

На правах рукописи



Курицын Денис Николаевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

- Научный руководитель: Бойцов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
- Официальные оппоненты: Баскаков Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)
- Кочергин Сергей Александрович – кандидат технических наук, начальник отдела технологии сварки высококонцентрированными источниками энергии федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственное объединение «Техномаш» (ФГУП НПО «Техномаш»)
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ)

Защита состоится 27 декабря 2018 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.125.10  
к. т. н., доцент

Денискина А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является относительно новым методом получения неразъемных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы. В аэрокосмической отрасли СТП используют для изготовления крупных отсеков и внешних резервуаров космических аппаратов, ответственных конструкций фюзеляжа, панелей различного назначения.

Достоинством применения СТП является высокое качество получаемых сварных соединений. Прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет до 90% от этих характеристик для основного материала, на уровне, обеспечиваемом применением дорогостоящих электронно-лучевой, диффузионной и лазерной сварок. Переход на СТП позволяет достичь сокращения издержек до 60% и сокращение времени производства до 50%, что актуально для современного производства широкого класса специальных конструкций авиационной и ракетно-космической техники (РКТ). В тоже время, при применении СТП возникает ряд проблем, связанных с недостаточной исследованностью ряда вопросов, касающихся свариваемости различных групп материалов, особенностями получения различных типов швов, геометрии сварочного инструмента, тепловыделения, пластической деформации и течения материала в зоне сварки. Вышеуказанное определило направление диссертационной работы, посвященной разработке методики получения неразъемных соединений в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники методом сварки трением перемешиванием, разработке прогрессивных технологических схем, оборудования и сварочного инструмента.

Это отражает актуальность данной исследовательской работы. Ее выполнение позволяет решить ряд задач, связанных с изготовлением новой техники, повышением производительности и снижением себестоимости сварочных работ, обеспечением надежности и ресурса изделий.

**Цель работы.** Разработка научно-методического обеспечения повышения эффективности и надежности технологического процесса сварки трением перемешиванием при производстве аэрокосмических конструкций для улучшения их эксплуатационных характеристик при сокращении затрат и производственного цикла.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ технологических возможностей и ограничений в области технологии формирования неразъемных соединений авиационных и ракетно-космических конструкций методом сварки трением с перемешиванием.
2. Разработать методику технологии сварки трением с перемешиванием с использованием инструмента с новой геометрией для получения неразъемных соединений конструкций из алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных сталей. Выполнить экспериментальную отработку методики.

3. Исследовать возможности высокоскоростных режимов сварки трением с перемешиванием с учетом особенностей формирования неразъемных соединений.

4. Разработать конструкции и технологические схемы изготовления сварочного инструмента с выбором его геометрии по результатам моделирования вязкого течения материала в зоне обработки.

5. Выполнить апробацию разработанных методик и моделей высокоскоростной сварки трением перемешиванием в процессе изготовления опытных образцов конструкций.

**Объект исследования** – конструкции элементов авиационных и космических летательных аппаратов, выполняемые в виде неразъемных соединений различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, обечайки, коробчатые конструкции.

В области РКТ к данным конструкциям относятся отсеки для спутников, внешних резервуаров топливных баков ракетносителей, космических аппаратов, стендовых образцов. В области авиационной техники – конструкции фюзеляжа, баков, панелей различного назначения, теплообменные агрегаты, корпуса приборов, резервуары. Исследованию подвергались такие конструкционные материалы как высокопрочные алюминиевые сплавы, титановые сплавы, жаропрочные стали.

**Предмет исследования** – явления, происходящие при сварке, технологические режимы и условия осуществления сварки трением перемешиванием элементов аэрокосмических конструкций, а также средства специального инструментального обеспечения, оборудования и технологического оснащения для выполнения операции.

### **Научная новизна исследования.**

Разработано научно-методическое обеспечение повышения эффективности и надежности технологического процесса сварки трением с перемешиванием при производстве аэрокосмических конструкций.

1. Установлены взаимосвязи процесса сварки трением с перемешиванием с некоторыми технологическими ограничениями в производстве аэрокосмических конструкций, связанными с отсутствием методик и моделей:
  - позволяющих на стадии технологической подготовки производства назначать технологические режимы сварки и проектировать сварочный инструмент;
  - сваривания высокопрочных материалов с относительно высокой температурой пластификации;
  - снижения сил, действующих на рабочий инструмент и заготовку и др.
2. Определены и уточнены функции основных конструктивных элементов инструмента при сварке трением с перемешиванием.
3. Разработана методика создания параметрических геометрических моделей рабочих частей инструмента при различных конструкторско-

технологических ограничениях и требованиях, учитывающая результаты моделирования вязкого течения материала в зоне сварки.

4. Получены новые конструкции сложнопрофильного инструмента для сварки трением с перемешиванием, отработана технология его изготовления методом электроэрозионного фрезерования.
5. Предложены технологические схемы и проекты специального оборудования и средств технологического оснащения для сварки трением с перемешиванием.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в повышении эффективности и надежности технологического процесса сварки трением перемешиванием при производстве аэрокосмических конструкций для улучшения их эксплуатационных характеристик при сокращении затрат и производственного цикла.

Практическая реализация разработанного научно-методического обеспечения позволяет решить целый ряд конструкторско-технологических задач, связанных с созданием специального инструмента из твердых и теплоустойчивых материалов для перемешивающей и точечной сварки трением металлов и сплавов с высокой температурой плавления, эффективных конструкций оборудования и оснастки.

Разработаны опытные установки высокоскоростной перемешивающей сварки трением. Применение высокоскоростной сварки трением с перемешиванием позволило получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования и зону сваривания. Это дает возможность использования для СТП обычного металлорежущего оборудования и промышленных роботов.

Получены новые конструкции сложнопрофильного инструмента для сварки трением с перемешиванием, отработана технология его изготовления методом электроэрозионного фрезерования. Предложены и отработаны технологические схемы и режимы соединения конструкций сложных пространственных форм с применением такого инструмента.

На предприятиях отрасли реализованы следующие технологические рекомендации и методики, специальное оснащение и инструментальное обеспечение: изготовление элементов фюзеляжа самолёта МС-21 (ОАО «Корпорация «Иркут»); инструмент нового поколения для сварки сплавов на основе титана и железа, установка для высокоскоростной сварки трением с перемешиванием (ОАО «Композит»); технология СТП фланцев редуктора несущего винта из алюминиевых сплавов (ОАО «Московский вертолётный завод им. М.Л.Миля»); отработка технологических режимов по сварке трением элементов авиационных двигателей, проектирование оснастки (ОАО «НПП «МОТОР»); технология и оснащение СТП медных колец, листовой меди (ОАО «Силовые машины»); технология СТП корпусных деталей из алюминиевых сплавов корпусов приборных отсеков (ОАО «РПКБ»); установка для исследования процессов СТП на базе вертикального консольно-фрезерного станка.

Результаты исследований используются в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» при проведении занятий по дисциплинам «Объекты аэрокосмического производства», «Технологии механообрабатывающего производства», «Технология производства двигателей летательных аппаратов» на кафедре «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».

Таким образом, результаты выполненного исследования направлены на обеспечение ряда стратегических технологических решений для отечественного авиа- и ракетостроения, таких как:

- возможность снижения веса конструкций при сохранении прочности и надежности за счет применения нового метода соединения;
- энергоэффективность производства;
- импортозамещение высокотехнологического оборудования и оснащения;
- создание промышленного оборудования и инструмента, не имеющего аналога за рубежом;
- трансфер технологий в другие отрасли промышленности.

#### **Методология и методы исследования.**

Исследования выполнены с помощью эмпирического, экспериментального метода, включающего анализ качества сварных соединений, состояния инструмента, статистическую обработку данных. Использовано моделирование теплового баланса для прогнозирования эффективных режимов высокоскоростной обработки. Моделирование процессов вязкотекучести и неразрывности позволило произвести поиск решений в области геометрии сложнопрофильного инструмента. Конструкторско-технологические решения отработаны модельно и экспериментально до стадии производственного применения на предприятиях отрасли. Для оценки качества сварного шва по физико-механическим параметрам выполнены металлографические исследования, измерения микротвердости, уровня остаточных напряжения и прочностные испытания.

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

1. Методика создания параметрических моделей сварочного инструмента при различных конструкторско-технологических ограничениях и требованиях, учитывающая результаты моделирования вязкого течения материала в зоне сварки и обеспечивающие высокое качество сварного шва.
2. Методика выбора технологических режимов и условий сварки трением с перемешиванием авиационных конструкций из алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных сталей инструментом с разработанной геометрией.
3. Результаты исследования возможности высокоскоростных режимов сварки трением с перемешиванием с учетом особенностей формирования неразъемных соединений.

4. Технология изготовления сварочного инструмента, профиль которого образован сочетанием винтовых канавок различного шага, глубины и диаметра.
5. Технологические схемы и проекты специального оборудования и средств технологического оснащения для СТП.
6. Методическая и программная реализация технологической экспертизы производственной целесообразности применения сварки трением с перемешиванием в специальных задачах аэрокосмического производства.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами испытаний образцов сварного шва. Полученные результаты моделирования верифицированы при экспериментах, которые проводились по стандартизированным методикам с помощью аттестованной аппаратуры. Научные результаты не противоречат опубликованным работам других авторов.

