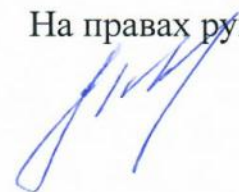


На правах рукописи



**Иванов Алексей Николаевич**

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ОБОРУДОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ  
С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ  
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16**

Специальность 05.02.10 Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск-2019

Работа выполнена в Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки  
Институте физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук **Колубаев Евгений Александрович**

Официальные оппоненты:

**Овчинников Виктор Васильевич** – доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский политехнический университет», профессор  
кафедры «Материаловедение»

**Васильев Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Омский  
государственный технический университет», доцент кафедры  
«Металлорежущие станки и инструменты»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании  
диссертационного совета Д003.038.02 на базе Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института физики прочности и  
материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ  
СО РАН) по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4;  
e-mail: sbuyakova@ispms.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН, а также на  
официальном сайте ИФПМ СО РАН: <http://ispms.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



С.П. Буякова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Термически упрочняемые алюминиевые деформируемые сплавы, в том числе Д16, являются перспективными для применения в ответственных сварных конструкциях авиационного, транспортного и аэрокосмического назначения. При этом требования к прочностным характеристикам сварных соединений являются достаточно высокими – 80-90% от прочности исходного сплава. В связи с этим, актуальной задачей является разработка эффективных способов сварки, позволяющих повысить прочностные характеристики соединений, одним из которых является сварка трением с перемешиванием.

Несмотря на преимущества таких многообещающих способов сварки как сварка трением с перемешиванием и лазерная сварка перед традиционными способами, есть ряд факторов, ограничивающих их применение для сварки термически упрочняемых алюминиевых сплавов. В первую очередь, это проблема значительного разупрочнения сварного шва, связанная с изменением структуры материала в зоне шва и прилегающей зоне. Структурное состояние сварного шва определяет возникновение внутренних концентраторов напряжений и развитие процессов разрушения. Из-за этих особенностей сплав Д16 относят к несвариваемым сплавам. В случае сварки трением с перемешиванием изменение структуры материала обусловлено термомеханическим воздействием, а в случае лазерной сварки – плавлением с образованием сварочных дефектов. Возникающие в результате остаточные напряжения и дефекты структуры, провоцируют образование и развитие микротрещин, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик шва. Проблема разупрочнения металла сварного шва не устраняется естественным старением материала и, в основном, ее можно решить термической пост-обработкой, однако это существенно увеличивает стоимость производства сварной конструкции и не всегда эффективно для снижения количества сформировавшихся макродефектов структуры, а также в случаях сварки крупногабаритных конструкций.

В последние годы в России и за рубежом проводятся исследования по оценке влияния режимов сварки трением с перемешиванием и ультразвукового воздействия в процессе сварки на свойства сварных соединений. Данные исследований свидетельствуют о положительном влиянии ультразвукового воздействия, в частности, обнаружено повышение прочностных свойств, а также существенное уменьшение количества возникающих при сварке дефектов.

Актуальность диссертационной работы связана с развитием способов повышения качества сварных соединений, получаемых методом сварки трением с перемешиванием, и подтверждается ее выполнением в рамках реализации соглашений о предоставлении субсидий Министерства образования и науки РФ, уникальные идентификаторы RFMEFI60717X0190, RFMEFI57814X0045, RFMEFI57417X0179.

**Степень разработанности темы исследования.** Анализ литературы, показал, что преимущественно рассматриваются вопросы текущего состояния применения, а также технологическое оснащение процесса сварки трением с перемешиванием и влияние его отдельных параметров на свойства сварных соединений. Эти вопросы подробно освещены в работах как зарубежных, так и отечественных исследователей. Большой вклад в развитие исследований сварки трением с перемешиванием внесли R.S. Mishra, M.A. Sutton, A.P. Reynolds, R.W. Fonda, M. Jahazi, M.M. Штрикман, В.Ю. Фролов, В.И. Лукин, А.В. Автократова и другие. К настоящему времени накоплен большой объем данных о сварке трением с перемешиванием различных материалов, в том числе алюминиевых сплавов, о влиянии ее параметров на механизмы структурообразования, об определении свойств сварных швов.

Основной темой исследований является предупреждение образования сварочных дефектов и повышение прочностных характеристик сварных швов. Для этого применяются дополнительные способы воздействия на свариваемый материал, в процессе сварки либо после него, основанные на проведении ультразвуковой обработки. Перспективным является применение гибридного метода, сочетающего сварку трением с перемешиванием с наложением лазерной сварки, позволяющего сваривать металлы с высокой температурой плавления, например, стали. Метод находится в стадии разработки и, как ожидается, будет использоваться в промышленности в ближайшем будущем.

Из вышеизложенного следует, что получение качественных сварных швов сваркой трением с перемешиванием требует разработки комбинированных способов воздействия на свариваемый материал, сочетающих управление самим процессом сварки и приложение эффективного внешнего воздействия.

