ТР. 49 ИНЕБ-21 ИПСМ РАН, а также подготовлена заявка на изобретение, на который получен патент РФ №2608118.

#### **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и опубликованным Галиевой Э.В. научным работам.

#### **Научная новизна работы**

Научную новизну работы составляет совокупность экспериментальных данных, полученных Галиевой Э.В. при проведении исследований по влиянию сварки давлением в условиях сверхпластичности на структуру и свойства твердофазных соединений из разноименных сплавов на основе никеля. Галиевой Э.В. впервые показано, что сварка давлением в условиях сверхпластичности является эффективным методом получения качественных твердофазных соединений деформируемых никелевых сплавов типа ЭК61 и ЭП975 с интерметаллическими сплавами типа ВКНА с монокристаллической структурой. На основании проведенных систематических исследований выявлены закономерности формирования градиентных структур в зоне твердофазных соединений разноименных сплавов в сочетании ЭП975/ВКНА-25 в зависимости от исходной структуры деформируемого сплава ЭП975, степени деформации, температуры сварки давлением и последующей термической обработки. Показано, что сварка давлением в условиях сверхпластичности по разработанным оптимальным режимам обеспечивает получение качественных, практически беспористых твердофазных соединений, а последующая термическая обработка приводит расширению переходной диффузионной зоны и повышению прочностных свойств сварных образцов до уровня нее ниже прочности интерметаллического сплава ВКНА-25, вследствие чего разрушение сварных образцов происходит не в зоне твердофазных соединений, а вдали от нее по соединяемому сплаву ВКНА-25.

Автором также впервые показано, что низкотемпературная деформационно-термическая обработка обеспечивает формирование в деформируемых сплавах ЭК61 и ЭП975 формирование ультрамелкозернистой структуры, которая обеспечивает реализацию эффекта низкотемпературной сверхпластичности, максимальные характеристики ( $m \geq 0,4$ ,  $\delta > 1000\%$ ) которой обнаружены в сплаве ЭК61 при  $T = 800 \dots 850$  °C, а в сплаве ЭП975 при  $T = 950$  °C.

## **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и производства**

**Теоретическая значимость** результатов заключается в установлении закономерностей структурообразования и изменения фазового состава в зоне твердофазного соединения из разноименных деформируемого ЭП975 и интерметаллидного ВКНА-25 сплавов в процессе сварки давлением с использованием сверхпластической деформации и последующей термической обработки. Полученные автором данные свидетельствуют, что по разработанным режимам СД достигается прочность сварных образцов на уровне  $\sim (0,6...1)\sigma_{\text{в}}$  относительно прочности интерметаллидного сплава ВКНА-25. Полученные в работе результаты исследований также демонстрируют возможность получения твердофазных соединений в условиях низкотемпературной сверхпластичности соединяемого никелевого сплава ЭП975 (или ЭК61), при температурах, которые фактически соответствуют температурам старения.

**Практическая значимость диссертации** заключается в разработке технических решений, на который выдан патент РФ №2608118 «Способ изготовления биметаллического изделия», обеспечивающих получение качественных твердофазных соединений из разноименных сплавов на основе никеля, в частности, деформируемого сплава ЭП975 и интерметаллидного сплава ВКНА-25. Такая комбинация сплавов для получения неразъемных твердофазных соединений перспективна при разработке инновационной технологии изготовления биметаллической детали типа «Блиск» применение которой актуально в новых газотурбинных двигателях 5-го и 6-го поколений.

### **По работе можно сделать следующие замечания:**

1. В сплаве ЭП975 посредством деформационно-термической обработки была подготовлена ультрамелкозернистая структура смешанного типа, которая демонстрирует признаки низкотемпературной сверхпластичности при 950 °C. В то же время, автор в диссертации делает вывод о том, что для получения твердофазных соединений ЭП975//ВКНА-25 предпочтительной является мелкозернистая структура типа микродуплекс. С использованием такого структурного состояния было выполнено большинство экспериментов по сварке давлением сплава ЭП975 со сплавом ВКНА-25 при температурах выше 1000 °C. Поэтому не совсем понятна необходимость в получении ультрамелкозернистой структуры в труднодеформируемом сплаве ЭП975.
2. В диссертационной работе на рисунках 5.12 и 5.15 приведены карты контрастов, и EBSD карты, которые иллюстрируют, что структура сплава ВКНА-25 сохраняется монокристаллической, даже при степени деформации 40% соединяемого сплава. При этом на странице 141 текста диссертации отмечается, что «*повышение степени деформации с 24 до 40% в сплаве ЭП975 при СД способствует локализации деформации в зоне ТФС, и как следствие формированию участков с извилистой границей раздела*» соединяемых материалов. Из этого следует, что в зоне ТФС имеет место локальная пластическая деформация. Из приведенных рисунков не ясно, наблюдается ли образование какой-либо дислокационной структуры в зоне ТФС и вблизи зоны ТФС в соединяемых сплавах.
3. Как известно, диски и лопатки, изготовленные из жаропрочных никелевых сплавов, в процессе работы в составе газотурбинных двигателей подвергаются длительному воздействию температур и напряжений. Поэтому жаропрочные сплавы, из которых изготавливаются такие детали, подвергаются всесторонним исследованиям структуры и свойств. Например, для оценки жаропрочных свойств деформируемого сплава ЭП975 проводятся испытания на длительную прочность при температуре 850°C, при которой время до разрушения должно превышать 100час. В работе приведены только данные испытаний на кратковременную прочность сварных образцов при 850°C. Результаты положительных испытаний на длительную прочность, а также анализа термической стабильности микроструктуры разрушенных образцов могли бы дополнительно подтвердить эффективность метода сварки давлением в условиях сверхпластичности для получения неразъемных соединений из разноименных сплавов в сочетании ЭП975//ВКНА-25.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости выполненной Галиевой Э.В. работы.

**Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

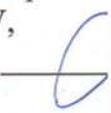
По своим цели и частным задачам, содержанию, методам исследования, новизне, практической значимости и выводам диссертация соответствует пунктам 1,2 3 ,4 и 6 паспорта специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

**Заключение**

Диссертационная работа Галиевой Эльвины Венеровны «Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации», выполненная на актуальную тему, которая связана с разработкой научно-обоснованных режимов сварки давление в условиях сверхпластической деформации для получения качественных твердофазных соединений из разноименных сплавов на основе никеля типа ЭП975//ВКНА-25, соответствует требованиям пунктам 9,10, 11 «Положения о присуждении ученых степеней ВАК Российской Федерации от 24 сентября 2013г., № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития страны. Считаем, что автор работы Галиева Эльвина Венеровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании научного семинара кафедры «Материаловедение в машиностроении» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), на котором соискатель Галиева Э.В. выступила по материалам диссертационной работы в онлайн формате и ответила на вопросы, заданные сотрудниками кафедры. Протокол №4 от 16 апреля 2021 г.

Председатель семинара, д.т.н., профессор кафедры  
«Материаловедение в машиностроении» НГТУ,

  
Буров В.Г.

Ученый секретарь семинара, к.т.н., доцент кафедры  
«Материаловедение в машиностроении»

  
Огнева Т.С.

Дата подписания отзыва «17» апреля 2021 г.

Я, Буров Владимир Григорьевич и Огнева Татьяна Сергеевна, даем согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Телефон: (383) 346-08-43:      Факс: (383) 346-02-09  
E-mail: [rector@nstu.ru](mailto:rector@nstu.ru)

Подписи Бурова В.Г. и Огневой Т.С. заверяю:

Начальник отдела кадров НГТУ

 Пустовалова О. К.