Основные положения диссертационной работы докладывались на 15 конференциях, в том числе:

– на Международных научных конференциях «Гагаринские чтения» (2008, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014 гг. МАТИ, г. Москва, 2016, 2017 гг. МАИ, г. Москва), «Новые материалы и технологии» (2012 г., МАТИ, г. Москва), «ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО-2014» (СГТУ имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов), «Научные проблемы технического сервиса» (2015, ГОСНИТИ, г. Москва), «European Science and Technology» (2015, Munich, Germany), «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (2016 г., МТУ, Институт высоких технологий, г. Москва);

– на Всероссийских научно-технических конференциях «Проблемы и перспективы развития авиации и авиастроения России» (2013 г., УГАТУ, г. Уфа); «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» (2014 г., ВИАМ, г. Москва), «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» (2015 г., АмГУ, Амурская область, г. Благовещенск / ЗАТО Углегорск); XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (2017 г., РКК «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв).

Опытно-конструкторские разработки экспонировались на Международных выставках «МЕТАЛЛООБРАБОТКА» (2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 гг., ЭКСПОЦЕНТР, г. Москва), «ТЕХНОФОРУМ» (2014, 2016, 2017 гг., ЭКСПОЦЕНТР, г. Москва).

Учебное пособие представлено на 35-м Парижском книжном Салоне «PARIS BOOK FAIR -2015» (2015, Paris, France ESIC), 28-й Московской международной книжной выставке-ярмарке (ММКВЯ-2015, ВДНХ, г. Москва).

Результаты работы отмечены 10-ю Дипломами, Почетным знаком, 4-мя Медалями, в том числе Медалью имени В.П. Бармина Федерации Космонавтики России (2013 г.), Благодарностью Госкорпорации «РОСТЕХ» (2016 г.), Дипломом РКК «ЭНЕРГИЯ» имени С.П. Королёва за личный вклад в решение актуальных научно-технических проблем космической науки и техники (2017 г.).

### **Личный вклад соискателя.**

Соискатель проанализировал существующие технологические решения в области формирования неразъемных соединений авиационных и ракетно-космических конструкций, выявил проблемы и наметил пути их решения.

Соискателем определены принципы и закономерности, позволяющие прогнозировать технологические возможности высокоскоростной сварки трением на основе модели теплового баланса в зоне сварки.

В качестве ответственного исполнителя соискатель принимал участие в проведении технологических экспериментов при отработке режимов СТП различных свариваемых материалов и различных конфигураций сварной конструкции. Соискатель обработал, проанализировал и обобщил данные экспериментов, сформулировал технологические рекомендации.

Соискателем разработаны параметрические модели инструментов сложнопрофильной формы. Принимал участие в разработке численных моделей вязкого течения материала в рабочей зоне процесса. С участием соискателя спроектирована и изготовлена экспериментальная установка высокоскоростной сварки трением с перемешиванием (ВСТП). Выполнены функциональные 3D модели оборудования и технологической оснастки, обоснованы их прочностные, жесткостные, динамические характеристики. При участии соискателя выполнены испытания эксплуатационных характеристик сварного шва.

### **Публикации по теме работы.**

Основное содержание диссертации, полученные результаты и рекомендации опубликованы в 37 научных работах, в т.ч. в 6-ти статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, материалах 15-ти конференций, монографии, учебном пособии; в 2-х аннотированных указателях Международных выставок, 5-ти научно-технических отчетах о НИР и НИОКР; в т.ч. 4 работы опубликованы в зарубежных изданиях; научные результаты защищены патентом.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименования, приложения; изложена на 177 страницах машинописного текста, включающего 120 иллюстраций и 24 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность исследований, связанных с выполнением неразъемных соединений пространственных конструкций авиационных и космических летательных аппаратов, выполняемых методом сварки трением с перемешиванием. Обозначена проблематика, текущее состояние исследований в данной области, поставлены цели и задачи диссертационного исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Описаны методология и методы исследования, выделены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследования.

**Первая глава** посвящена анализу исследований по проблемам СТП, анализу конструкторско-технологических решений в области создания неразъемных соединений в изделиях аэрокосмической техники. Представлен обзор отечественных и зарубежных исследований в области «холодной» сварки авиационных материалов. Обозначена область нерешенных конструкторских, технологических, производственных проблем.

Конструкторско-технологические решения в области получения неразъемных соединений в элементах летательных аппаратов (рисунок 1) являются определяющими в достижении массового, прочностного совершенства авиакосмической техники, надежности и эффективности производственных технологий. Поиск новых технологических решений на основе процессов сварки трением актуален в области производства таких конструкций.

Исследования в данной области выполняются NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Airbus Integrated Company, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory, MTS Systems и др. Специализированное оборудование для СТП выпускается фирмами MTS Systems Corporation, Nova-tech engineering inc., Friction Stir Link, Inc. (США), Danish Stir Welding Technology (Dan Stir) (Дания), ESAB (Швеция), Osaka East Urban Area, Osaka Cast и Hitachi (Япония), TWI (Англия) и др.

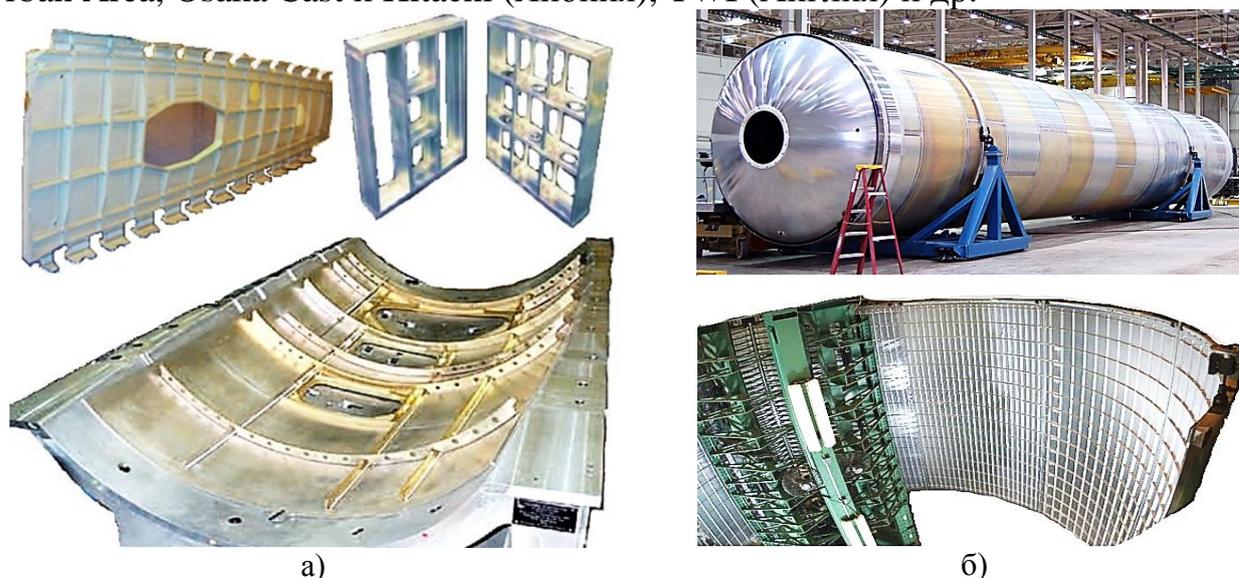


Рисунок 1 – Элементы конструкций ЛА, получение которых возможно с использованием сварки трением с перемешиванием:

а) самолетов, б) ракетно-космической техники

В российских организациях накоплен опыт СТП различных алюминиевых сплавов. Такие исследования в лабораторных условиях выполнялись в ГКНПЦ имени М.В. Хруничева, ФГУП «НПО Техномаш», ФГУП «ВИАМ», ОАО НИАТ, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ОАО «ВНИИАЛМАЗ», ЗАО «Сеспель», ПАО УМПО и ФГБОУ ВО «УГАТУ», ФГБОУ ВО «ОмГТУ» и ПО «Полет», ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана и др.

Проблемам СТП конструкций из различных материалов посвящено значительное количество исследований в нашей стране и за рубежом. Среди множества работ, посвященных данной проблеме, можно выделить исследования, проведенные R.S. Mishra, C.J. Dawes, W.M. Thomas, А.Я. Ищенко и др. В данных работах рассматриваются принципы метода и технологические возможности сварки алюминиевых сплавов. Работы ведущих ученых М.М. Штрикмана, О.С. Сироткина, В.Н. Егорова, В.А. Половцева, В.А. Бакшаева, А.Г. Бойцова, А.В. Люшинского, В.М. Бычкова, А.Ю. Медведева, В.А. Фролова, В.И. Лукина, В.В. Овчинникова, В.И. Кулика, Р.К. Газизова и др. посвящены экспериментальной отработке режимов процесса, разработке эффективных средств технологического оснащения. Выполненные в настоящее время исследования позволяют представить качественную картину явлений, происходящих при сварке, сделать технологические прогнозы о потенциальных возможностях процесса.

В результате анализа обоснован большой конструкторско-технологический потенциал СТП при создании авиационных и ракетно-космических конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами, а также при соединении жаропрочных и жаростойких материалов.