**Целью работы** является разработка способа оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием, способа ультразвукового воздействия в процессе сварки и оборудования для их реализации для получения прочных сварных соединений термически упрочняемого алюминиевого сплава Д16.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать исследовательское оборудование с расширенными технологическими возможностями, обеспечивающее сварку трением с перемешиванием и мониторинг параметров сварочного процесса.
2. Разработать способ определения режимов сварки трением с перемешиванием, основанный на анализе и оптимизации параметров сварочного процесса и обеспечивающий формирование качественных сварных соединений.
3. Разработать способ и оборудование ультразвукового воздействия на формируемое в процессе сварки трением с перемешиванием сварное соединение и провести оценку его эффективности.
4. Обеспечить выполнение сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16 сваркой трением с перемешиванием по определенным разработанным способам режимам с применением разработанного способа ультразвукового воздействия в процессе сварки.
5. Проанализировать влияние оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием и ультразвукового воздействия на прочность получаемых сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Определены взаимосвязи параметров механического отклика материала с параметрами режима сварки трением с перемешиванием, с применением которых разработан новый способ определения режимов сварки, основанный на мониторинге параметров режима сварки и механического отклика материала в режиме реального времени.
2. Разработан и впервые применен в процессе сварки трением с перемешиванием способ ультразвукового воздействия с фиксацией сонотрода на свариваемом материале. Методом лазерной виброметрии показано, что разработанный способ обеспечивает подвод к свариваемому материалу ультразвуковых колебаний с высокой амплитудой на всей длине сварного шва.
3. Показано положительное влияние определения режима сварки трением с перемешиванием разработанным способом на прочность сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16.
4. Впервые показано, что комбинированное применение сварки трением с перемешиванием по оптимизированным режимам и ультразвукового воздействия в процессе сварки обеспечивает прочность сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16 в соответствии с требованиями к ответственным сварным соединениям аэрокосмической отрасли.

**Теоретическая значимость работы.** Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в развитие сварочных технологий в области сварки трением с перемешиванием термически упрочняемых алюминиевых сплавов.

Совокупность экспериментальных данных позволяет расширить научные представления о влиянии режима сварки трением с перемешиванием и его сочетания с ультразвуковым воздействием в процессе сварки на формирование сварного соединения и его прочностные свойства, а также создает предпосылки для разработки эффективных технологических процессов сварки трением с перемешиванием термически упрочняемых алюминиевых сплавов в производственных условиях.

**Практическая значимость работы.** Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ «Транспортные и космические системы». Полученные результаты положены в основу разработки режимов получения высокопрочных сварных соединений алюминиевых сплавов способом сварки трением с перемешиванием на предприятии ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» (г. Чебоксары), что подтверждается актом испытаний (Приложение А).

Результаты работы были использованы в учебном процессе инженерной школы новых производственных технологий НИ ТПУ при разработке магистерской программы «Технологии космического материаловедения», при разработке программы повышения квалификации «Формирование неразъемных соединений методом сварки трением с перемешиванием» совместно с НИ ТПУ и ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», а также при выполнении лабораторных работ по направлению 15.04.01 «Машиностроение» (профиль «Физика высоких технологий в машиностроении»), что подтверждается справкой об использовании результатов диссертационной работы (Приложение Б).

**Методология и методы исследования.** Методологическую основу составили теоретические положения по сварке трением с перемешиванием, представленные в работах, указанных в диссертации, а также опыт сотрудников ИФПМ СО РАН по исследованию свойств сварных соединений алюминиевых сплавов, получаемых сваркой трением с перемешиванием.

Работы по оптимизации режимов сварки проводили с применением комплекса экспериментального оборудования, спроектированного в ИФПМ СО РАН. Подбор режимов и получение сварных соединений с ультразвуковым воздействием выполняли с использованием листового проката Д16Т толщиной

2,5 мм и 10,0 мм. В процессе подбора режимов сварные соединения подвергали неразрушающему контролю радиационным и акустическим методами.

Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М-100. Измерения твердости выполняли на твердомере Duramin 5. Фрактографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе Semtrac SM-3000. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе Метам ЛВ21. Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре ДРОН-7 в центре коллективного пользования «Нанотех» в ИФПМ СО РАН. Исследования проводили в соответствии со стандартными методиками и на аттестованном оборудовании.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплекс оборудования для сварки трением с перемешиванием с расширенными технологическими возможностями и функциями контроля основных и вспомогательных параметров сварочного процесса в режиме онлайн, обеспечивающими оптимизацию режимов сварки и выполнение исследовательских работ.

2. Патентованный способ ультразвукового воздействия в процессе сварки трением с перемешиванием, обеспечивающий приложение ультразвуковых колебаний с высокой амплитудой и эффективное воздействие на материал на всей протяженности сварного соединения.

3. Способ определения режима сварки трением с перемешиванием, включающий в себя анализ параметров отклика материала в режиме реального времени и оптимизацию применением математического многофакторного эксперимента.

4. Способ сварки трением с перемешиванием, обеспечивающий за счет ультразвукового воздействия и оптимизации режима сварки прочность сварных соединений из листового проката термически упрочняемого алюминиевого сплава Д16 на уровне 89-93% от прочности исходного сплава.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, применением современных экспериментальных и расчетных методов, методов математического планирования эксперимента, а также необходимым количеством экспериментальных данных для корректной статистической обработки. Результаты работы подтверждаются их воспроизводимостью и согласованностью между собой, а также применением

аттестованного исследовательского оборудования и стандартных методик исследования.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Россия, г. Томск, 2015), XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Россия, Казань, 2015), VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Россия, Москва, 2015), III Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» (Россия, г. Томск, 2017) XI Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (Россия, Москва, 2016), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Россия, г. Томск, 2015, 2016, 2017), VI Международном Конгрессе «Потоки энергии и радиационные эффекты» (Россия, г. Томск, 2018).

Основные результаты опубликованы в 8 печатных работах в научных журналах и трудах конференций, из них 3 статьи, входящие в перечень журналов из списка ВАК. В базах данных Web of Science и Scopus представлено 5 публикаций. Получены патент № 2616313 на способ сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием и свидетельство № 2016662330 на программное обеспечение управления лабораторным стендом сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием (Приложения В, Г).

