

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Курицын Денис Николаевич



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Бойцов Алексей Георгиевич  
доктор технических наук, доцент

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Анализ конструкторско-технологических решений в области создания неразъемных соединений в изделиях аэрокосмической техники .....	20
1.1 Анализ особенностей сварки трением как метода получения неразъемных соединений авиационных конструкций .....	20
1.1.1 Проблемы сварки авиационных материалов .....	20
1.1.2 Сварка трением в классификации процессов сварки .....	23
1.1.3 Базовая схема сварки трением с перемешиванием .....	25
1.2 Анализ теоретических исследований в области свариваемости авиационных материалов .....	27
1.3 Конструкторско-технологические решения при создании изделий авиационной и ракетно-космической техники.....	32
1.3.1 Технологические решения в авиастроении.....	32
1.3.2 Технологические решения в ракетно-космической технике.....	39
1.3.3 Трансфер технологии сварки трением с перемешиванием в отрасли транспортного машиностроения.....	42
1.4 Анализ преимуществ и технологических ограничений сварки трением с перемешиванием .....	45
Выводы по главе 1 .....	49
2 Исследование влияния технологических режимов сварки трением перемешиванием на качество получаемых соединений .....	50
2.1 Методическое обеспечение исследований .....	50
2.1.1 Методика теоретических и экспериментальных исследований .....	50
2.1.2 Методика отработки технологического обеспечения сварки трением перемешиванием для аэрокосмических конструкций.....	51
2.2 Формирование сварного шва в процессах сварки трением с перемешиванием .....	53
2.2.1 Схема формирования сварного шва.....	53
2.2.2 Физико-механические явления в зоне сварки трением с перемешиванием .....	56
2.2.3 Определяющие технологические параметры и циклограммы процесса сварки трением с перемешиванием .....	57
2.2.4 Энергия пластического деформирования.....	66
2.2.5 Теоретический потенциал возможности высокоскоростной сварки трением с перемешиванием .....	71
2.3 Экспериментальная отработка режимов сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов с возможностью высокоскоростной обработки .....	72

2.3.1	Отработка режимов сварки трением перемешиванием алюминиевых сплавов .....	72
2.3.2	Прочностные испытания сваренных образцов .....	77
2.3.3	Экспериментальная отработка режимов высокоскоростной сварки трением с перемешиванием .....	80
2.4	Экспериментальная отработка режимов сварки трением перемешиванием титанового сплава и жаропрочной стали .....	83
2.4.1	Свариваемые материалы .....	83
2.4.2	Выбор инструмента для отработки режимов сварки трением .....	84
2.4.3	Испытательное оборудование, средства измерения и контроля .....	86
2.4.4	Факторный эксперимент отработки технологических режимов.....	87
2.5	Оценка качества сварного шва по параметрам физико- механическим параметрам .....	91
2.5.1	Анализ распределения микротвердости в сварном шве .....	91
2.5.2	Анализ остаточных напряжений .....	94
2.5.3	Распределение температурных полей.....	96
Выводы по главе 2.....		97
3	Методика конструкторско-технологической отработки инструмента повышенной стойкости для сварки трением перемешиванием жаропрочных материалов.....	99
3.1	Особенности конструкции инструмента для сварки трением перемешиванием .....	99
3.1.1	Конфигурации рабочих частей инструментов.....	99
3.1.2	Инструментальные материалы для сварки трением с перемешиванием .....	101
3.2	Оптимизация конструкции рабочей части инструмента для сварки трением с перемешиванием на основе численного моделирования вязкого течения материала в зоне обработки .....	103
3.2.1	Параметрическое моделирование конструкции инструмента с учетом физико-механических особенностей формирования шва.....	103
3.2.2	Моделирование тепломеханических и вязкотекучих процессов перемешивающей сварки трением .....	105
3.2.3	Экспериментальная отработка сварочного инструмента .....	109
3.2.4	Новые технические решения конструкции инструмента .....	112
3.3	Ресурсные испытания специального инструмента при сварке трением с перемешиванием жаропрочных материалов .....	114
3.3.1	Физико-механические и технологические требования, предъявляемые к инструменту .....	114

3.3.2	Экспериментальное определение ресурса инструмента различных инструментальных материалов .....	115
3.4	Реализация технологии изготовления высокотвердого инструмента сложной пространственной формы .....	120
	Выводы по главе 3 .....	124
4	Разработка специального оборудования и средств технологического оснащения перемешивающей сварки трением .....	126
4.1	Конструирование и проектирование установки высокоскоростной сварки трением .....	126
4.1.1	Функциональные требования к конструкции установки высокоскоростной сварки трением перемешиванием .....	126
4.1.2	Проектирование установки ВСТП .....	127
4.1.3	Изготовление установки .....	130
4.2	Технологические схемы сварки трением пространственных авиационных конструкций .....	134
4.2.1	Отработка технологической схемы сварки корпусов приборов .....	134
4.2.2	Отработка технологии сборки конструкций фюзеляжа самолета из экструдированных секций .....	138
4.2.3	Технологические схемы сварки трением кольцевых швов трубчатых заготовок .....	140
4.3	Проекты технологического оснащения сварки трением крупногабаритных конструкций ракетно-космической техники .....	143
4.3.1	Особенности технологического процесса изготовления топливных резервуаров .....	143
4.3.2	Установка для сварки обечайки .....	144
4.3.3	Установка для сварки днищ из предварительно формованных листов .....	145
4.3.4	Установка для сварки резервуара из колец (обечаек) и днищ .....	147
4.4	Технологическая экспертиза производственной целесообразности применения сварки трением с перемешиванием в специальных задачах аэрокосмического производства .....	150
	Выводы по главе 4 .....	157
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	158
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	161
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ....	176

## ВВЕДЕНИЕ

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

Сварка трением перемешиванием (СТП) (FSW – friction stir welding) является относительно новым методом получения неразъемных соединений материалов (запатентована The Welding Institute in UK (TWI) (Великобритания) в 1991 году [120]). На этот способ сварки имеется более раннее отечественное авторское свидетельство [10]. СТП представляет собой процесс соединения материалов в твердом состоянии, выполняется вращающимся инструментом, обеспечивающим за счет трения разогрев, пластификацию и перемешивание материала соединяемых элементов конструкций.

В последние годы в связи с появлением новых типов оборудования с системами числового программного управления данный вид сварки начинает широко применяться в производстве космических и летательных аппаратов различного назначения, в двигателестроении и др. В авиационно-космической промышленности с помощью СТП изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов крупные отсеки для спутников, внешних резервуаров и внешних баков топливных отсеков ракетносителей, космических аппаратов, стендовых образцов ракетно-космической техники. СТП является эффективным способом получения высококачественных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы.

Достоинством применения сварки трением является высокое качество получаемых сварных соединений. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе в условиях «теплой» деформации создает микроструктуры более прочные, чем основной материал. Как правило, прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90% от этих характеристик для основного материала, на уровне, обеспечиваемом применением дорогостоящих электронно-лучевой, диффузионной и лазерной сварок. Переход на перемешивающую сварку трением топливных резервуаров позволяет достичь сокращения издержек на 60%, а также сокращения времени производства на 50% при сохранении и даже повы-

шении качества сварного шва, что актуально для современного производства широкого класса специальных конструкций авиационной и ракетно-космической техники (РКТ).

В области авиаракетостроения проводились исследования технологических возможностей СТП для сварки ответственных конструкций фюзеляжа, баков, панелей различного назначения (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, Novatech 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.

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

Проблемам физико-технического обоснования и технологической отработки 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 [114, 115], С. J. Dawes, W.M. Thomas [100, 120-122], А. Я. Ищенко [29, 73-75] и др. В данных работах рассматриваются принципы метода и технологические возможности сварки алюминиевых сплавов. Работы ведущих ученых: М. М. Штрикмана, О. С. Сироткина, В. А. Половцева [57, 63-66, 76, 89-93], В. А. Бакшаева [12-15], А. Г. Бойцова, А. В. Люшинского [16-22, 28, 69, 70, 86], В. М. Бычкова, А. Ю. Медведева [11, 23, 58, 59], В. А. Фролова [77, 87, 88], В. И. Лукина, В. В. Овчинникова, В. И. Кулика [53-56, 67], Р. К. Газизова [24] и др. – посвящены

экспериментальной отработке режимов процесса, исследованию эффективных конструкций оснащения.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс СТП в действительности сложен. В нем взаимодействуют такие явления, как тепловыделение при трении, образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения, быстрый нагрев и охлаждение объемов металла при больших давлениях, пластическая деформация, деформационное упрочнение и рекристаллизация металла и др. Процессы перемешивающей сварки трением недостаточно изучены. Выполненные исследования позволяют представить качественную картину явлений, происходящих при сварке, сделать технологические прогнозы о потенциальных возможностях процесса. К сожалению, в нашей стране промышленное оборудование для СТП не выпускается. В тоже время в развитых странах применение сварки трением возрастает на 15...20% в год.

В этой связи диссертационное исследование, посвященное разработке методики получения неразъемных соединений в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники методом сварки трением перемешиванием, разработке прогрессивных технологических схем, оборудования и износостойкого инструмента, является актуальным. Его выполнение позволяет решить целый 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 цели поставлены и решены следующие задачи:**

1. Выполнить анализ технологических возможностей и ограничений в области технологии формирования неразъемных соединений авиационных и ра-

кетно-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 с 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 теплостойких 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») и 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 напряжений 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 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 Медалью, 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.