На основе выполненного анализа поставлены задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей протекания процесса СТП, его моделированию, формированию сварных соединений различного типа.

СТП является процессом соединения материалов в твердой фазе, при котором специальный вращающийся инструмент, конструктивно состоящий из плоского или профилированного основания (бурта) и наконечника специального профиля (пина), двигается вдоль поверхностей стыков двух твердых деталей. Трение инструмента о поверхность деталей, вызывает тепловыделение, которое совместно с силовым воздействием обеспечивает пластическую деформацию и сложное течение пластифицированного металла. В процессе перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходит перемешивание металла профилированным наконечником с формированием сварного шва (рисунок 2).

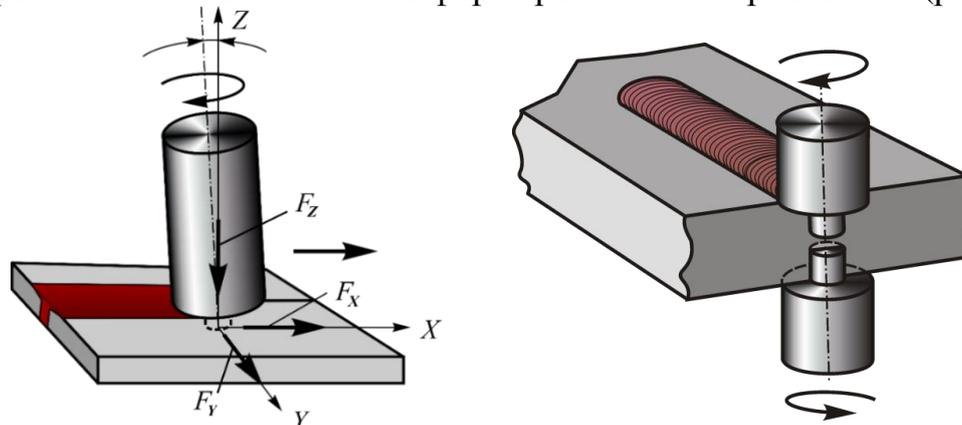


Рисунок 2 – Принципиальная схема СТП

Давление бурта инструмента на соединяемые детали, в зоне стыка деталей вызывает сильную пластическую деформацию и течение пластифицированного металла, перемешиваемого профилированным наконечником. При СТП формируется шов (рисунки 3 и 4), в структуре которого можно выделить зоны: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала, зону термопластической деформации и зону термического влияния. Соединение осуществляется в условиях экструзии, с проковкой материала при высоких скоростях относительной деформации.

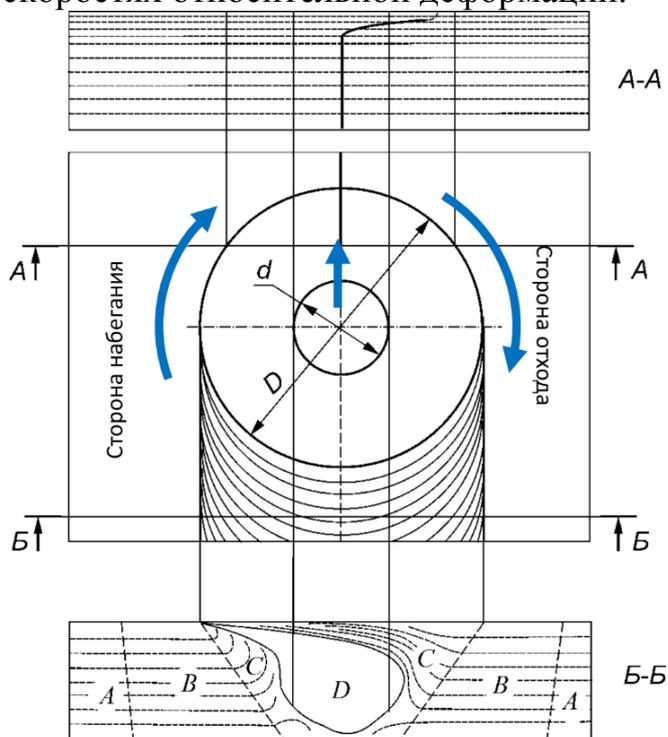


Рисунок 3 – Формирование шва при СТП с указанием зон в его сечении: А – основной материал; В – зона термического влияния; С – зона термомеханического воздействия; D – зона перемешивания

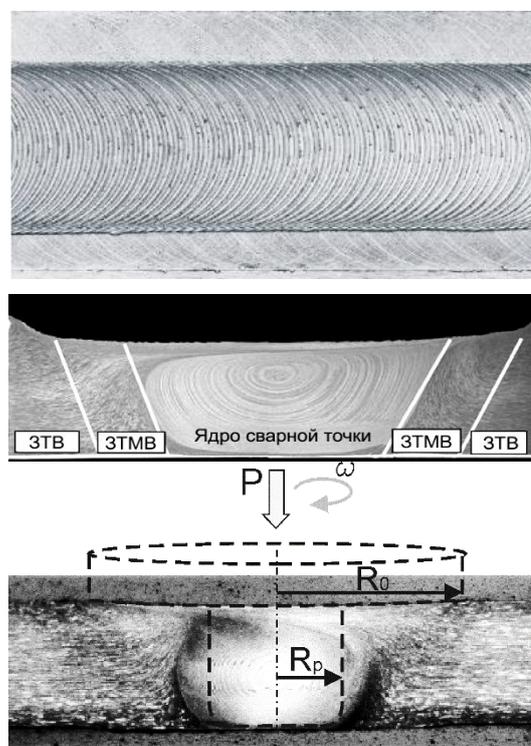


Рисунок 4 – Основные зоны сечения сварного шва СТП: ЗТВ – зона термического влияния; ЗТМВ – зона термомеханического влияния

Основными проблемами, ограничивающими применение СТП и требующими решения, в настоящее время являются: необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей; создание специальных инструментов с повышенной стойкостью; ограниченная свариваемость материалов имеющих низкую пластичность или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации; необходимость использования громоздкого дорогостоящего оборудования для получения швов высокого качества, отсутствие оборудования и технологии для проведения полевых ремонтно-восстановительных работ. Остаются проблемы сваривания высокопрочных материалов с относительно высокой температурой пластификации, снижения сил, действующих на инструмент и заготовку и др. Отсутствуют модели и методики, позволяющие на стадии технологической подготовки производства назначить технологические режимы сварки и проектировать сварочный инструмент.

Основными технологическими параметрами режима сварки, влияющими на качество сварного соединения при СТП, являются: частота вращения инструмента (шпинделя) ( $n$ , об/мин); скорость сварки ( $v_{св}$ , м/мин); величина внедрения инструмента ( $h$ , мм), учитывающая показатели заглабления пина и заглабления бурта. С данными параметрами связаны такие показатели, как угловая скорость вращения инструмента ( $\omega$ ), подача инструмента ( $s$ , мм/об).

Условия рабочего процесса, существенно влияющие на качество СТП: геометрия инструмента: радиус бурта ( $R_0$ , мм) и штыря ( $R_p$ , мм), пространственная форма бурта и штыря; силы, действующие на инструмент в процессе сварки ( $F_x, F_y, F_z$ ), нормальная сила прижатия инструмента к свариваемым листам ( $P=F_z, H$ ); угол наклона инструмента ( $\alpha$ ); жесткость технологической системы ( $j$ ), условия и силы закрепления.

Предложена методика проектирования комплекса технологического обеспечения сварки трением перемешиванием. Алгоритм определения основных составляющих технологического обеспечения (технологические режимы, инструментальное обеспечение, специальное оборудование) при известных физико-механических свойствах соединяемых материалов и требуемой конфигурации конструкции представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Методика отработки технологического обеспечения сварки трением перемешиванием

Методика предусматривает взаимосвязанную модельно-экспериментальную отработку всех компонентов технологического обеспечения, включая моделирование физико-механических явлений в рабочей зоне формирования соединения, достижение работоспособности и стойкости профилированного инструмента, создание оборудования и оснастки.

Показатели процесса трения в зоне контакта изменчивы в ходе нагрева и размягчения материала и являются определяющими для термомодеформационных изменений в зоне сварки. Процесс трения при обработке давлением можно

рассматривать как процесс пластической деформации приконтактных слоев, протекающий в результате пластической деформации всего объема тела. Силы трения и напряжения трения зависят от прочностных свойств деформируемого тела и закономерностей изменения их в процессе деформации. Закономерности изменения прочностных свойств приконтактных слоев зависят от тех же показателей, что и прочностные свойства в объеме деформируемого тела: от химического состава, температуры, степени и скорости деформации; от формы зоны деформации.

Величина локально выделяющегося тепла, вызванного силой трения, может быть выражена приближенно формулой:

$$de_f = \delta \cdot (\omega \cdot r - U \cdot \sin(\theta)) \cdot \mu_f \cdot p \cdot dA, \quad (1)$$

где  $\delta$  – величина скольжения,  $\mu_f$  коэффициент трения,  $p$  – величина силы, прикладываемой инструментом на элементарную площадку  $dA$ .