**Личный вклад автора.** Вклад автора состоит в совместной с научным руководителем постановке задач, обсуждении и интерпретации полученных научных результатов, формулировке выводов, написании научных статей и патентов. Проектирование оборудования и разработка программного обеспечения выполнена при непосредственном участии автора в качестве разработчика. Подготовка образцов, планирование и проведение всех экспериментальных исследований, обработка результатов выполнены автором самостоятельно.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, перечня основных публикаций по теме диссертации, списка использованной литературы, включающего 204 наименования, и 7 приложений. Полный объем диссертации — 188 страниц, в том числе 79 рисунков и 23 таблицы.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и степень разработанности темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, апробация работы, публикации и личный вклад соискателя, описаны структура и объем диссертации.

**Первая глава** включает в себя обзор и анализ литературы о сварке трением с перемешиванием и способах повышения ее эффективности. Описано современное состояние исследований в областях ультразвукового воздействия на материалы и его применении в сварочных процессах, в том числе, сварки трением с перемешиванием. Приведены сведения о современном оборудовании для сварки трением с перемешиванием.

**Вторая глава** включает в себя сведения об исследуемых сварных соединениях, о способах их получения сваркой трением с перемешиванием без и с приложением ультразвукового воздействия и методах их неразрушающего контроля. Приведены сведения об оценке интенсивности ультразвукового воздействия, а также о способах исследования свойств сварных соединений.

Объектами исследования являются сварные соединения листового проката сплава Д16 толщиной 2,5 и 10,0 мм в закаленном и естественно состаренном состоянии, получаемые с использованием разработанного в рамках диссертационной работы комплекса исследовательского оборудования для сварки трением с перемешиванием. При подборе режимов сварки для обнаружения дефектов, возникающих при их нарушении, проводили неразрушающий контроль радиационным и акустическим методами. Ультразвуковое воздействие реализовано разработанным в рамках диссертационной работы способом.

Интенсивность ультразвукового воздействия оценивалась при измерении виброскоростей на поверхности свариваемого материала методом лазерной виброметрии с использованием доплеровского сканирующего виброметра PSV-500-3D. Для сравнительной оценки, помимо разработанного способа, реализован широко распространенный контактный способ подвода колебаний.

Испытания на растяжение, фрактографические и металлографические исследования, исследования остаточных внутренних напряжений и измерения микротвердости проводили в соответствии со стандартными методиками и на аттестованном оборудовании.

**Третья глава** содержит сведения о разработанных способах подбора режимов сварки трением с перемешиванием, ультразвукового воздействия в процессе сварки и оборудовании для их реализации.

Исследовательский комплекс оборудования для сварки трением с перемешиванием имеет следующие технологические возможности, рисунок 1:

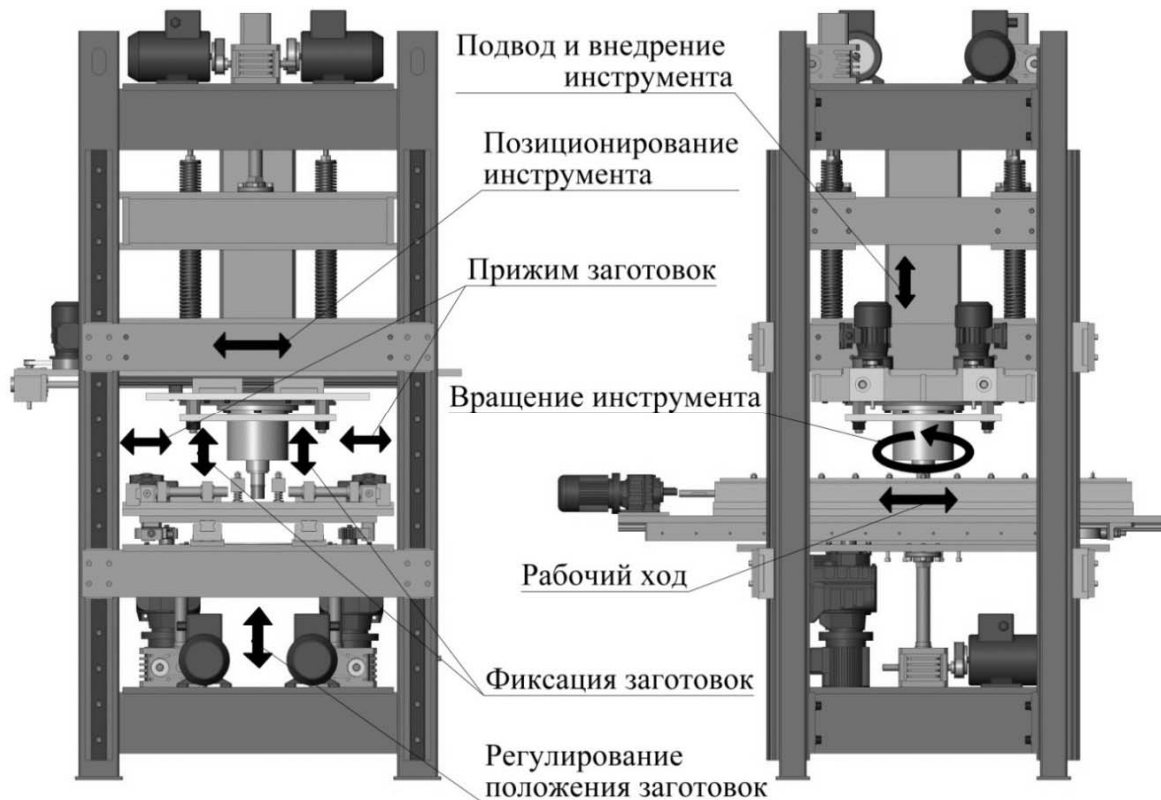


Рисунок 1 – Технологические возможности исследовательского комплекса.