Статьи в рецензируемых журналах, 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:

1. 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:

1. 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).

2. 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).

3. 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

4. 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 –М.: Publishing House «Academy of Natural History», 2015. – P.102-103. (249 p.).

Публикации в других изданиях:

1. 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.

2. 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.

3. Бойцов, А.Г., Качко, В.В., Курицын, Д.Н. Сварка трением перемешиванием // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 10 (88). С. 38-46.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

### **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.

**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.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей протекания процесса СТП, его моделированию, формированию сварных соединений различного типа. Представлены результаты исследования закономерностей формирования сварного шва, установлены определяющие технологические параметры и условия 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.

**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. Предложены прогрессивные конструкции инструмента с применением скошенного, ступенчатого, спирально-

го, вогнутого бурта. Конструкции инструмента прошли апробацию, внедрены в производство, защищены патентом. Приведены результаты исследования стойкости инструмента при СТП жаропрочных материалов. В процессе работы проведены ресурсные испытания макетных образцов инструмента при СТП сплавов на основе титана и железа из различных инструментальных материалов.

**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. Разработаны технологические схемы и выполнена установка для сварки круговых швов трубчатых заготовок. Выполнены исследования СТП длинномерных деталей фюзеляжа ЛА, а также коробчатых конструкций.

Результатом выполненной технологической экспертизы с высокой степенью согласованности явилось заключение о преимуществе и существенном опережении сварки трением по сравнению с другими альтернативами. По мнению ведущих экспертов, данный процесс является революционным в области сварки листовых материалов из легких сплавов (алюминиевых и магниевых). Эту технологию считают ключевой для создания авиационной техники пятого и шестого поколения.

**В заключении диссертации** приведены основные положения, характеризующие ее научное содержание как разработку нового конструкторско-технологического решения для создания неразъемных конструкций авиационной и ракетно-космической техники, разработки новых конструкций инструментального обеспечения, оборудования и оснащения сварки трением с перемешиванием.

# 1 Анализ конструкторско-технологических решений в области создания неразъемных соединений в изделиях аэрокосмической техники

## 1.1 Анализ особенностей сварки трением как метода получения неразъемных соединений авиационных конструкций

### 1.1.1 Проблемы сварки авиационных материалов

Конструкторско-технологические решения в области получения неразъемных соединений в конструкциях летательных аппаратов традиционно пользовались повышенным вниманием ученых и инженеров, так как являются определяющими в достижении массового, прочностного совершенства авиационной и ракетно-космической техники, надежности изделий и эффективности производственных технологий из создания.

Пространственные конструкции элементов авиационных и космических летательных аппаратов выполняются в виде неразъемных соединений различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, обечайки, коробчатые конструкции. В области авиационной техники – это конструкций фюзеляжа, баков, панелей различного назначения, различные теплообменные агрегаты, корпуса приборных отсеков, резервуары. В области РКТ к данным конструкциям относятся отсеки для спутников, внешних резервуаров топливных баков ракетносителей, космических аппаратов, стендовых образцов (рисунок 1.1).

Во всем мире в аэрокосмической промышленности проводят разработки по внедрению прогрессивных технологий в производство элементов корпусов воздушных летательных аппаратов, ракет, ракетносителей. Эти мероприятия проводятся с целью уменьшения веса конструкции при сохранении эксплуатационных свойств, повышение эффективности производства по параметрам ресурсоемкости и трудоемкости, снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт.

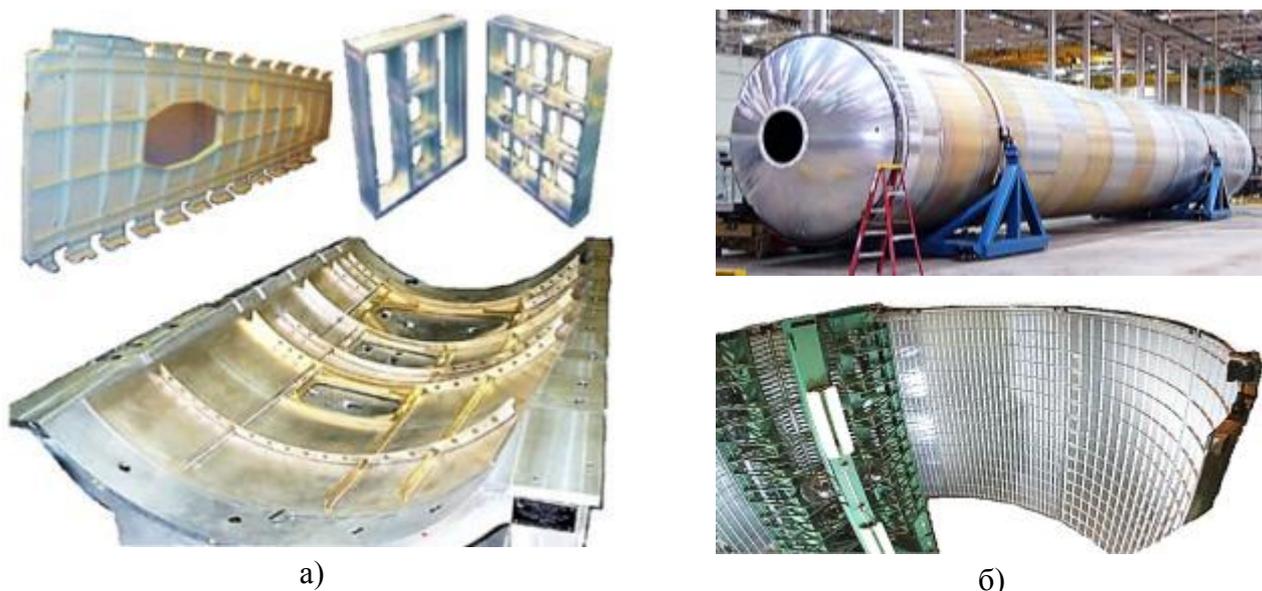


Рисунок 1.1 – Элементы конструкций ЛА, получение которых возможно с использованием сварки трением с перемешиванием:  
а) самолетов; б) ракетно-космической техники

Трудно переоценить роль и объем процессов сварки в технологиях изготовления авиационной, космической, транспортной техники.

Развитие производства легких конструкций техники невозможно без использования конструкционных материалов, имеющих высокие механические свойства при малом удельном весе. Но не всегда материалы обладают необходимой технологичностью при получении неразъемных соединений. Примером таких материалов являются алюминиевые сплавы, основными достоинствами которых, являются малая плотность, высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость, но при этом обладают плохой свариваемостью при использовании традиционных методов сварки плавлением. Основной проблемой при этом часто является предрасположенность алюминиевых сплавов к образованию пор и горячих трещин, которые образуются при кристаллизации расплава, кроме того для их сваривания необходимо использование защитных газов или флюсов.

Для осуществления сварки должны быть приняты меры по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления. С этой целью используют специальные сварочные флюсы или сварку осуществляют в атмосфере инертных защитных газов. Вследствие большой химической прочности соедине-

ния  $Al_2O_3$  восстановление алюминия из окисла в условиях сварки практически невозможно.

При сварке алюминиевых сплавов кристаллическая структура и механические свойства металла швов могут изменяться в зависимости от состава сплава, используемого присадочного металла, способов и режимов сварки. Для всех способов сварки характерно наличие больших скоростей охлаждения и направленного отвода тепла. При кристаллизации в этих условиях часто развивается дендритная ликвация, что приводит к появлению в структуре металла эвтектики. Эвтектика снижает пластичность и прочность металла. В связи с этим в швах возможно возникновение кристаллизационных трещин в процессе кристаллизации.

Наличие всех этих недостатков при использовании сварки плавлением, заставляет уделять особое внимание к прочностным свойствам сварного шва особое внимание и соответственно ужесточать его контроль.

Выполненные в последние годы исследования показали, что для соединения конструкций из алюминиевых сплавов наиболее эффективной является технология – перемешивающая сварка трением.

Технологические сложности и низкая экономическая эффективность традиционных видов сварки при производстве деталей и изделий из алюминия привели к необходимости разработки принципиально нового метода. Так в 1991 году была запатентована сварка трением перемешиванием (СТП), получившая сегодня широкое применение во всем мире.

Сварка трением с перемешиванием относится к твердофазным способам с использованием трения СТП используется во многих областях промышленности. Сварка трением является разновидностью сварки давлением, при которой неразъемное соединение образуется в твердой фазе в результате совместной пластической деформации свариваемых металлов. От других видов сварки давлением она отличается только источником нагрева.

### 1.1.2 Сварка трением в классификации процессов сварки

Современная промышленность располагает несколькими десятками видов и разновидностей способов сварки металлов [124-127], применение которых целесообразно классифицировать по трем основным признакам (рисунок 1.2):

- *физические* – форма энергии, используемой для образования сварного соединения, Вид энергоносителя.
- *технические* – способ защиты металла в зоне сварки, непрерывность сварки, степень механизации сварки.
- *технологические* – установлены для каждого вида сварки отдельно.