При моделировании перемешивающей сварки трением было принято, что тепловыделение определяется уравнением:

$$q = \eta \mu p v = \frac{2 \eta \mu P \omega}{60(R_o^2 - R_p^2)} r; \quad R_p \leq r \leq R_o, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока (Вт/мм<sup>2</sup>),  $P$  – нормальная сила (Н);  $\omega$  – частота вращения инструмента (об/мин);  $R_o$  и  $R_p$  – радиусы бурта и цапфы, соответственно;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты, связанные с ее отводом в инструмент;  $\mu$  – условный коэффициент трения.

На количество образующей теплоты в рабочем процессе СТП прямо влияют нормальная осевая сила  $P$  и угловая скорость вращения шпинделя  $\omega$ . Для практических расчетов количество тепла, необходимое для протекания процесса может быть выражено формулой:

$$Q = \frac{\pi \omega \mu P (R_o^2 + R_o R_p + R_p^2)}{45(R_o + R_p)}; \quad (3)$$

где  $Q$  – количество тепла, необходимое для протекания процесса;  $\omega$  – угловая скорость вращения шпинделя;  $\mu$  – коэффициент трения;  $P$  – нормальная осевая сила;  $R_o$  – радиус бурта инструмента;  $R_p$  – радиус профильного наконечника.

Из формулы (3) видно, что при установленном необходимом тепловыделении  $Q$  нормальная осевая сила  $P$  обратно пропорциональна угловой скорости вращения шпинделя  $\omega$ . Таким образом, можно выделить режимные зоны благоприятности протекания физико-механических процессов (рисунок б). Из этого следует, что большое значение осевой силы необходимо для компенсации низкого значения скорости вращения шпинделя. Машины, работающие на небольших скоростях, не обладают достаточной гибкостью для сварки деталей сложных форм и конструкций. Напротив, высокая скорость вращения инструмента дает возможность получить то же количество энергии, но при меньших силах воздействия инструмента на свариваемые детали. За счёт высокоскоростной сварки становится возможным снижения сил, воздействующих на конструкцию, снижение размеров и массы оборудования и инструмента.

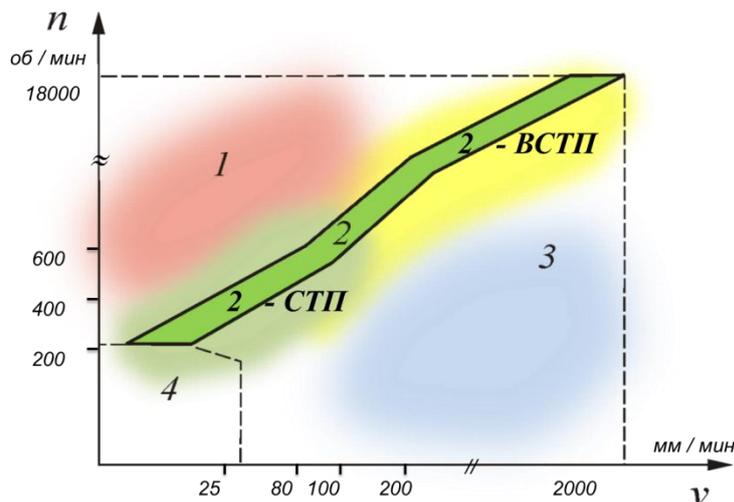


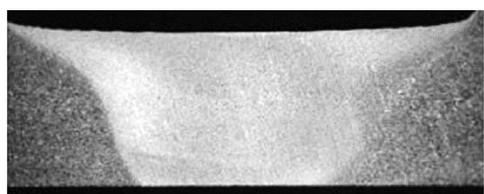
Рисунок 6 – Зоны режимов перемешивающей сварки:

1 – перегрев материала, снижение прочности шва, «проваливание» инструмента, снижение давления в зоне перемешивания; 2 – условия сварки с высоким качеством шва; 3 – недогрев металла, большие нагрузки на инструмент, опасность его поломки; 4 – очень низкая производительность сварки, избыточная пластическая деформация металла в зоне перемешивания

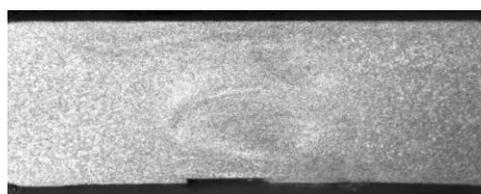
Влияние параметров процесса на структуру шва показано в таблице 1 и на рисунке 7. Образование объёмных дефектов (раковин) и пор связано с неправильным сочетанием параметров СТП. Дефекты такого рода образуются при так называемых «холодных параметрах» процесса (индекс тепла =  $(\omega^2/v)$ , где  $\omega$  – скорость вращения,  $v$  – скорость перемещения), когда скорость вращения инструмента слишком мала, а скорость перемещения велика. Путём подбора параметров был получен сварной шов, не содержащий дефектов.

Таблица 1 – Влияние режимов СТП на структуру сварных швов из алюминиевого сплава 1163 РДТВ

v, мм/мин	n, об/мин		
	200	600	1000
25			
80			
200			



а) n= 1500 об/мин; v= 250 мм/мин



б) n= 18000 об/мин; v= 2000 мм/мин

Рисунок 7 – Макроструктура сварного шва

Исследования высокоскоростной СТП проводились на алюминиевом сплаве 1163 РДТВ с использованием следующих технологических режимов: частота вращения сварочного инструмента  $n$  от 1500 об/мин до 18000 об/мин; диапазон скорости подачи от 120 мм/мин до 1000 мм/мин с регистрацией осевой силы с помощью динамометра Kistler. Результаты измерения зависимости величины осевой силы от частоты вращения шпинделя для инструментов с различной формой рабочей части показаны на рисунке 8.

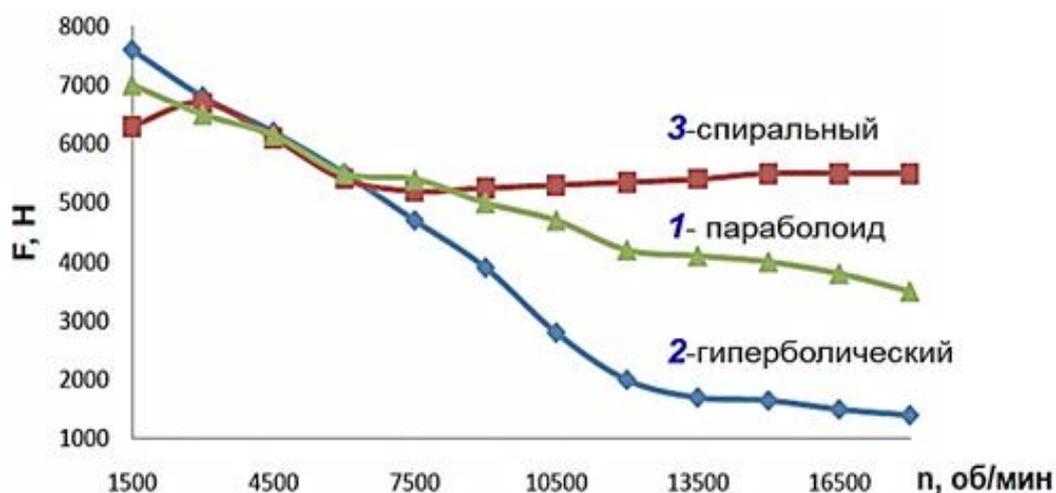


Рисунок 8 – Влияние частоты вращения инструмента на величину осевой силы при различных наконечниках (скорости сварки  $v = 700$  мм/мин)

Резкое уменьшение осевой силы в процессе движения инструмента можно наблюдать лишь до определённого значения частоты вращения. Это связано с тем, что температура, достигнув значения температуры пластификации материала (0.7 ... 0.8 Тпл), далее увеличивается незначительно, поскольку вследствие нагрева снижается сила трения. По этой причине существует определенный предел частоты вращения инструмента, при достижении которого нормальная осевая сила далее слабо уменьшается, или не уменьшается вовсе.

В условиях необходимости расширения сфер применимости и адаптации традиционного механообрабатывающего производства к целям сварки трением перемешиванием алюминиевые сплавы (АМГ-6, АД-1 и др.) свариваются без дефектов в широком диапазоне изменения скорости сварки (80...500 мм/мин) при частоте вращения 500...1600 об/мин.

Проведены экспериментальные исследования по отработке режимов и условий СТП листов титана ВТ6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 толщиной 2 мм. На основании радиографического контроля на соответствие ГОСТ 7512-82 и ОСТ 92 8828-76 сварных швов (рисунки 9, 10) определены оптимальные технологические режимы: для ВТ6  $n=400$  об/мин,  $v=200$  мм/мин; для 12Х18Н10Т  $n=1250$  об/мин,  $v=50$  мм/мин.