Комплекс имеет следующие отличительные особенности конструкции:

- 1) Позиционирование инструмента для сварки заготовок различной ширины и многопроходной сварки без переустановов.
- 2) Автоматизированный прижим свариваемых кромок для контроля его усилия и предотвращения непроваров или деформации кромок.
- 3) Регулирование положения заготовок для сварки объемных конструкций и повышения осевого усилия для сварки твердых материалов.
- 4) Подготовка кромок под сварку для их очистки от загрязнений и плотного прилегания друг к другу.
- 5) Демпфер компенсации нагрузки от веса шпинделя на инструмент.
- 6) Датчики контроля позиции, координаты и скорости всех подвижных элементов.
- 7) Возможность установки средств технологической оснастки.

8) Датчики крутящего момента на шпинделе и усилия сварки для определения параметров отклика материала на воздействие инструмента.

9) Наличие оригинального программного обеспечения.

Программное обеспечение комплекса позволяет выполнять управление в ручном и автоматическом режиме. Особенностью программного обеспечения является мониторинг всех параметров процесса сварки, включая задаваемые оператором и определяемые программным обеспечением, в режиме онлайн. Это обеспечивает эффективность подбора и оптимизации режимов сварки.

Способ подбора режимов сварки заключается в приближении от условий неоптимального нагрева материала к оптимальным по параметрам его отклика на воздействие инструмента: крутящему моменту  $T_W$  и усилию сварки  $F_W$ . Неоптимальным является локальный избыточный нагрев опорным буртом и рабочим стержнем инструмента при его высокой скорости вращения, рисунок 2, а. Возникающий промежуточный слой  $s$  слабо связан с окружающим материалом и не разогревает его, о чем свидетельствуют низкий крутящий момент и высокое усилие сварки.

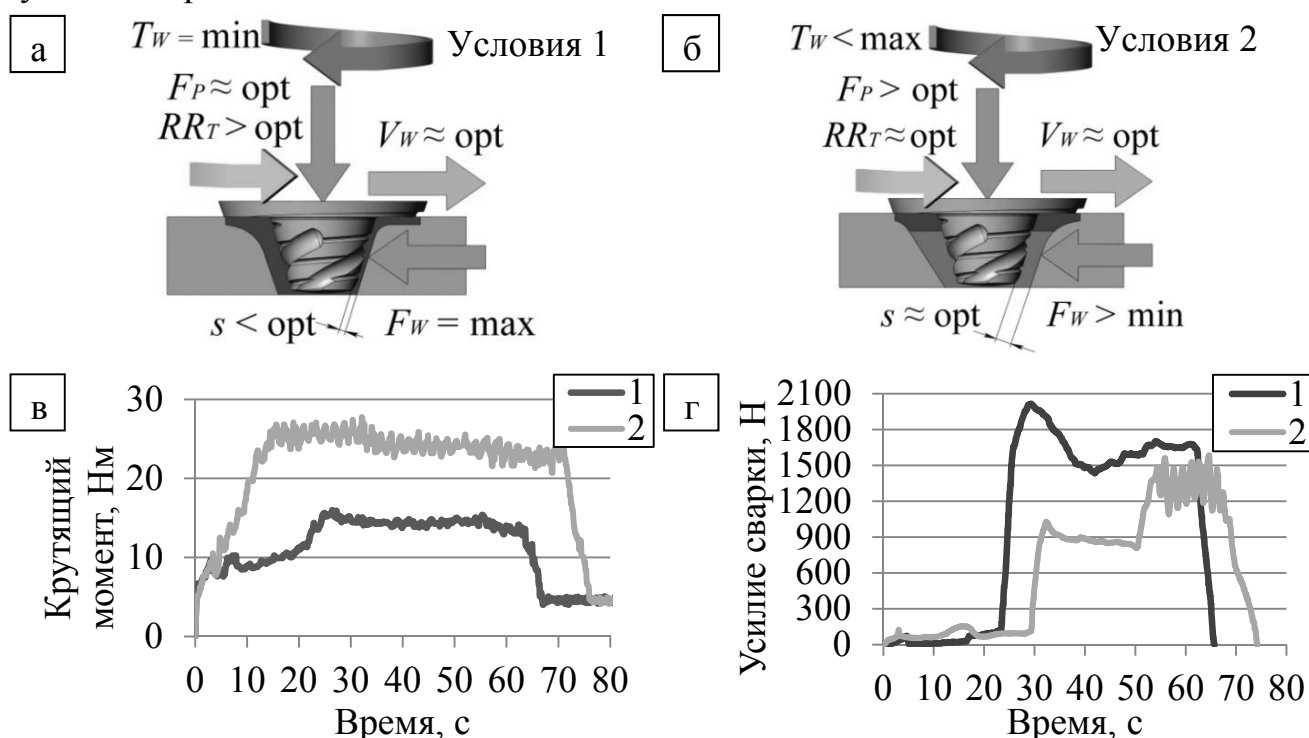


Рисунок 2 – Условия локального избыточного нагрева материала буртом с избыточным (а) и оптимальным (б) нагревом стержнем инструмента и соответствующие диаграммы крутящего момента (в) и усилия сварки (г);  $T_W$  - крутящий момент;  $F_W$  - усилие сварки;  $RR_T$  - частота вращения;  $F_P$  - усилие внедрения;  $V_W$  - скорость сварки;  $s$  - промежуточный слой.