Определение термина по ГОСТ Р ИСО 857-1-2009 «Процессы сварки металлов. Термины и определения» [8, 125, 129]:

*Сварка трением* – сварка давлением, при которой поверхности разогреваются трением, обычно путем вращения одной или обеих заготовок в контакте друг с другом или путем вращения отдельного третьего тела; сварка завершается приложением ковочного усилия, обычно после прекращения вращения.

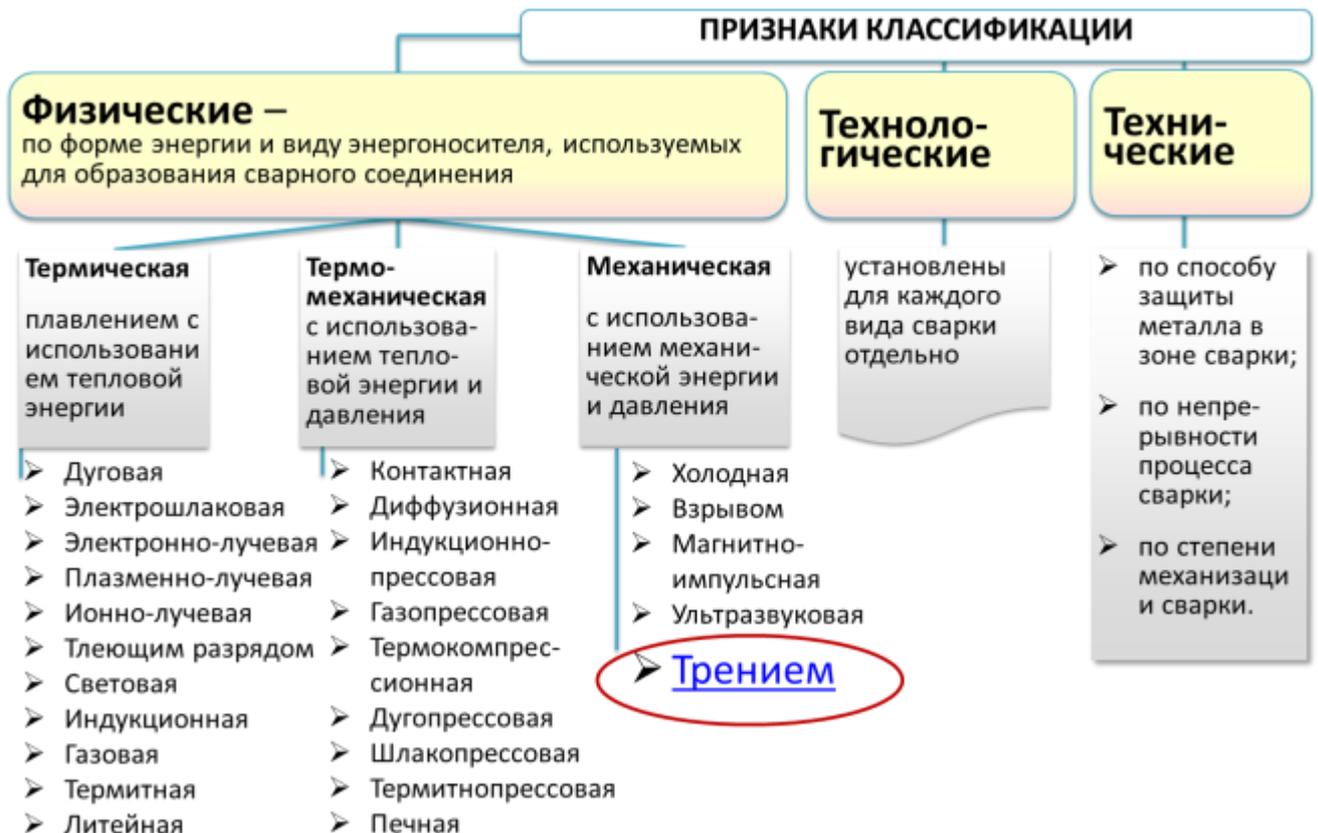


Рисунок 1.2 – Классификация способов сварки по физическим принципам

Сварка трением выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла, выделяемого при трении. Большинство металлов и сплавов могут быть сварены между собой практически без потери прочности. Затруднена сварка материалов, имеющих неметаллические включения, в частности, сталей, содержащих серу. Параметры процесса сварки зависят от типа соединяемых материалов и отрабатываются экспериментально.

На практике используются несколько разновидностей сварки трением (рисунок 1.3) основными из которых являются:

- ротационная сварка трением (Rotational Friction Welding);
- радиальная сварка трением (Radial Friction Welding);
- сварка трением перемешиванием (Friction Stir Welding);
- линейная сварка трением (Linear Friction Welding);
- точечная сварка трением (Friction Stir Spot Welding);
- орбитальная сварка трением (Orbital Friction Welding).



Рисунок 1.3 – Процессы сварки трением

*Сварка трением перемешиванием* среди них обладает кинематическими возможностями, сходными с технологической схемой фрезерования концевой фрезой, что обеспечивает перспективы модернизации фрезерных станков под технологический процесс сварки трением, перемешиванием.

В зависимости от технологической схемы, конструктивных особенностей инструмента и дополнительных специфических возможностей сварка трением перемешиванием также имеет свои разновидности, пример такой классификации приведен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Классификация сварки трением с перемешиванием

### 1.1.3 Базовая схема сварки трением с перемешиванием

*Сварка трением перемешиванием* (СТП) (FSW – *friction stir welding*) является одним из новейших способов сварки. Она выполняется торцом вращающегося инструмента, перемещающегося в направлении сварки. Диаметр инструмента выбирается несколько меньшим, чем глубина сварки. Рабочая поверхность инструмента имеет специальный профиль.

Суть технологии заключается в том, что твердосплавный инструмент, вращаясь с высокой скоростью, внедряется на стыке двух деталей, генерирует тепло, входя на требуемую глубину, пластифицирует их, и передвигаясь вдоль стыка

сваривает детали. Пластифицированный тепловыделением металл за счет сил трения закручивается относительно оси вращения инструмента. В процессе перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходит перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва.

СТП является процессом соединения материалов в твёрдом состоянии, при котором вращающийся инструмент, конструктивно состоящий из плоского или профилированного основания (бурта) и расположенного на нём наконечника определенной формы, перемещается в направлении сварки (рисунок 1.5).

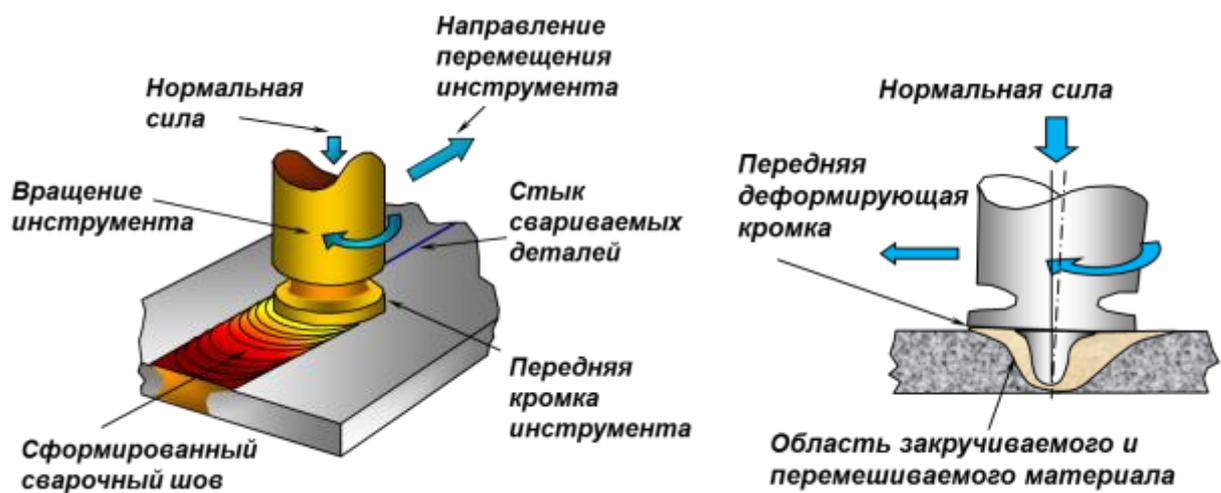


Рисунок 1.5 – Базовая схема перемешивающей сварки трением

Диаметр инструмента выбирается несколько меньшим, чем глубина сварки. Рабочая поверхность инструмента имеет специальный профиль.

Трение инструмента о поверхность деталей, вызывает тепловыделение, которое совместно с силовым воздействием обеспечивает пластическую деформацию и сложное течение пластифицированного металла, перемешиваемого и переносимого профилированным наконечником.

В процессе перемещения инструмента по стыку свариваемых поверхностей происходит перемешивание и перенос металла с формированием сварного шва. При этом шов имеет исключительно высокие механические свойства, отсутствуют внутренние окисления и минимальные коробления.

## 1.2 Анализ теоретических исследований в области свариваемости авиационных материалов

Идея сварки трением родилась в СССР в 1965 г. Принадлежит она Ю.В. Клименко, которому было выдано авторское свидетельство на «Способ сварки трением» [А.С. СССР 1195846, Кл. МПК В 23 К.] [10]. За рубежом метод получения сварных соединений, получивший название «сварка трением с перемешиванием» (СТП) был реализован Британским институтом сварки (TWI, Cambridge, United Kingdom) в 1991 г. [US Pat. No 5 460 317] [120].