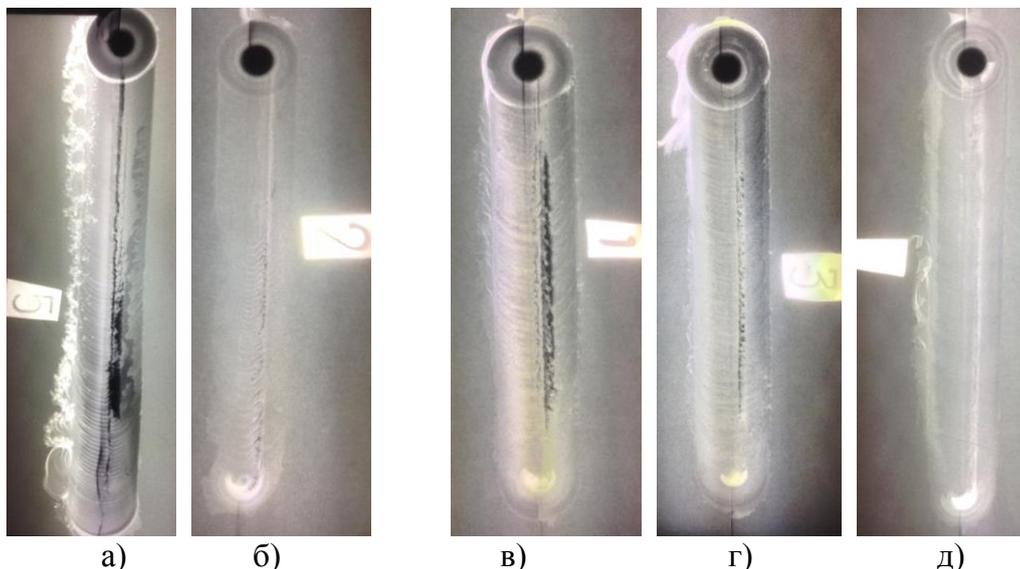
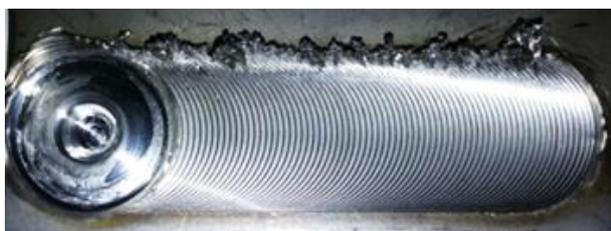


Рисунок 9 – Результаты радиографического контроля сварных швов титана ВТ6 (а, б) и стали 12Х18Н10Т (в-д), после СТП на различных режимах:

а)  $n=1000$  об/мин,  $v=100$  мм/мин; б)  $n=400$  об/мин,  $v=200$  мм/мин; в)  $n=600$  об/мин,  $v=80$  мм/мин; г)  $n=1250$  об/мин,  $v=150$  мм/мин; д)  $n=1250$  об/мин,  $v=50$  мм/мин



а)

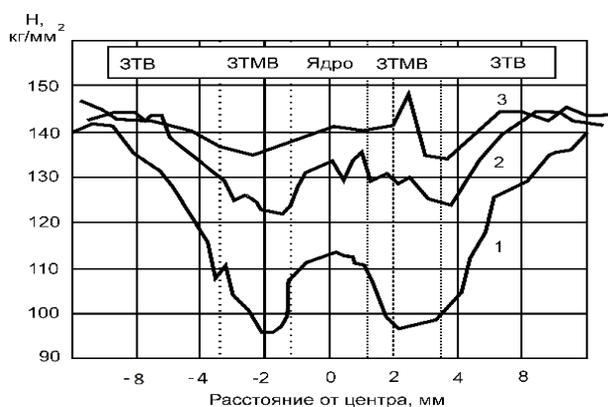


б)

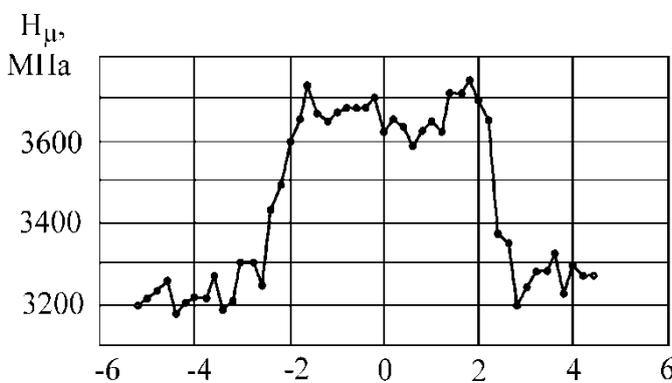
Рисунок 10 – Образцы, полученные СТП с оптимальными режимами:

а) титановый сплав ВТ-6; б) нержавеющая сталь 12Х18Н10Т

Испытания на разрыв показали, что прочность шва, сваренного СТП при высоких скоростях технологических параметров, превосходит прочность основного материала. Измерение микротвердости позволяет прогнозировать прочностные свойства шва, определить размеры и особенности зон сварки (термического влияния, термомодеформационной, перемешивания). На рисунке 11 приведены результаты измерения микротвердости в зоне шва после сварки.



а)



б)

Рисунок 11 – Распределение микротвердости в сечении сварного шва: а) изменение микротвердости после СТП сплава 1163 РДТВ в процессе естественного старения: 1 – 24 ч; 2 – 192 ч; 3 – 1200 ч; б) зависимость микротвердости от расстояния от центра шва, сплав ВТ6

Остаточные напряжения являются неотъемлемым результатом любого сварочного процесса. Они отрицательно сказываются на прочности, долговечности, устойчивости, размерной стабильности сварной конструкции и особенно опасны для конструкций с небольшим запасом пластичности, имеющих концентраторы напряжений. Задача снижения, либо оптимального перераспределения остаточных напряжений важна. На рисунке 12 приведены результаты измерения распределения остаточных напряжений в зоне шва после сварки.

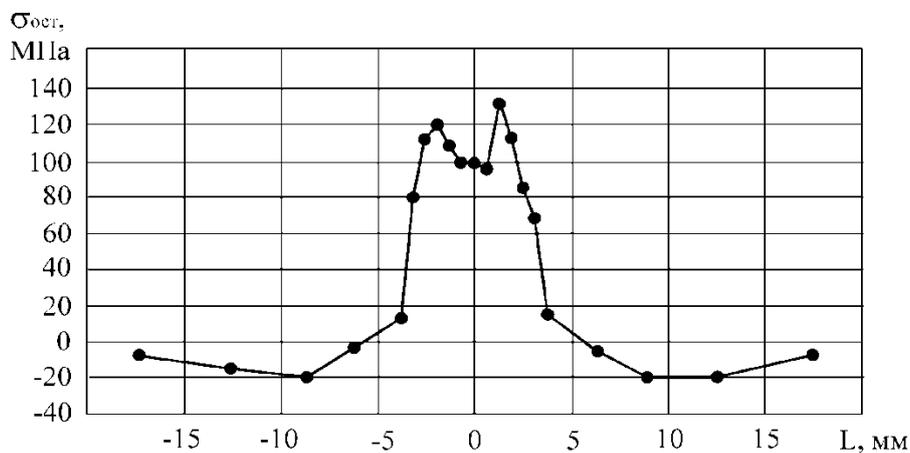


Рисунок 12 – Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении шва:  
 $n = 1600$  об/мин,  $v = 150$  мм/мин, 1163 РДТВ

На основе исследований макро- и микроструктуры, микротвердости, уровня остаточных напряжений и прочностных испытаний выполнена оптимизация технологических режимов и условий сварки.

**Третья глава** посвящена вопросам проектирования конструкции рабочей части инструмента для СТП на основе численного моделирования вязкого течения материала в зоне обработки. Предложена технологическая схема изготовления высокотвердого инструмента сложной пространственной формы методом электроэрозионного фрезерования. Приведены результаты исследования стойкости инструмента при СТП жаропрочных материалов.

Конструктивная форма рабочей части инструмента в совокупности с параметрами режимов сварки во многом определяют эффективность процессов размягчения, перемешивания и отвердевания материала. Параметры геометрии инструмента, состоящего из пина и бурта, должны не только обеспечивать качество сварного соединения, создавая требуемые условия термопластической деформации и массопереноса, но и его стойкость, прочность, минимальную силу внедрения инструмента при его введении в свариваемый стык. Одним из основных элементов, обеспечивающих качественную сварку трением, является применение инструмента из сверхтвердых материалов, имеющих низкую теплопроводность, высокую теплостойкость и устраняющих его схватывания со свариваемым материалом.

Конструкция бурта оказывает влияние на фрикционные и тепловые процессы в поверхностных и подповерхностных областях заготовки. Бурт также обеспечивает деформационные воздействия на перемешанный материал, его уплотнение и проковывание.

Конструкция пина определяет термопластические условия прогрева, перемешивания и экструзии свариваемого материала по толщине заготовок. Вращающийся пин является генератором фрикционного нагрева соединяемых поверхностей. Конструкция пина должна обеспечивать пластификацию и разрушение приповерхностных слоев в стыке отдельных поверхностей заготовок в передней (по направлению подачи) части инструмента, а затем – перемещение материала за инструмент. Глубина деформаций и скорость движения инструмента определяется и регулируется геометрической конструкцией пина.

Моделирование процесса перемешивающей сварки трением выполнялось средствами приложения Cosmos FloWorks (Solid Works). Данная программа использовалась для определения результата воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду (свариваемый материал) (рисунок 13), а также для решения задач теплообмена между материалом, инструментом и оснасткой (рисунок 14). Оценены характеристики прочности инструмента под воздействием осевых нагрузок и крутящего момента (рисунок 15).