Второй случай - избыточный нагрев буртом инструмента, рисунок 2, б, при котором формируется слой  $s$ , обладающий когезионной связью с материалом, о чем свидетельствуют высокий крутящий момент и малое усилие сварки. Повышенное усилие внедрения инструмента приводит к его погружению и росту усилия сварки. Снижение частоты вращения инструмента в первом и снижение усилия внедрения во втором случае позволяет перейти к этапу формирования условий оптимального нагрева.

Первым случаем является локальный оптимальный нагрев материала при общем недостаточном нагреве, рисунок 3, а, когда слой  $s$  обладает когезионной связью с материалом, но не обеспечивает его достаточного разогрева из-за высокой скорости сварки. В результате повышены крутящий момент и усилие сварки. Снижение скорости сварки обеспечивает переход к общему оптимальному нагреву, рисунок 3, б, при котором слой  $s$  когезионно взаимодействует с окружающим материалом, что выражается максимальным крутящим моментом и минимальным усилием сварки. В результате применения способа подбора были определены области параметров режимов для получения сварных соединений.

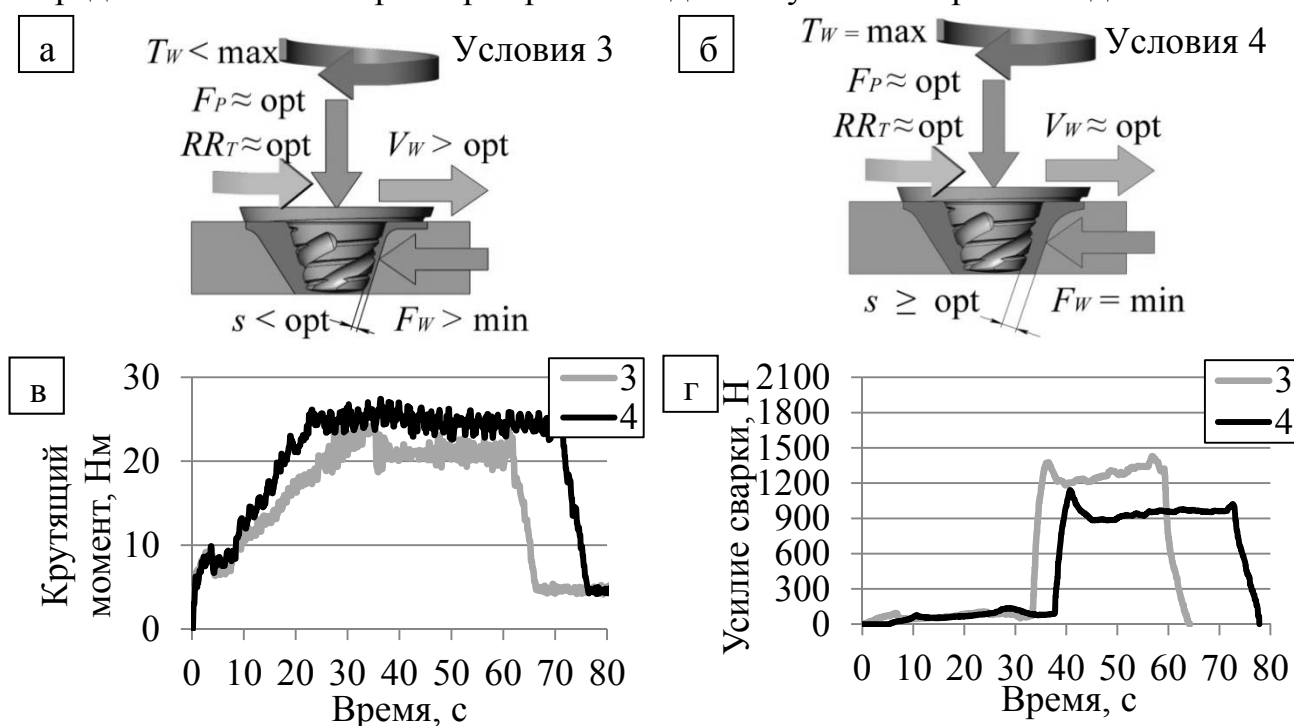


Рисунок 3 – Условия локального (а) и общего (б) оптимального нагрева материала инструментом и соответствующие диаграммы крутящего момента (в) и усилия сварки (г);  $T_W$  - крутящий момент;  $F_W$  - усилие сварки;  $RR_T$  - частота вращения;  $F_P$  - усилие внедрения;  $V_W$  - скорость сварки;  $s$  - промежуточный слой.

Разработанный способ ультразвукового воздействия основан на жесткой фиксации магнестрикционного преобразователя с сонотродом из высокопрочного титанового сплава перпендикулярно лицевой поверхности свариваемого материала. На рисунке 4 приведена схема процесса сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием с указанием его параметров и характеристик.