Проблемам физико-технического обоснования и технологической отработки СТП конструкций из различных материалов посвящено значительное количество исследований в нашей стране и за рубежом.

Теоретические основы сварки трением перемешиванием заложены в исследованиях, проведенных R.S. Mishra [114, 115], C.J. Dawes, W.M. Thomas [120-122]. Работы посвящены исследованию механизмов формирования сварных швов, микроструктуре и их влиянию на механические свойства соединения. При этом внимание уделяется сварке алюминиевых сплавов. Особо отмечается, что практическая экспериментальная отработка технологий намного опережает фундаментальные исследования, моделирование и аналитическое прогнозирование в данной области.

Так экспериментальной отработке геометрических размеров рабочих поверхностей инструментов для соединения алюминиевых сплавов, установлению диапазонов изменения параметров процесса, обеспечивающие получение бездефектных сварных соединений посвящены работы ученых Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины А. Я. Ищенко, А. Г. Покляцкого и др. [29, 73-75] Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в котором обеспечивается качественное формирование швов тонколистовых алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, 1460, АМг5М, 1201 и АМг6М.

Отработке технологических схем сварки пространственных авиационных и ракетно-космических конструкций посвящены работы ученых ОАО «Националь-

ный институт авиационных технологий», ГКНПЦ имени М.В.Хруничева, ФГУП «ТЕХНОМАШ». В исследованиях ученых О.С. Сироткина, М.М. Штрикмана (ОАО «НИАТ»), В.А. Половцева, Н.В. Макарова, Г.В. Шилло (ГКНПЦ им. М. В. Хруничева), Е. С. Милехина, А.Н. Короткова (ФГУП «ТЕХНОМАШ») предложены технологические схемы и конструкция инструмента для фрикционной сварки алюминиевых твердых сплавов [63-66, 76]. В работах М.М. Штрикмана, В.Н. Егорова, Н. М. Кащука [57, 66, 89-93], описана технологическая схема фрикционной сварки для соединения длинномерных конструкций авиационной техники из несвариваемых плавлением алюминиевых сплавов, предложен способ комбинированной фрикционной сварки, обозначена проблема получения качественного корневого шва.

Исследования ученых Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ») В.И. Лукина, Е.Н. Иода, В.В. Овчинникова, В.И. Кулика и др. [53-56, 67] посвящены сварка трением перемешиванием высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469. Установлено, что при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов возможно возникновение дефектов в виде несплошностей, расслоений, рыхлот, «слипания», а также специфического «тоннельного» дефекта, большинство из которых связаны с параметрами режима сварки и гарантированно выявляются методом рентгенографического контроля.

В работах ученых ОАО «ВНИИАЛМАЗ» А.Г. Бойцова, В.В. Качко, А.В. Плешакова [28, 68-70] предложены оригинальные конструкции инструмента для сварки трением перемешиванием, предложены технологические решения по модернизации оборудования в целях сварки трением перемешиванием. Особенности формирования соединения алюминиевых сплавов Д16АТ, Д16АМ, АМг6 методом сварки трением с перемешиванием отражены в работе А.Г. Бойцова, А.В. Люшинского (ОАО РПКБ) [22], где приведены основные параметры режимов сварки: скорости вращения инструмента и скорости перемещения относительно свариваемых деталей, исследованы микроструктуры соединений и их свойства. Исследования показывают существенные преимущества метода.

Одним из успешных примеров реализации сварки трением в области авиационного двигателестроения является совместный проект УГАТУ, Уфимского моторостроительного производственного объединения (УМПО) и их партнерами НПП «Мотор» и ИНТ НП «Технопарк авиационных технологий». Проект включает разработку и внедрение промышленных комплексов, в частности, для линейной сварки трением с целью получения облегченных неразъемных высокопрочных конструкций, таких как моноколеса (блиски) ГТД. Коллектив авторов А. Ю. Медведев, В. М. Бычков, А. С. Селиванов, С. П. Павличич, С. Х. Даутов, А. В. Супов по результатам исследования свариваемости сплавов ВТ6 и ВТ8-1 между собой с помощью линейной сварки трением освоили технологию соединения отдельно изготовленных лопаток и диска с применением процесса линейной сварки трением [11, 23, 58, 59]. Авторами проведено исследование строения и свойств сварных соединений двухфазных титановых сплавов. Исследовано влияние параметров режима сварки на свойства сварных соединений, отработаны методики разрушающего и неразрушающего контроля качества. Необходимостью данной технологии является использование зарубежного оборудования. Линейная сварка трением используется ведущими мировыми компаниями, выпускающими авиационные двигатели и осуществляющими сварку турбинных лопаток к дискам.

Опыт сварки трением крупногабаритных пространственных крупногабаритных конструкций из алюминиевых сплавов автомобильных цистерн реализован в ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» с применением оборудования шведской фирмы ESAB. В результате проведения пуско-наладочных работ наладчики фирмы ESAB добились удовлетворительных результатов при сварке линейных швов. Скорость сварки составляла 50 см/мин. При выполнении кольцевых швов возникли значительные трудности, причина которых – недостаточная сила трения между подложкой и свариваемыми обечайками, что приводит к их раздвиганию при внедрении инструмента, избежать которого не удастся даже с помощью прихваток, выполненных электродуговой сваркой. Благодаря доработке серийного оборудования (В. А. Бакшаев, П. А. Васильев, Л. К. Гордон, Ю. А. Тодин, С. В. Васильев и др. [12-15]) частично удалось решить проблему расхождения

кромки обечайки с помощью дополнительной подложки. Исследования позволили выделить ключевое требование к оборудованию и технологическому процессу сварки крупногабаритных конструкций: жесткость несущих элементов конструкции прижимного устройства.

Как показал опыт сварки емкостей с кольцевыми швами, использование очень сложной оснастки приводит к тому, что трудоёмкость сборки под сварку превышает трудоёмкость сборки аналогичной емкости при дуговой сварке.

В работах коллектива авторов В. Е. Рубцова, С.Ю. Тарасова, Е.А. Колубаева (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Национальный исследовательский Томский политехнический университет) исследованы возможности различных методов неразрушающей дефектоскопии для швов, полученных методом сварки трением с перемешиванием на алюминиевых сплавах, где выявляются дефекты в виде несплошностей, пор, стыковых линий [81, 82, 85]. Методом радиографического контроля были исследованы типы инородных включений, образующиеся при сварке трением с перемешиванием. Показано, что существующие включения могут возникать за счет адгезионного и диффузионного изнашивания инструмента, либо за счет контакта инструмента с подложкой. Представлены результаты экспериментального исследования влияния режимов обработки на дефектность сварных швов, полученных методом сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5М.

Лабораторные исследования возможностей сварки трением титановых и жаропрочных сплавов проводятся научно-исследовательскими коллективами совместно с предприятиями авиационного двигателестроения.

Работы коллектива авторов Украины А.Г. Селиверстова (ОАО «Мотор Сич»), В.И. Брагинец, И.В. Зяхор (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины) и др. [84] посвящены оптимизации режима сварки сплава ВТЗ-1, исходя из возможности ее реализации на современном оборудовании для линейной сварки трением (ЛСТ) применительно к изготовлению и ремонту моноколес ГТД, так называемых блисков. Установлено, что показатели прочности соединений превышают соответствующие показатели для основного металла сплава ВТЗ-1, что объясняется ин-

тенсивной термомеханической деформацией при температурах, превышающих температуру  $\beta$ -перехода сплава ВТЗ-1 и быстрым охлаждением. Металл в зоне соединения имеет мелкозернистую динамически рекристаллизованную структуру и повышенную твердость.

Анализ отечественного и зарубежного опыта исследований сварки трением перемешиванием титановых и жаропрочных сталей показывают отсутствие широкого успеха в промышленном применении технологии. Так исследования научного центра China FSW Centre в области сварки трением перемешиванием гидрогенизированных титановых сплавов показывают сложность поддержания температурного режима и недостаточную повторяемость процесса. В работе авторов K.V. Jata и A. P. Reynolds [109], посвященной исследованию фазовых превращений в зоне сварного соединения титанового сплава, отмечается высокий уровень остаточных напряжений в конструкции. Проблемам поиска новых конструкций инструмента посвящены работы G. Buffa, L. Fratini and F. Micari (Mechanical Engineering University of Palermo, Italy) [97]. Ведутся работы по моделированию физико-механических процессов [103, 110, 117], анализу прочности и возникновения дефектов [116, 119].

Следует отметить, что сварка трением титана и коррозионностойких сталей в настоящее время находится в начальной стадии лабораторных исследований, направленных на поиск износостойких инструментальных материалов и форм, на разработку специального технологического оснащения.

Анализ, проведенный коллективом авторов с участием В.А. Фролова (МАТИ имени К.Э. Циолковского), А.Н. Сабанцева, С.А. Диденко (ГКНПЦ имени М.В. Хруничева), В.Ю. Конкевича и В.В. Белоцерковцева (ВИЛС) [77, 87, 88], показал, что процесс сварки трением, обладая как преимуществами, так и технологическими трудностями, остается интересным для исследований в области свариваемости материалов, а также в области поиска эффективных конструкций рабочей части инструмента. Процессы формирования ядра являются чрезвычайно тонкими, чувствительными к изменению параметров сварки. Они не носят уни-

версального характера и для каждой группы сплавов могут иметь место свои особенности и закономерности.