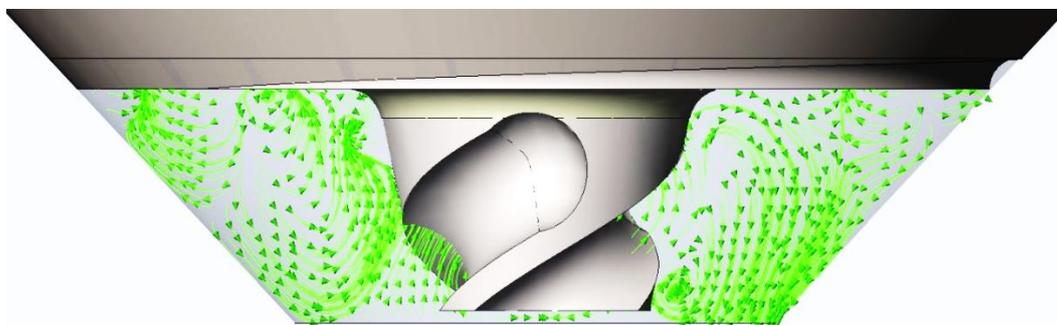


Рисунок 13 – Моделирование воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду

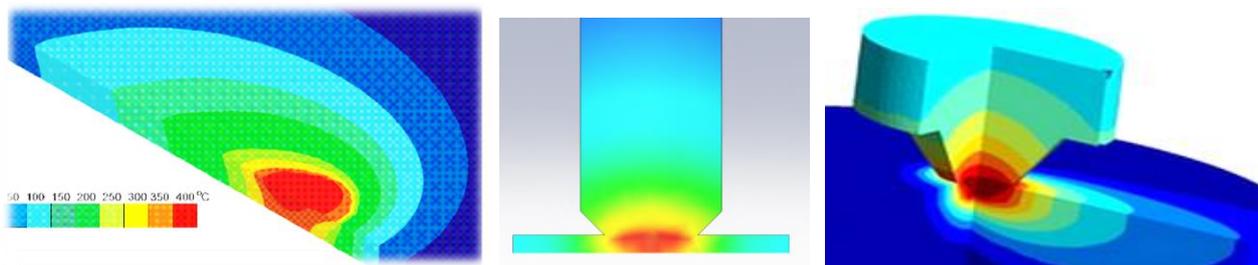


Рисунок 14 – Поле температур при сварке сплава АМГ-6 толщиной 6 мм:  $R_o = 12$  мм,  $R_p = 3$  мм,  $n = 600$  об/мин;  $v = 350$  мм/мин

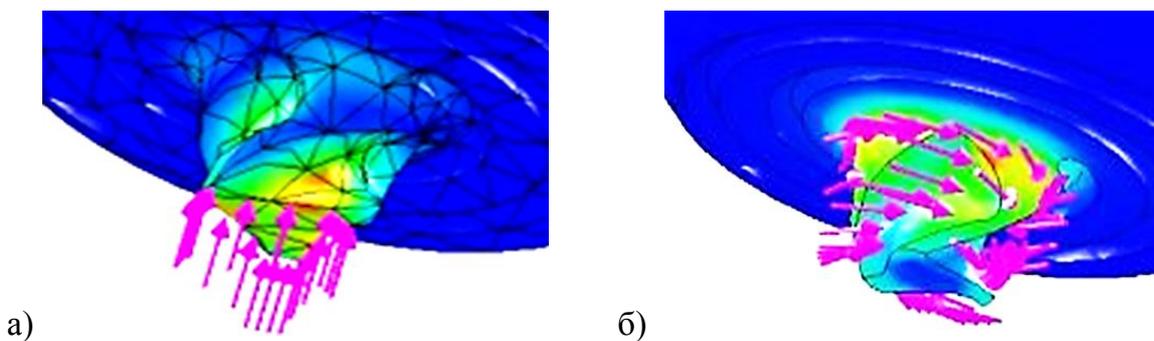


Рисунок 15 – Прочностной анализ элементов конструкции инструмента СПП под воздействием: а) осевых нагрузок; б) крутящего момента

С использованием теории подобия решена проблема разработки критериальных зависимостей, позволяющих использовать экспериментальные результаты, полученные при сварке малоразмерных образцов, для проектирования процессов сваривания изделий другой толщины и из других материалов с учетом масштабных факторов и коррекций технологических режимов.

Модельные эксперименты и опытные испытания показали, что оптимальной формой в производственных условиях является сложная геометрия, сочетающая в себе спиралевидные канавки круглого сечения двух видов шага и диаметра (рисунок 16).

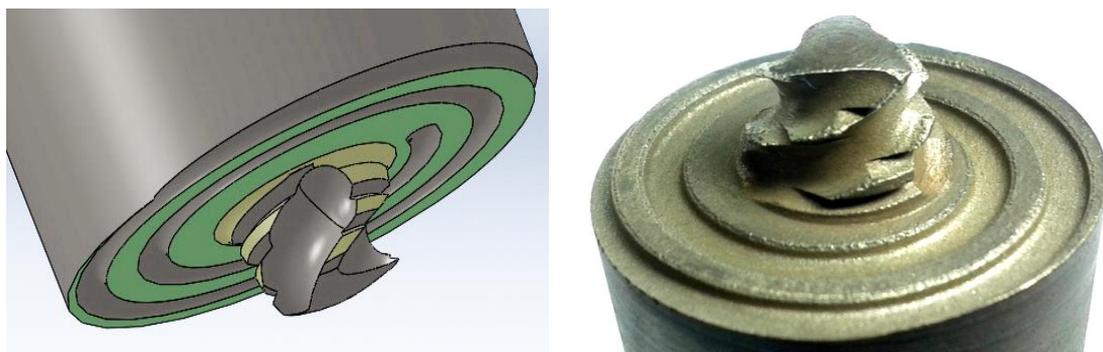


Рисунок 16 – Твердотельная модель и опытный образец инструмента СТП с рабочей частью спиралевидной формы

При экспериментальной обработке инструмента использовались быстрорежущие стали (сварка алюминиевых и магниевых сплавов), металлокерамические твердые сплавы, минералокерамика, твердые сплавы на тугоплавких и жаростойких связках, сверхтвердые композиты на основе кубического нитрида бора КНБ (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах). Изготовление инструментов сложной формы из таких высокотвердых материалов проблематично.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является наиболее подходящей для изготовления сложнопрофильных инструментов для СТП, выполненных из высокотвердых материалов. Оснащение оборудования специализированными устройствами ЧПУ, адаптированными к условиям ЭЭО, позволяет реализовать процесс со сложными кинематическими движениями. При реализации частной схемы ЭЭО – электроэрозионного фрезерования (ЭЭФ) применялись электрод-инструменты в форме диска – для получения малой винтовой канавки, цилиндрического стержня – для получения большой винтовой канавки и спирали на профилированном основании бурта. Расположение осей электрод-инструмента и заготовки под соответствующим углом и совмещение поступательного и вращательного движений обеспечивает формирование спиральных канавок с заданными шагом, глубиной и диаметром (рисунок 17). Геометрия рабочей части инструмента получается последовательным формообразованием большой винтовой канавки на предварительно сформированном профиле канавки малого шага, формированием спирали на опорном бурте.

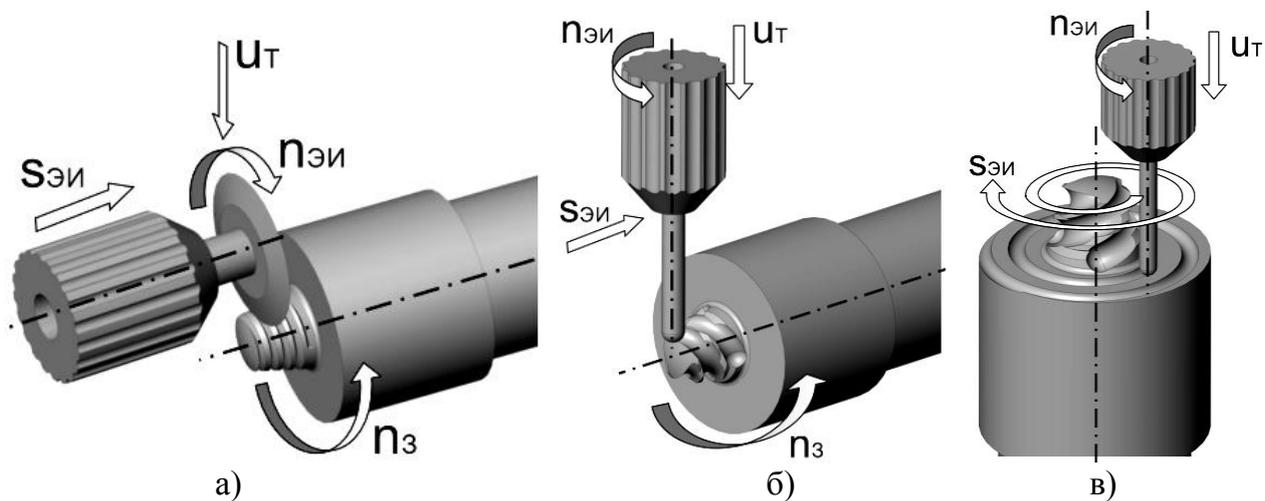


Рисунок 17 – Технологические схемы формообразования геометрии инструмента ЭЭФ:

а) малой винтовой канавки; б) большой винтовой канавки; в) опорного бурта

ЭЭО дает значительный выигрыш за счет снижения трудоемкости подготовки производства, универсальности, высокой точности. Преимуществом ЭЭО является значительное сокращение пути от чертежа до готовой детали. Это позволяет значительно ускорить производство новых образцов инструмента.