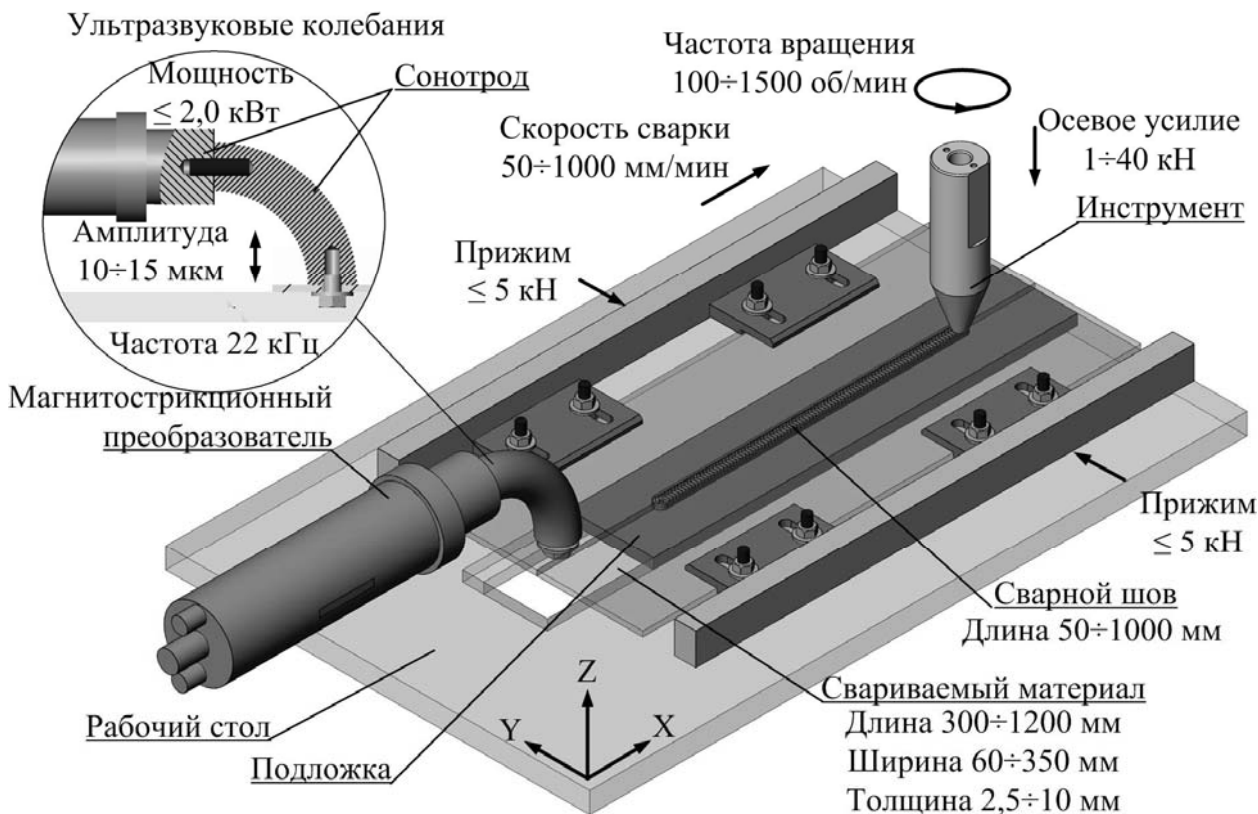


Рисунок 4 – Схема сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием.

Анализ виброперемещений показал, что при ультразвуковом воздействии разработанным способом виброперемещения имеют амплитуду 1,0-2,5 мкм и мощность не менее 8 Вт, при этом, в сравнении с контактным способом, соотношение их амплитуд составляет 2,0...2,5/1, а акустическая мощность отличается на порядок. Из литературы известно, что большая часть мощности колебаний, подводимых контактным способом, расходуется на локальную пластическую деформацию материала в результате высокочастотного ударного воздействия, при этом разработанный способ характеризуется малой долей акустической мощности, расходуемой на его пластификацию.

Анализ виброперемещений показал, что в условиях перед началом сварки ультразвуковые колебания формируют в материале виброперемещения с

максимальной амплитудой  $\approx 0,8$  мкм, не образуют стоячей волны и зон, не подверженных воздействию колебаний, рисунок 5.

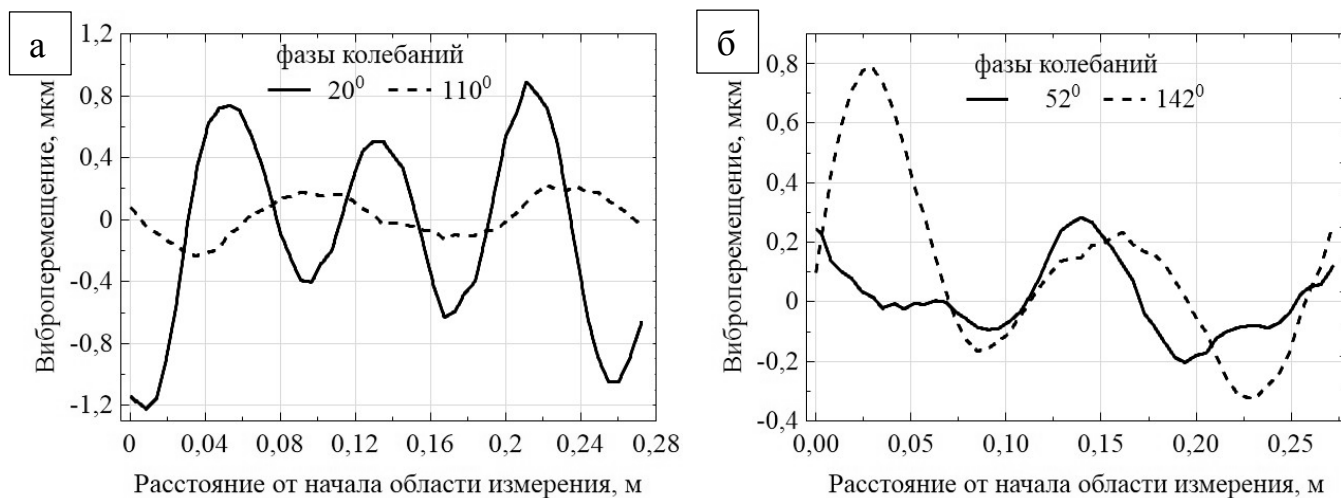


Рисунок 5 - Амплитуды виброперемещений перед началом (а) и в процессе (б) сварки.