В областях авиации и ракетостроения СТП нашла применение за счёт снижения веса конструкций, лучших механических характеристик сварных соединений, по сравнению с заклёпочными. Несмотря на то, что изначально эта технология предназначалась для соединения деталей из алюминиевых сплавов, она распространяется на множество других материалов, включая стали, титановые сплавы, полимеры. Такая технология считается более рентабельной по сравнению с традиционными методами соединения. Проведённые исследования показали возможность экономии значительного количества материала и в дальнейшем снижения стоимости механической обработки.

TWI (Технологический институт сварки, Великобритания) является ведущей зарубежной организацией по исследованию новых областей применения сварки трением. В середине 90-х годов было создано промышленное оборудование, которое было использовано для промышленного производства изделий космического назначения, в судостроении, транспортном машиностроении.

ESAB совместно с научно-исследовательскими центрами провели широкие исследования по сварке деформируемых алюминиевых сплавов [100, 102, 106]. Обычная скорость сварки этих сплавов в промышленности - 0,8-2,0 м/мин (при толщине изделий 5 мм). Поскольку алюминиевые сплавы применяются после соответствующей термообработки, проводимой для получения более высоких показателей механической прочности (состояние Т6), то проблемой явилось падение твердости при сварке. В данном случае одним из перспективных решений видится увеличение скорости сварки.

### 1.3 Конструкторско-технологические решения при создании изделий авиационной и ракетно-космической техники

#### 1.3.1 Технологические решения в авиастроении

Технология сварки перемешиванием активно используется в авиастроении в производстве коммерческих и военных воздушных судов.

Lockheed Martin разработала программу, по которой произвели замену заклёпочных соединений на процесс СТП для военно-транспортного самолёта C-130J (рисунок 1.6). В авиастроении FSW был впервые применён в коммерческих целях для Boeing C-17 Globemaster III и Boeing 747 Large Cargo Freighter. Компания Boeing отработала технологию изготовления силовых конструкций пола, используемого в тяжёлой транспортной авиации (рисунок 1.7) и для поддерживающих перекладин в грузовом отсеке воздушных грузовых судов Boeing 747 и 777 (рисунок 1.8).

Подразделение компании Boeing (США) применяет этот вид сварки для тонких соединений встык, внахлест и Т-образных соединений, а также толстых стыковых. В производстве сложных деталей авиатехники также существует большая потребность в сварке на изогнутых участках. Компания Boeing продемонстрировала криволинейную сварку перемешиванием сложной створки шасси самолета, а также многослойных элементов со свариванием Т-образных соединений. Самолет-истребитель, на котором применялся этот вид сварки, уже прошел успешные полетные испытания.

Высокое качество соединений обеспечено при использовании СТП на самолете Airbus A350 и двух новых версиях A340 (A340 – 500 и A340 – 600) [96 Arbegast W.J.]. Airbus использует СТП в производстве самолётов A340-600. Элементы Аэробуса A400М также сварены с применением метода FSW. Перемешивающая сварка трением применялась при выполнении соединений в нижней части фюзеляжа (рисунок 1.9).



Рисунок 1.6 – Военно-транспортный самолёт C-130J (HERCULES)

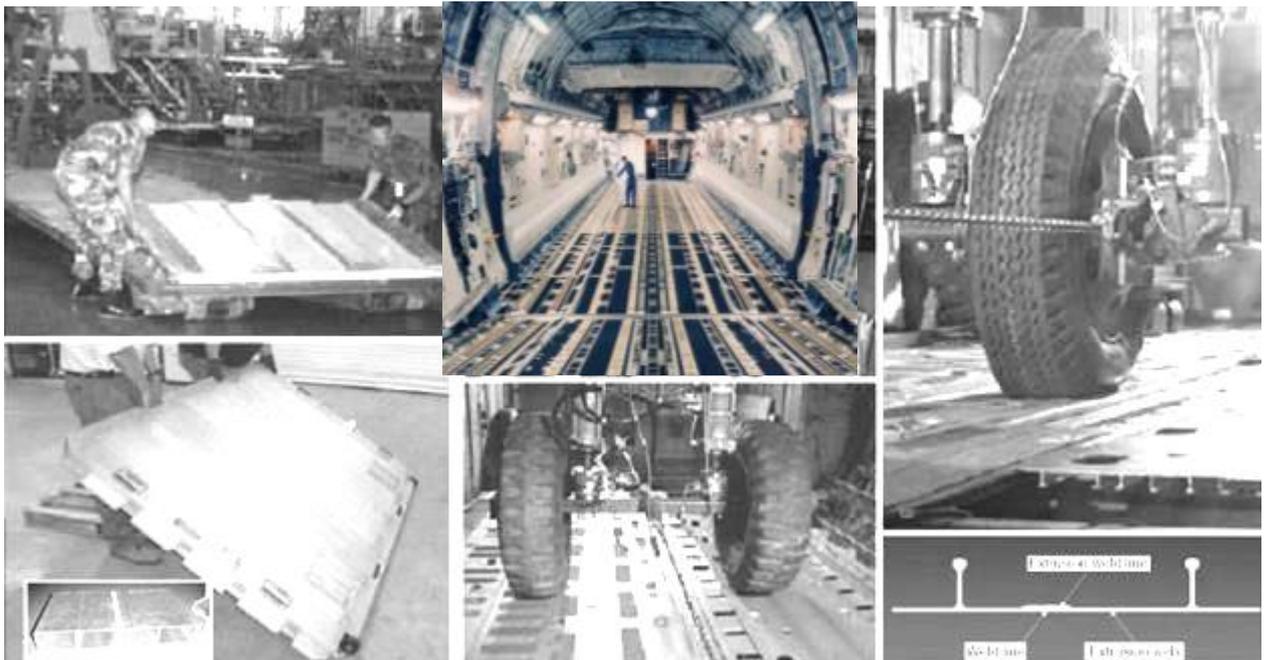


Рисунок 1.7 – Элементы самолета, изготовленные с использованием технологии СТП. С-17 грузовая рампа (вверху слева) и направляющий поддон (внизу слева). С-130 грузовой пол (справа)

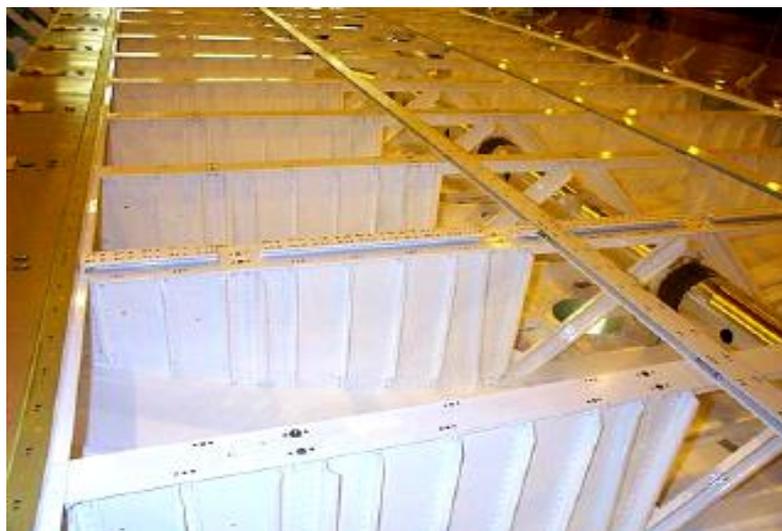


Рисунок 1.8 – Применение перемешивающей сварки трением в грузовых отсеках воздушных грузовых судов Boeing 747 и 777



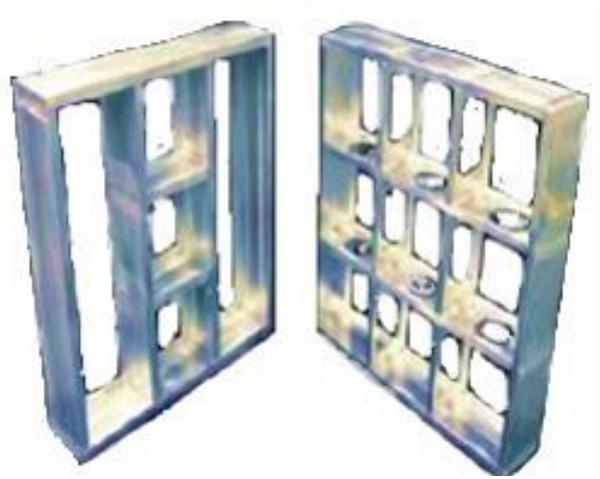
а)



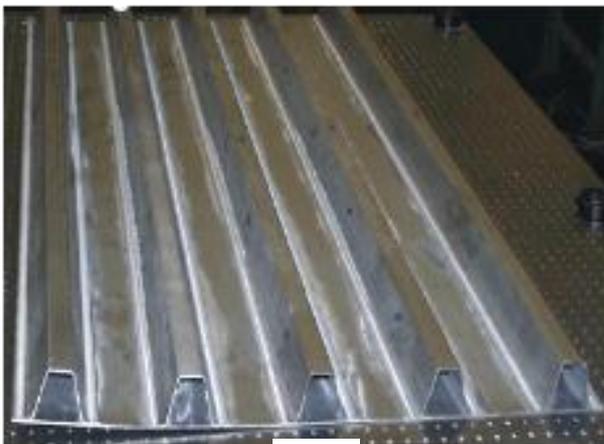
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.9 – Элементы конструкций самолетов (А-380), полученные с использованием перемешивающей сварки трением в Airbus Integrated Company: а), б) панели, полученные сваркой трением; в) нервюра; г) элементы конструкции крыла; д) панель пола; е) ремонт поврежденного участка

Корпорация Eclipse Aviation Corporation (США) приняла решение использовать сварку перемешиванием вместо традиционной клепки. Первое применение

данной технологии в производстве самолетов для коммерческой авиации сопровождалось рекордным снижением времени и стоимости сборки воздушных судов. Фирма MTS Systems Corporation по заказу Eclipse Aviation разработала и изготовила специальное технологическое оборудование и оснастку для СТП элементов конструкции самолёта бизнес-класса Eclipse 500 (рисунки 1.10 и 1.11). Оборудование способно сваривать элементы с различной геометрией при помощи сменных приспособлений, расположенных под многоосной головкой СТП и подвижных рамок.