Предложены прогрессивные конструкции инструмента с применением скошенного, ступенчатого, спирального, вогнутого бурта (рисунки 18 и 19).

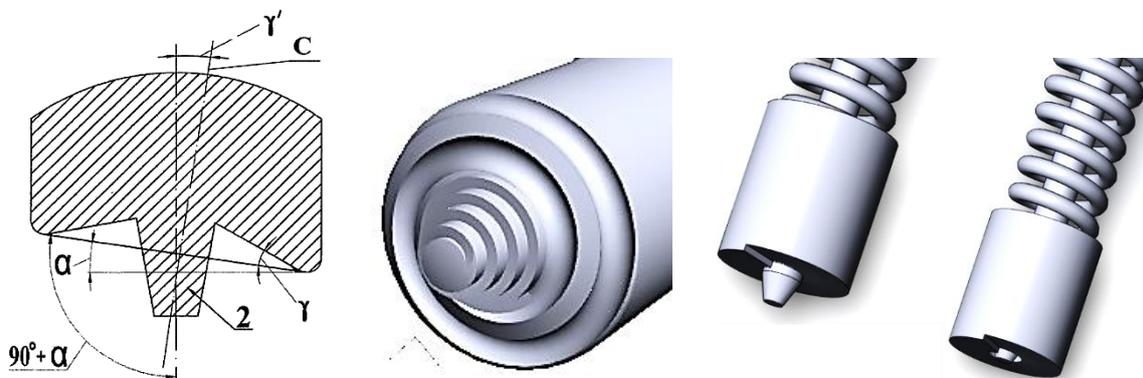


Рисунок 18 – Проекты инструмента прогрессивной конструкции рабочей части



Рисунок 19 – Проекты прогрессивного инструмента: 3D модель и готовые изделия

С целью ликвидации технологического отверстия в конце швов замкнутого контура и цилиндрических деталей спроектирована и изготовлена оснастка для вывода инструмента из зоны сварки (убирающийся пин). Конструкции инструмента прошли апробацию, внедрены в производство, защищены патентом.

В процессе работы проведены ресурсные испытания макетных образцов инструмента при СТП сплавов на основе титана и железа из различных инструментальных материалов. На основании полученных данных по среднему значению износа и ресурса работы макетных образцов инструмента для СТП можно сделать вывод: лучший результат при СТП титана ВТ6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т показал инструментальный материал вольфрам-рениевый сплав ВР25 ТУ 48-19-274-77 в сравнении с такими материалами как А04 ТУ 48-4205-90-2010 (аналог ВК8) и Н10F Sandvik Coromant (аналог ВК20-ОМ).

**В четвертой главе** представлены результаты разработки специального технологического оборудования и оснащения как для экспериментальной отработки, так и производственного применения различных технологических схем СТП сложных пространственных конструкций.

В качестве демонстратора технологий была спроектирована и изготовлена опытно-промышленная установка высокоскоростной СТП (рисунок 20). Проектирование установки проводилось с использованием программы 3D-моделирования SolidWorks, позволяющей выполнить построение объемной модели, оценку технологичности, внести корректировки, получить чертежи деталей и узлов.

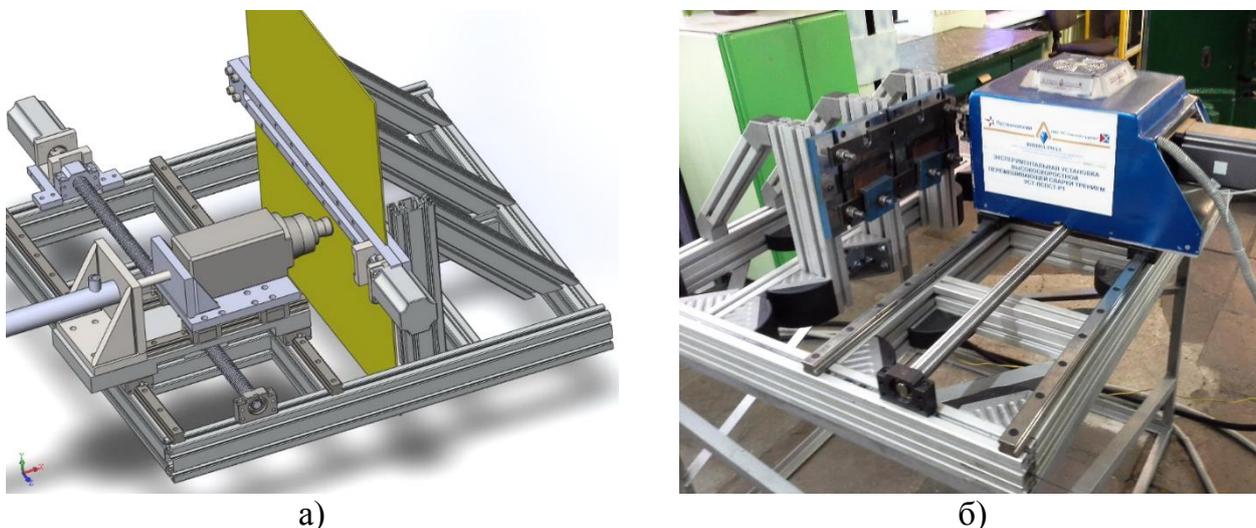


Рисунок 20 – Установка высокоскоростной сварки трением перемешиванием (ВСТП):  
б) геометрическая модель; а) общий вид установки

Разработаны технологические схемы и выполнена установка для сварки круговых швов трубчатых заготовок (рисунок 21). Выполнены исследования СТП длинномерных деталей фюзеляжа ЛА сплава 1163 РДТВ (рисунок 22), а также коробчатых конструкций алюминиевых сплавов АМг6 и Д16Т для авиационного приборостроения (рисунок 23).

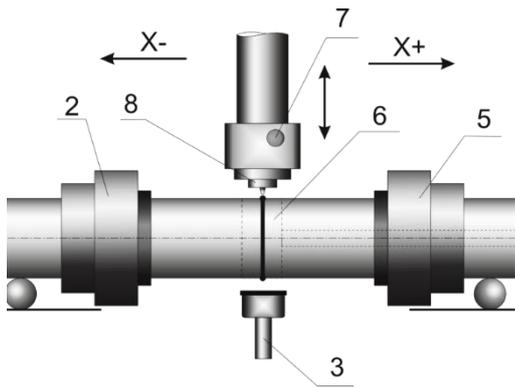


Рисунок 21 – Технологическая схема и сваренные образцы кольцевых конструкций

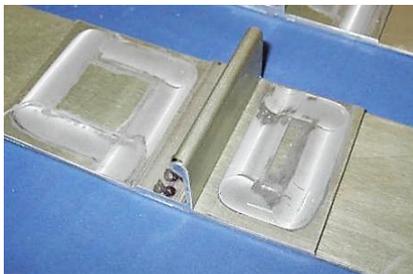
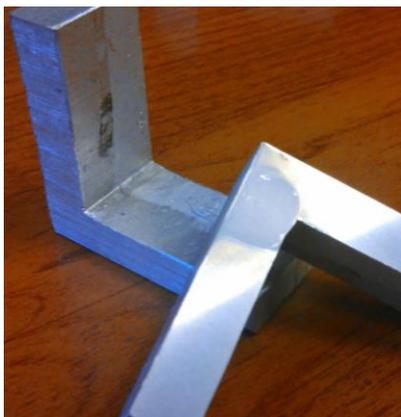


Рисунок 22 – Соединения методом ВСТП конструкций фюзеляжа самолета (сплав 1163 РДТВ)



а)



б)



в)

Рисунок 23 – Соединение в производстве корпусов приборов ЛА (угловые швы СТП):  
а) сплава Д16АМ; б, в) сплав АМГ6

Выполнены проекты технологического оснащения сварки крупногабаритных конструкций РКТ типа топливных баков (рисунок 24). Сварка трением может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу-вверх и т.д.), поскольку силы гравитации, в данном случае, не играют роли, что делает доступными свариваемость сложных пространственных форм.



Рисунок 24 – Проекты технологического оснащения сварки крупногабаритных конструкций РКТ

В **заключении** диссертации приводятся основные результаты выполненного исследования.

**Приложение** к диссертационной работе включает копию свидетельства о государственной регистрации патента RU (11) 2 621 514(13) С2 на инструмент для сварки трением с перемешиванием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработано научно-методическое обеспечение повышения эффективности и надежности технологического процесса сварки трением с перемешиванием при производстве аэрокосмических конструкций для улучшения их эксплуатационных характеристик при сокращении затрат и производственного цикла.

На основе анализа технологических возможностей и современных достижений в области технологии формирования неразъемных соединений авиационных и ракетно-космических конструкций установлены взаимосвязи процесса сварки трением с перемешиванием с некоторыми технологическими ограничениями в производстве аэрокосмических конструкций, связанными с отсутствием методик и моделей:

- позволяющих на стадии технологической подготовки производства назначать технологические режимы сварки и проектировать сварочный инструмент;

- сваривания высокопрочных материалов с относительно высокой температурой пластификации;

- снижения сил, действующих на рабочий инструмент и заготовку и др.