В условиях процесса сварки амплитуда виброперемещений сохраняет свое значение сразу после инструмента, независимо от смены геометрии колебательной системы и расстояния от места приложения колебаний. С учетом этого, а также перемещения максимумов и минимумов амплитуд виброперемещений, можно сказать, что ультразвуковое воздействие на зону сварки сохраняет свою интенсивность на всей протяженности сварного шва.

**Четвертая глава** содержит результаты испытаний на растяжение и исследований внутренних напряжений сварных соединений для оценки влияния ультразвукового воздействия в процессе сварки.

По результатам испытаний на растяжение установлено, что прочность сварных соединений составляет 72-74%, а в сочетании с приложением ультразвукового воздействия при сварке - на уровне 84-86% от прочности исходного сплава. Отмечено повышение пластичности сварных соединений и изменение характера и места излома при их разрушении. Результаты исследований внутренних напряжений показали, что ультразвуковое воздействие в сварных соединениях толщиной 2,5 мм и 10,0 мм обеспечивает снижение остаточных напряжений в зоне перемешивания, соответственно, на величину 50% и 23-24%. Эти эффекты обеспечиваются влиянием ультразвукового воздействия на протекание дисперсионного упрочнения сплава Д16.

**Пятая глава** содержит сведения об оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием и сведения о

прочности и структуре неразъемных соединений, полученных по оптимизированным режимам.

Оптимизация режимов сварки проведена на основании результатов, полученных в четвертой главе. По оптимизированным режимам получены сварные соединения. Результаты испытаний на растяжение показали, что оптимизированный режим сварки обеспечивает прочность соединений не менее 80% от прочности исходного проката Д16Т, а приложение ультразвукового воздействия способствует повышению прочности на величину 13-17% и обеспечивает ее значения на уровне 89-93% от прочности проката Д16Т.

Из литературы известно, что сплав Д16 в закаленном состоянии представляет собой пересыщенный раствор, из которого при охлаждении происходит диффузия примесных атомов с образованием зон Гинье-Престона и Гинье-Престона-Багряцкого с их последующим переходом в частично когерентные упрочняющие фазы  $Al_2CuMg$  (фаза  $S'$ ) из зон ГПБ и  $Al_2Cu$  (фаза  $\theta'$ ) из зон ГП. В процессе перестаривания происходит формирование и коагуляция некогерентных разупрочняющих  $S$ -фаз и  $\theta$ -фаз.

По данным фрактографии, разрушение сварных соединений носит вязкий характер, рисунок 6. Для образца, полученного без ультразвукового воздействия, характерно наличие ямок и мелких структурных элементов. Для образца, полученного сваркой с приложением ультразвукового воздействия, характерно наличие ямок и зон вытягивания (отмечены на рисунке), а также более крупных структурных элементов и увеличение высоты перемычек, что свидетельствует о более высокой пластичности.

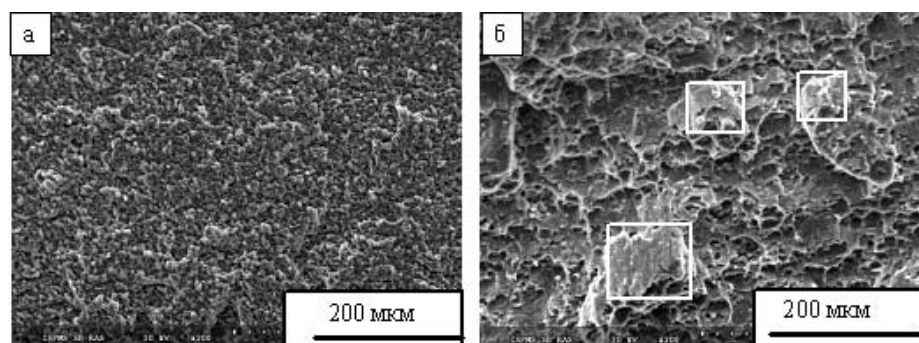


Рисунок 6– Микроструктура изломов сварных соединений толщиной 2,5 мм, полученных без ультразвукового воздействия (а) и с его приложением (б).

Увеличение  $\times 200$ .

Соединения, полученные без ультразвукового воздействия, разрушаются по границе зон перемешивания и термомеханического воздействия (зона ЗТМВ-1). Соединения, полученные с ультразвуковым воздействием,

разрушаются в зоне термомеханического воздействия с переходом от ее границы с зоной перемешивания к границе с зоной термического влияния (зона ЗТМВ-2).

Структура зоны ЗТМВ-1 сочетает в себе сильнодеформированные и частично рекристаллизованные зерна с высоким содержанием стабильных некогерентных матричному материалу фаз, что согласуется с микроструктурой излома. Структура ЗТМВ-2 с крупными зернами, ориентированными в направлении пластического течения материала. В зоне ЗТМВ-2 возникает «перестаренная» структура с малым содержанием когерентных упрочняющих фаз. Микроструктура излома показывает, что вязкое разрушение происходит в местах с крупноразмерными структурными элементами, соответствующими деформированным, но не рекристаллизованным зернам в зоне ЗТМВ-2.