Рисунок 1.10 – Eclipse 500 самолёт бизнес-класса (слева).

Внутренние продольные и кольцевые алюминиевые ребра жесткости (шпангоуты и лонжероны) (в правом верхнем углу), окна и двери (внизу справа) прикрепляются к алюминиевой части фюзеляжа внахлест СТП



Рисунок 1.11 – Оборудование СТП используемое при сборке самолёта Eclipse 500, изготовленное MTS Systems Corporation

В производство Eclipse-500 фирма Eclipse Aviation инвестировала примерно 20 млн. \$, треть из которых пошла на установку, остальные средства – на отработку технологии. Применение сварки перемешиванием при изготовлении легкого пассажирского самолета Eclipse 500 позволило отказаться от 7000 единиц заклепок и крепежей. Сварка заменила все связанные с этими процессами операции и привела к значительному росту производительности – в 4 раза по сравнению с автоматизированной клепкой и в 20 раз – по сравнению с ручной. В самолётах Eclipse 500, производимых в США, было заменено 60% заклёпок, благодаря применению перемешивающей сварки трением.

Применение сварки трения в производстве Eclipse 500 позволило сократить время сборки на 80% по сравнению с заклёпочными соединениями. Кроме того, по сравнению с клепкой повысилась (до 3 раз) прочность соединений, а также улучшились характеристики их усталостной прочности. Тестирование полноразмерного, сваренного перемешиванием полого цилиндра, имитирующего фюзеляж самолета, показало, что усталостная стойкость такого фюзеляжа превысит срок службы самого самолета в несколько раз. Согласно руководству по эксплуатации Eclipse 500 самолету гарантируется минимальный срок службы 10 000 часов или 10 лет, в зависимости от того, что наступит раньше. Компания Eclipse Aviation завершает сертификацию реактивного самолета бизнес класса Eclipse 500 с узлами, изготовленными методом СТП.

О работах по СТП оребренных панелей для крыла самолета из сплавов 2024, 7475, 7050 толщиной 4 мм сообщается в статье [111 Kumagai M.].

В 2000 г. Air Force Metals Affordability Initiative создала консорциум промышленности и технических университетов для развития СТП в оборонной промышленности. Основными задачами данного консорциума являлись: отработка технологии СТП для изготовления элементов конструкций из алюминиевых сплавов; отработка технологии СТП для окончательной сборки конструкций; отработка технологии СТП жаропрочных материалов.

Институт сварки TWI (Великобритания) совместно с компанией Boeing осуществляет разработки в области линейной сварки трением с демонстрацией её

возможностей для производства заготовок по форме изделия из титановых сплавов [105].

Технология СТП позволяет произвести замену заклёпочных соединений шпангоутов, лонжеронов с обшивкой, а также силовых элементов оконных проёмов и дверей самолёта с фюзеляжем. Применение СТП устраняет необходимость использования тысяч заклёпок и приводит к повышению качества, прочности и веса деталей и соединений, а также снижению стоимости сборки.

Фирмы Edison Welding Institute и General Electric разработали специальный высокотемпературный инструмент для сварки стали, титана и др. сплавов, используемых в производстве авиационных двигателей.

Наиболее успешно данный метод применяется на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» (В.А. Бакшаев, П.А. Васильев, В.П. Трифонов) [12-15], где метод СТП используется при изготовлении крупногабаритных автомобильных цистерн из алюминиевого сплава. Оболочки алюминиевых цистерн изготавливают сваркой трением с перемешиванием с помощью станции, изготовленной компанией ESAB по техническому заданию предприятия.

Разработке технологии сварки трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461, В-1469 посвящены исследования, проводимые ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (В.И. Лукин, Е.Н. Иода, О.Г. Оспенникова и др.) [54-56]. На ОАО «ВИЛС» ведутся работы по созданию литосварных конструкций из сплавов системы AL-MG-SC с использованием сварки трением с перемешиванием, соединения магниевых сплавов (авторы Предко П.Ю., Фролов В.А., Конкевич В.Ю.) [77, 87, 88]. В Пермском национальном исследовательском политехническом [33] и Донском государственном техническом университетах [34] проводятся работы по освоению и внедрению в промышленности метода СТП.

Внедрение «критического» для создания авиадвигателя 5 поколения технологического процесса линейной сварки трением блисковых конструкций из алюминиевых сплавов осуществляет коллектив ФГБОУ ВПО «УГАТУ» под руководством В.М. Бычкова, А.Ю. Медведева совместно ПАО «УМПО» [11, 23, 58, 59].

Основными патентообладателями и заявителями технических решений в данной области техники в Российской Федерации являются:

- ФГУП «ГК НПО имени М. В. Хруничева»;
- АО «Национальный институт авиационных технологий» (ОАО «НИАТ»);
- ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ»;
- ГНЦ ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей»;
- АО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента» (АО «ВНИИАЛМАЗ»);
- ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).

### 1.3.2 Технологические решения в ракетно-космической технике

Авиационно-космической промышленностью США с помощью сварки перемешиванием изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов крупные отсеки для спутников. Первая ракета с отсеком-модулем, расположенным между ступенями и сваренным таким методом, была успешно запущена в августе 1999 года. Примером успешного применения сварки трением в ракетостроении является ракета Delta фирмы Boeing (рисунок 1.12).

Компания «Boeing» начала использовать сварку трением с перемешиванием при производстве ракеты «Delta» II и III [107, Imuta M.]. Сварка выполняется на топливном баке длиной 8,4 м, на баке для жидкого кислорода длиной 12 м и на других конструкциях. Сварка трением с перемешиванием обеспечивает повышение качества (один дефект на 76,2 м шва) по сравнению с аргодуговой сваркой (один дефект на 8,4 м шва). При СТП уменьшается время изготовления сварной конструкции. Производство ракет «Delta» II выросло с 8 до 17 единиц в год. Переход от заклёпок на перемешивающую сварку трением топливных резервуаров позволил достичь сокращения издержек на 60%, а времени производства от 23 до 6 дней при увеличении качества сварного шва на 50%.

Процесс FSW был также применён для сварки внешнего резервуара Шаттла, для Ares I и для стендового образца Orion Crew Vehicle в NASA и для ракет от Falcon 1 до Falcon 9 в SpaceX. На одном из предприятий SpaceX при производстве

резервуара ракеты-носителя Falcon 9 из алюминий-литиевого сплава все продольные и круговые швы были сделаны с использованием FSW (рисунок 1.13). При этом полностью исключается формирование водородных пузырей.



Рисунок 1.12 – Ракета Delta фирмы Boeing



Рисунок 1.13 – Бак ракеты-носителя Falcon 9 из алюминий-литиевого сплава: сварка трением всех продольных и круговых швов

Фирмы Lockheed Martin и NASA MSFC совместно разработали СТП продольных швов внешних баков жидкого кислорода и водорода, состоящие из листов алюминий-литиевого сплава 2195, для космического корабля (рисунок 1.14).



а)



б)

Рисунок 1.14 – Процесс СТП на Marshall Space Flight Center (MSFC): а) сегмент внешнего бака Space Shuttle диаметром 8,2 м из Al-Li сплава 2195; б) полномасштабное изображение бака

Кроме этого есть ещё примеры применение сварки трением в производстве топливных баков Space Shuttle, Boeing, ракеты-носителя Н-ПВ японского космического агентства JAXA и др. (рисунки 1.15 – 1.17).



Рисунок 1.15 – Перемешивающая сварка трением на фирме Boeing: сегмент топливного бака



Рисунок 1.16 – Перемешивающая сварка трением при изготовлении сегментов топливного бака ракеты-носителя Н-ПВ



Рисунок 1.17 – Оболочка диаметром 5,5 м и глубиной 1,6 м из сплава 2195 Al-Li полученная перемешивающей сваркой трением с последующей ротационной вытяжкой (NASA совместно с MT Aerospace)

В NASA активно занимаются изучением процесса СТП в аэрокосмической сфере [101 Ding J.]. В 2001 г. процесс внедрен в производство внешнего бака ракеты носителя для возвращаемых космических кораблей. Технология предусматривает сварку 8 продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и 4 продольных шва на резервуаре для жидкого кислорода. Разрабатывается оборудование для ремонтной сварки трением с перемешиванием в условиях

космического вакуума. Концепция основана на том, что высокая скорость вращения инструмента (30000 об/мин) при СТП позволит уменьшить усилия, необходимые для выполнения сварки.