Определены закономерности и модели теплового баланса в зоне сварки, позволяющие прогнозировать технологические возможности высокоскоростной сварки трением. Установлено, что высокоскоростная сварка трением с перемешиванием позволяет получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования.

Проведены исследования и экспериментальная отработка по назначению режимов и условий перемешивающей сварки трением применительно к легким алюминиевым сплавам, жаростойким легированным сталям. На основе исследований макро- и микроструктуры, микротвердости, уровня остаточных напряжений и прочностных испытаний получены технологические рекомендации по выбору режимов и условий сварки. Так, например, результаты экспериментов показали, что алюминиевые сплавы (АМГ-6, АД-1 и др.) свариваются перемешивающей сваркой трением без дефектов в широком диапазоне изменения скорости сварки (80...500 мм/мин) при частоте вращения 500...1600 об/мин.

Проведенные испытания эксплуатационных характеристик сварного шва при высокоскоростной сварке трением с перемешиванием на рекомендованных режимах показали, что их уровень находится в пределах (90...95 %) прочности основного материала, а в некоторых случаях превышает прочностные характеристики основного материала свариваемой конструкции.

Разработана методика конструкторско-технологической отработки инструмента повышенной стойкости для сварки трением с перемешиванием жаропрочных материалов. Отличительной особенностью методики является возможность по результатам моделирования вязкого течения материала в зоне сварки создавать параметрические геометрические модели рабочих частей инструмента при различных конструкторско-технологических ограничениях и требованиях. На основе модельных экспериментов спроектированы,

изготовлены и прошли опытную и производственную апробацию новые конструкции сложнопрофильного высокотвердого инструмента, обладающего высокой стойкостью, обеспечивающие высокое качество сварного шва. Показано, что предложенные конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием позволяют получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования.

Предложены и отработаны новые технологические схемы электроэрозионного фрезерования для формообразования рабочей части инструмента, профиль которой образован сочетанием винтовых канавок различного шага, глубины и диаметра. Данная технология изготовления позволяет получить инструмент с требуемой точностью при снижении трудоемкости и энергозатрат на обработку твердого материала.

Разработаны опытные установки высокоскоростной перемешивающей сварки трением (ВСПСТ-1, ВСПСТ-М, УСТ ВСПСТ-Р1). Предложены технологические схемы и оснащение для соединения пространственных конструкций: длинномерных, круговых, трубчатых, коробчатых, сложной формы; выполнены образцы элементов авиационной техники – корпусов, обечаек, валов.

Организована и проведена технологическая экспертиза производственной целесообразности применения метода сварки трением с перемешиванием в специальных задачах аэрокосмического производства. Результатом оценки производственной целесообразности применения метода в типовых операциях сварки авиационных конструкций с высокой степенью согласованности явилось заключение о преимуществе сварки трением по сравнению с электронно-лучевой и существенное опережение этих методов в сравнении с другими альтернативами.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Курицына, В.В., Курицын, Д.Н., Косов, Д.Е. Автоматизированная система обработки экспертных оценок при принятии технологических решений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. № 4. Т.8. С.44-55.
2. Бойцов, А.Г., Качко, В.В., Курицын, Д.Н. Высокоскоростная сварка трением перемешиванием авиационных материалов и конструкций // Металлообработка. 2013. № 5-6 (77-78). С. 35-42.
3. Бойцов, А.Г., Качко, В.В., Курицын, Д.Н. Технологические возможности и специальное оснащение высокоскоростной перемешивающей сварки трением авиационных материалов и конструкций // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 8 (209). С. 9-17.
4. Курицын, Д.Н., Денисов, Л.В., Пискарев, А.С., Бойцов, А.Г. Технологии и специальное оснащение высокоскоростной сварки трением с перемешиванием металлоконструкций // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С.194-200.
5. Курицына, В.В., Курицын, Д.Н. Инструментальные средства MatLab Simulink в задачах экспертной оценки технологических систем по параметрам качества изготовления изделий точного машиностроения // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. № 1. С. 105-111.
6. Бойцов, А.Г., Курицын, Д.Н., Силуянова, М.В. Курицына, В.В. Технологическое обеспечение сварки трением с перемешиванием в аэрокосмических конструкциях // СТИН. 2018. № 6. С.19-24.

### Объекты интеллектуальной собственности:

7. Патент RU (11) 2 621 514(13) С2, Кл. МПК В 23 К 20/12 (2006.01). Инструмент для сварки трением с перемешиванием / Люшинский А.В., Баранов А.А., Бойцов А.Г., Плешаков А.С., Качко В.В., Курицын Д.Н. Заявка № 2015150496, 25.11.2015. Опубликовано: 06.06.2017 Бюл. № 16.

### Публикации в зарубежных изданиях:

8. Курицын, Д.Н. Сварка трением перемешиванием: Исследование влияния технологических факторов процесса на качество соединений, разработка средств оснащения: Монография. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 162 с. ISBN: 978-3-659-39314-3. (DNB, Katalog der Deutschen Nationalbibliothek: idn=1035008955).
9. Курицына, В.В., Курицын, Д.Н. Объекты аэрокосмического производства. Введение в специальность «Двигатели летательных аппаратов»: Учебное пособие. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 175 с. ISBN: 978-3-659-64962-2. (DNB, Katalog der Deutschen Nationalbibliothek: idn=1064698409).
10. Kuritsyna, V.V., Kuritsyn, D.N. Automation Expert Assessment in the Procedure of Technological Audit of Industrial Enterprises // European Science and Technology: materials of the XI international research and practice conference, Munich, October 21th – 22th, 2015 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2015. pp. 92-101
11. Объекты аэрокосмического производства. Введение в специальность «Двигатели летательных аппаратов»: Аннотация учебного пособия / В.В. Курицына, Д.Н. Курицын: Catalog of the Scientific, Educational and Methodical Literature Presented by Authors at the I-XXIV All-Russian Exhibitions Held By Academy Of Natural History: Exposition on the PARIS BOOK FAIR 2015. Vol. XI –M.: Publishing House «Academy of Natural History», 2015. – P.102-103. (–249 p.).

## Публикации в других научных журналах и сборниках трудов:

12. Качко, В.В., Курицын, Д.Н., Бойцов, А.Г. Влияние технологических факторов высокоскоростной перемешивающей сварки трением на качество получаемых соединений // Научные труды (Вестник МАТИ). Вып. 19 (91). – М.: МАТИ, 2012. С. 156-162.
13. Курицына, В.В., Косов, Д.Е., Курицын, Д.Н. Автоматизация задач экспертного оценивания в процедурах технологического менеджмента авиационного производства: Научные труды (Вестник МАТИ). Вып. 19 (91). – М.: МАТИ, 2012. С. 162-173.
14. Бойцов, А.Г., Качко, В.В., Курицын, Д.Н. Сварка трением перемешиванием // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 10 (88). С. 38-46.
15. Курицын, Д.Н. Исследование возможности высокоскоростной перемешивающей сварки трением в авиадвигателестроении / Проблемы и перспективы развития авиации и авиастроения России: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 17 мая 2013 г., г. Уфа / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа: УГАТУ, 2013. С. 161-165.
16. Бойцов, А.Г., Курицын, Д.Н., Денисов, Л.В. Технологические схемы электроэрозионной обработки сложнопрофильного инструмента для сварки трением перемешиванием // Научные труды (Вестник МАТИ). 2014. № 23 (95). С. 99-110.
17. Бойцов, А.Г., Курицын, Д.Н., Денисов, Л.В. Оптимизация формы и технология изготовления сложнопрофильного инструмента для сварки трением перемешиванием // ИНЖИНИРИНГ ТЕХНО 2014: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2014. – Т.2. – С.146-154.
18. Бойцов, А.Г., Плешаков, А.С., Курицын, Д.Н., Денисов, Л.В. Инструмент для сварки трением перемешиванием: Материалы Научной конференции «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» 25 сентября 2014 г. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ – М.: ВИАМ, 2014. 7 с.
19. Курицын, Д.Н. Исследование энергоэффективных методов сборки неразъёмных соединений аэрокосмических конструкций методом высокоскоростной сварки трением с перемешиванием / Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики: тезисы докладов Всероссийской молодёжной научно-практической конференции (05-06 июня 2015 г., г. Благовещенск). – Самара: СГАУ, 2015. С.28-30.
20. Курицына, В.В., Силуянова, М.В., Курицын, Д.Н. Инструментальные средства информационного сопровождения технологического аудита наукоемких производств / Сборник научных трудов: материалы Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (МНТК ИВТ-2016, 4-6 апреля 2016 г.); Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Выпуск 2 (XXII) / Под ред. д.т.н., проф. Кондратенко В.С. – М.: 2016. С.332-335.
21. Курицын, Д.Н. Технологическое обеспечение сварки трением с перемешиванием в производстве аэрокосмической техники // Тезисы докладов XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (30 октября – 3 ноября 2017 г., г. Королёв, РКК «Энергия»). Т.1. – Королев: РКК «Энергия» имени С.П. Королёва, 2017. С.112-113.