Приложение ультразвукового воздействия в процессе сварки трением с перемешиванием оказывает влияние на фазовый состав материала сварного соединения. Влияние ультразвукового воздействия связано с интенсификацией конкурирующих процессов формирования и распада вторичных когерентных и некогерентных фаз, результатом которого является снижение их размера и перераспределение в основных зонах сварного соединения в ходе процесса дисперсионного упрочнения, свойственного сплаву Д16. В связи с этим влиянием происходят изменения структуры зон сварного соединения, общим эффектом которых является повышение прочности и пластичности его материала. Указанные особенности объясняют поведение и характер разрушения при растяжении сварных соединений.

В **приложении А** приведен акт об исследовательских испытаниях в ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» технологии, основанной на результатах данной диссертационной работы. В **приложении Б** приведена справка об их использовании в научной и образовательной деятельности НИ ТПУ. В **приложении В** приведен патент на способ сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием. В **приложении Г** приведено свидетельство на программное обеспечение управления лабораторным стендом сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием. В **приложении Д** приведены сведения о разработке технологии гибридной лазерной сварки с ультразвуковым воздействием, основанной на результатах данной диссертационной работы. В **приложениях Е и Ж** приведены журналы планирования экспериментов в ходе процедуры оптимизации режимов сварки трением с перемешиванием.



## ВЫВОДЫ

1. Показано, что разработанный комплекс исследовательского оборудования для сварки трением с перемешиванием обеспечивает эффективное выполнение процесса сварки и мониторинга его технологических параметров.

2. Показана взаимосвязь параметров режима сварки трением с перемешиванием с параметрами механического отклика свариваемого материала, которая выражается в снижении усилий сварки и повышении крутящего момента при переходе к условиям оптимального нагрева материала.

3. Показано, что разработанный способ ультразвукового воздействия при сварке трением с перемешиванием обеспечивает формирование виброперемещений с амплитудой 1,0-2,5 мкм и мощностью не менее 8 Вт независимо от расстояния до места приложения колебаний и геометрии колебательной системы.

4. Исследовано влияние оптимизации режима сварки трением с перемешиванием на прочность сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16. Показано, что подбор режима обеспечивает прочность сварных соединений на уровне 72-74%, а оптимизация режима – не менее 80% от прочности исходного сплава.

5. Исследовано влияние ультразвукового воздействия на прочность сварных соединений листового проката алюминиевого сплава Д16. Установлено, что приложение ультразвукового воздействия разработанным способом способствует повышению прочности сварных соединений на величину не менее 13%.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:*

1. Тарасов С.Ю. Формирование дефекта сварного шва на плакированном алюминием сплаве Д16Т (2024) / С.Ю. Тарасов, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, **А.Н. Иванов** // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – Т. 2–24. – С. 5377–5381.

2. Фортунa С.В. Особенности микроструктуры высокопрочного сплава В95Т1 в зоне перемешивания соединений, формируемых методом сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием / С.В. Фортунa, С.Ю. Тарасов, **А.Н. Иванов**, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 7. – С. 89–94.

3. Тарасов С.Ю. Влияние режимов обработки на дефектность сварных швов, полученных методом сварки трением с перемешиванием / С.Ю. Тарасов, В.Е. Рубцов, А.А. Елисеев, Е.А. Колубаев, А.В. Филиппов, **А.Н. Иванов** // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т.58 – № 6/2. – С. 280–284.

*В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science:*

4. Tarasov S.Y. Effect of Friction Stir Welding Parameters on Defect Formation / S.Y. Tarasov, V.E. Rubtsov, A.A. Eliseev, E.A. Kolubaev, A.V. Filippov, **A.N. Ivanov** // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020230 (1-4).

5. Tarasov S.Y. Ultrasonic-assisted friction stir welding on V95AT1 (7075) aluminum alloy / S.Y. Tarasov, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev, **A.N. Ivanov**, S.V. Fortuna, A.A. Eliseev // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020231 (1–4).

6. Fortuna S.V. Structure and properties of fixed joints formed by ultrasonic-assisted friction-stir welding / S.V. Fortuna, K.V. Ivanov, S.Y. Tarasov, A.A. Eliseev, **A.N. Ivanov**, V.E. Rubtsov, E.A. Kolubaev // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020055 (1–4).

7. Kalashnikov K.N. Towards aging in a multipass friction stir processed AA 2024 / K.N. Kalashnikov, S.Y. Tarasov, A.V. Chumaevskii, S.V. Fortuna, A.A. Eliseev, **A.N. Ivanov** // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – P. 1–12.

8. **Иванов А.Н.** Применение способа подвода ультразвукового воздействия и оценка его эффективности при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / А.Н. Иванов, В.А. Белобородов, В.А. Красновейкин, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т.21. - № 2. – С 40–52.

*Патенты, свидетельства:*

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662330. Программное обеспечение управления лабораторным стендом сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием / Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., **Иванов А.Н.**, Псахье С.Г., Белобородов В.А. // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 07.11.2016 г.

10. Патент на изобретение № 2616313. Способ сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием / Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., **Иванов А.Н.**, Псахье С.Г., Фортуна С.В., Бакшаев В.А., Васильев П.А. // Дата государственной регистрации 14.04.2017 г.