В последние годы отечественные предприятия (ФГУП «ВИАМ», ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» и др.) выполняли научно-практические работы по данной тематике, имеются положительные результаты и создан определенный научно-технический задел. Разработка и внедрение технологии фрикционной сварки корпусных конструкций новых ракет-носителей из алюминиевых сплавов ведется в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. Предприятием освоен технологический процесс сварки алюминиевых сплавов АМг3 и АМг5 толщиной от 5 до 10 мм.

### 1.3.3 Трансфер технологии сварки трением с перемешиванием в отрасли транспортного машиностроения

В производстве *железнодорожных* подвижных составов все чаще использует технологию перемешивающей сварки благодаря сочетанию экономической эффективности процесса с хорошими эксплуатационным характеристикам получаемых швов (изготовления крупных панелей, полученных сваркой алюминиевых экструдированных профилей Alstom LNB (Германия), японский высокоскоростной поезд (Shinkansen) целые железнодорожные составы собираются из полых экструдированных профилей, соединенных с помощью этой технологии). Последние исследования ударпрочности алюминиевых вагонов наглядно продемонстрировали преимущества использования соединений сваркой перемешиванием, а также перспективность дальнейшего совершенствования и оптимизации этой инновационной технологии. Так пять железнодорожных компаний – Alstom, CAF, Angel Trains, HSBC Rail и «RSSB» объединились в проект EuroStir с целью развить применение сварки перемешиванием в железнодорожной отрасли, выведя эту прогрессивную технологию из лабораторий и внедрив ее в промышленные производственные цеха.

Преимущества сварки перемешиванием стремятся использовать *в автомобилестроении* (Audi R8, Mazda RX8, спортивный автомобиль «Panoz Esperate»). Так, алюминиевый центральный туннель спортивного автомобиля «Ford GT» изготовлен с применением этого метода сварки. Являясь несущим элементом конструкции машины, он повышает жесткость кузова и одновременно используется как топливный бак. Другой пример – компания Tower Automotive (США), производящая алюминиевые элементы подвески для лимузинов Lincoln Town Cars с удлиненной конструкцией. Тяги подвески изготовлены ими из двух профилей сваркой по методу СТП одновременно двумя шпинделями с обеих сторон шва и обладают повышенными усталостными характеристиками [130].

*В судостроении* СТП используется с 1995 г., в частности, при производстве морских паромов, которые должны были отличаться низкой общей массой при одновременном сокращении издержек производства и времени изготовления. Эти требования были выполнены путём изготовления СТП панелей, которые в дальнейшем соединялись СТП в полотна длиной 16 м. В кораблестроении, помимо упомянутых в начале статьи панелей морозильников, сварка перемешиванием широко используется для производства палубных панелей паромов, круизных теплоходов, гражданских и военных и транспортных судов, включая корабли на воздушной подушке, а также боевых кораблей. Эту технологию сварки применяют также для изготовления герметичных вертолетных площадок и жилых строений для буровых платформ шельфовой нефтедобычи.

Сварка перемешиванием в настоящее время используется для изготовления широкого спектра изделий для различных сфер применения (рисунок 1.18). Это катодные рубашки и радиаторы для электротехники, разнообразные корпусные изделия, оборудование для нагрева, вентилирования и кондиционирования воздуха, различные резервуары, панели и компоненты для пищевой промышленности, пеналы для топливных элементов и ядерных отходов и многое другое.



Рисунок 1.18 – Применение СТП в отраслях промышленности

Технология используется не только применительно к алюминию, но также к материалам с более высокой температурой плавления: титану, меди, нержавеющей стали, различным сплавам, а также к соединениям из разнородных материалов. Основными причинами быстрого распространения этой технологии в промышленности является снижение производственных затрат, хорошая повторяемость процесса, обеспечение высокой прочности сварного соединения, превосходные механические свойства швов, а также малая деформация свариваемых материалов.

В настоящее время продолжается научно-исследовательская работа по совершенствованию метода сварки перемешиванием, по сбору данных о механических и коррозионных свойствах, уточнению процедур по сварке стали, титана и других перспективных материалов и, наконец, по выявлению новых сфер применения.

Сварка перемешиванием является сегодня для российской промышленности инновационным методом, который технологически и экономически целесообразно широко использовать.

#### 1.4 Анализ преимуществ и технологических ограничений сварки трением с перемешиванием

*Базовые цели использование перемешивающей сварки трением* в производстве авиакосмической техники: повышение прочностных свойств и надежности сварных соединений, снижение веса авиационных и ракетно-космических систем, сокращение производственного цикла, снижение затрат.

В областях авиации и ракетостроения СТП нашла применение за счёт снижения веса конструкций, лучших механических характеристик сварных соединений, по сравнению с заклёпочными.

Расширяющееся применение СТП обусловлено высоким качеством получаемых сварных соединений. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе в условиях «теплой» деформации создает микроструктуры более прочные, чем основной материал.

Обычно, прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90% от этих характеристик для основного материала, на уровне, обеспечиваемом применением дорогостоящих электронно-лучевой, диффузионной и лазерной сварок.

СТП может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу-вверх и т.д.), поскольку силы гравитации, в данном случае, не играют роли. Обеспечивается возможность сваривания разнородных материалов, термопластичных пластиков и композиционных материалов. При выполнении сварочных операций не требуется предварительной очистки рабочих поверхностей, отсутствует разбрызгивание расплавленного металла, нет необходимости в присадочных материалах.

Немаловажен тот факт, что при наличии специальной оснастки и инструмента сварка трением может выполняться на обычном металлорежущем оборудовании универсальных фрезерных станках и станках с ЧПУ, а также с использованием робототехнических систем.

СТП имеет широкие технологические возможности для получения неразъемных соединений деталей узлов авиационной и ракетной техники в качестве аль-

тернативы заклепочным соединениям, контактной, шовной электродуговой, электроннолучевой и лазерной сваркам, обеспечивает возможность сварки разнородных материалов [130, 131]. Для сварки не требуется источник электрического питания, сварочных электродов, флюса, газов. Не выделяются вредные аэрозоли, которые сопутствуют сварочным процессам. Этим видом сварки можно сваривать алюминиевые сплавы, медь и другие цветные сплавы, а также возможно сваривать разнородные металлы, такие как Al с Cu, Cu со сталью и другие. А также такие металлы, которые электро- или газосваркой сваривать невозможно.

Необходимо отметить следующие ключевые преимущества СТП:

*Металлургические и производственные:*

- сварка в твердой фазе без плавления;
- высокие прочностные свойства сварного шва;
- практически полное отсутствие короблений и термических деформаций;
- высокая размерная стабильность и воспроизводимость процесса;
- отсутствует «выгорание» легирующих элементов;
- мелкозернистая рекристаллизованная структура сварного шва;
- отсутствие пористости;
- отсутствие усадочных трещин;
- высокая скорость сварки;
- не требуется присадочных материалов;
- не требуется подготовки кромок под сварку;
- нет необходимости в механической обработке после сварки;
- не требуется дополнительная термическая обработка шва;
- широкая номенклатура свариваемых материалов;
- швы большой глубины и длины;
- простота автоматизации и наблюдения параметров процесса;
- уменьшение производственного цикла на 50...75% по сравнению с обычными способами сварки, например, дуговой.

*Энергетические и экономические:*

- низкое потребление энергии (2,5% от энергии, потребляемой при лазерной сварке, 10% от энергии, потребляемой при дуговой сварке);

- снижение веса конструкций;
- быстрая окупаемость, обусловленная низким потреблением энергии и отсутствием расходных материалов;
- уменьшение производственного цикла на 50...75% по сравнению с обычными способами сварки, например, дуговой;
- не требуется специальной разделки кромок под сварку.

*Экологические:*

- не требуются защитные газовые среды;
- минимальные требования к очистке свариваемых поверхностей;
- не требуется флюсов;
- отсутствует выделение вредных веществ, отсутствует излучение от дуги.

Сварка трением, при прочих равных условиях, по сравнению с традиционными процессами дуговой и контактной сварки имеет в 2...5 раз меньшее энергопотребление. Эти факторы обуславливают то, что применение сварки трением ежегодно возрастает на 15...20%.

При СТП достигается высокое качество сварки. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе иногда создает микроструктуры более прочные, чем основной материал. Обычно, прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90% от этих характеристик для основного материала. Сварка может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу-вверх и т.д.), поскольку силы гравитации, в данном случае, не играют никакой роли. Перемещение инструмента или детали может производиться в различных направлениях и по программе.

Систематизация технологических рекомендаций, исследование физических закономерностей процесса, отработка режимов и условий проведения операции применительно к различным материалам и конфигурации конструкций является актуальным на современном этапе развития наукоемкой техники и технологии.

Несмотря на кажущуюся простоту, процесс СТП в действительности сложен. В нем взаимодействуют такие явления, как тепловыделение при трении, образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями

инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения, быстрый нагрев и охлаждение объемов металла при больших давлениях, пластическая деформация, деформационное упрочнение и рекристаллизация металла и др.

Процессы перемешивающей сварки трением мало изучены. Однако выполненные исследования позволяют представить качественную картину явлений, происходящих при сварке.

Использование СТП позволяет получать оптимальные механические характеристики сварного шва, сопоставимые с механическими характеристиками свариваемых деталей.

Возможность сварки практически всех металлов с температурой плавления до 1800 °С, а также возможность соединения деталей из различных металлов, сварка которых невозможна любым другим методом сварки.

*Основными факторами, ограничивающими применение СТП, в настоящее время являются:*

- необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей;
- возникновение отверстий в начале и конце шва;
- необходимость проектирования и изготовления специальных высокотвердых инструментов сложной формы;
- невозможность сварки материалов, имеющих низкую пластичность, даже при высоких температурах, или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

Некоторые из этих ограничений могут быть устранены использованием специальных приемов сварки. Имеется ряд важных технологических и конструкторских проблем, которые требуется решить. Они касаются создания специального инструмента из твердых и теплостойких материалов для перемешивающей и точечной сварки трением металлов и сплавов с высокой температурой плавления, эффективных конструкций оборудования и оснастки, обеспечивающих гибкость процесса сварки.

## Выводы по главе 1

1. Выполнен анализ технологических возможностей и современных достижений в области технологии формирования неразъемных соединений авиационных и ракетно-космических конструкций как в отечественной, так и зарубежной практике.

2. Установлены преимущества и технологические ограничения, препятствующие расширению применения метода сварки трением применительно к жаропрочным и жаростойким сплавам, применяемым в производстве двигателей летательных аппаратов, что определяет актуальность исследований.

3. Основными проблемами, ограничивающими применение СТП и требующими решения, в настоящее время являются: проблемы жесткости технологической системы; необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов с повышенной стойкостью; ограниченная свариваемость материалов, имеющих низкую пластичность или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

4. Объективно отсутствуют модели и методики, позволяющие 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 инструмент и заготовку и др.

5. Предметом исследований являются явления, происходящие при сварке, такие как тепловыделение при трении, образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения.

## 2 Исследование влияния технологических режимов сварки трением перемешиванием на качество получаемых соединений

### 2.1 Методическое обеспечение исследований

#### 2.1.1 Методика теоретических и экспериментальных исследований

Патентные исследования выполнены в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

Отработка и оптимизация технологических режимов сварки трением выполнялись на модернизированном и специально оснащённом вертикально фрезерном станке 6P12. Крепления образцов для сварки выполнялось в специально спроектированном и изготовленном приспособлении АЛНФ.301313.000.01СБ. Для надёжного крепления инструмента в шпинделе станка мод.6P13 использовалась специальная оснастка, включающая цанговый патрон ER-32 ГОСТ 26539-85, крепящийся к шпиндельному узлу станка через переходную втулку. В качестве вспомогательного оборудования для подачи аргона ГОСТ 10157-79 в зону ФС были использованы: баллон газовый ГОСТ 9731-79; регулятор расхода газа AP-40-КР1 ГОСТ 13861-89 предназначенный для понижения и регулирования давления газа, поступающего из баллона, и автоматического поддержания постоянным заданного расхода; газовый шланг ГОСТ 9356-75.

Шероховатость поверхностей после СТП, измерялась на профилометре-профилографе мод.252. Локальные дефекты оценивались с помощью металлографического микроскопа ММР-2Р. Металлографический анализ выполнялся на микроскопе ММР-2Р. Топография поверхностей после сварки трением изучалась с помощью микроскопа МБС-9 и посредством растровой электронной микроскопии (РЭМ). Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 945076, метод определения твердости по Бринеллю [7]. Определение величины остаточных напряжений производилось рентгеновским способом по методике  $\sin^2\psi$  основанной на измерении деформации кристаллической решетки исследуемого объекта по смещению линий дифракционного спектра. Испытания на прочность сварных

швов выполнялись на разрывной машине P0,5 и технологическими испытаниями на изгиб [6].

Определение температурных полей осуществлялось на специальной установке ФС с применением пирометров «Проминь» и «ОПИР-017».

Результаты экспериментов обрабатывались по ГОСТ 11004-74 с использованием математического обеспечения ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях Испытательного центра «ВНИИАЛМАЗ» [128] с использованием аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры. Результаты экспериментов обрабатывались по ГОСТ 11004-74 с использованием математического обеспечения ЭВМ.

Разработка критериев технологического аудита и оценка приоритетов инновационного производства проведена согласно нормам государственной политики в области развития науки и технологии, авиационной промышленности, космической деятельности [1-4, 60]. Работы по организации технологической экспертизы проводились в соответствии с ГОСТ 23554.1-79 «Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции» [5], руководством СТП 11313707 - 03.001 - 93 «Типовой технологический процесс экспертизы (ТПЭ). Основные положения» [9] и нормами стандарта ISO 9000:2005 [95].

#### 2.1.2 Методика отработки технологического обеспечения сварки трением перемешиванием для аэрокосмических конструкций

Основной метод исследования – экспериментальный, включающий анализ состояния инструмента в процессе сварки, анализ качества сварных соединений, сравнение результатов экспериментов.

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 2.1.

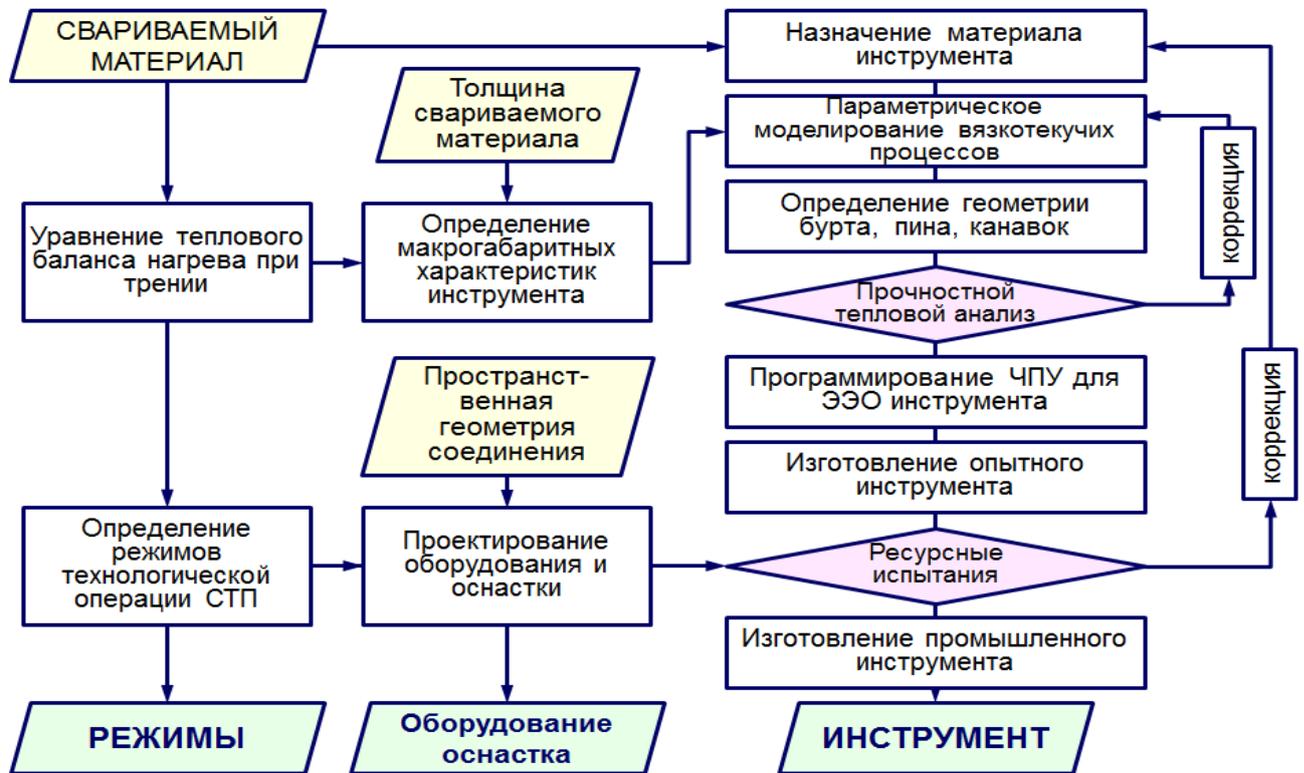


Рисунок 2.1 – Методика отработки технологического обеспечения сварки трением с перемешиванием для аэрокосмических конструкций

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.

На основе численного моделирования теплового баланса прогнозируются эффективные режимы высокоскоростной обработки. На основе моделирования процессов вязкотекучести и неразрывности производился поиск наилучших решений в области геометрии сложнопрофильного инструмента. При разработке параметрических моделей использовались методы табличной, иерархической, вариационной и геометрической параметризации.

## 2.2 Формирование сварного шва в процессах сварки трением с перемешиванием

### 2.2.1 Схема формирования сварного шва

СТП является процессом соединения материалов в твердой фазе, при котором специальный вращающийся инструмент, конструктивно состоящий из плоского или профилированного основания (бурта) и расположенного на нём наконечника в виде штыря (пина), изготавливаемого с различным профилем, двигается вдоль поверхностей стыков двух твердых деталей (рисунок 2.2).

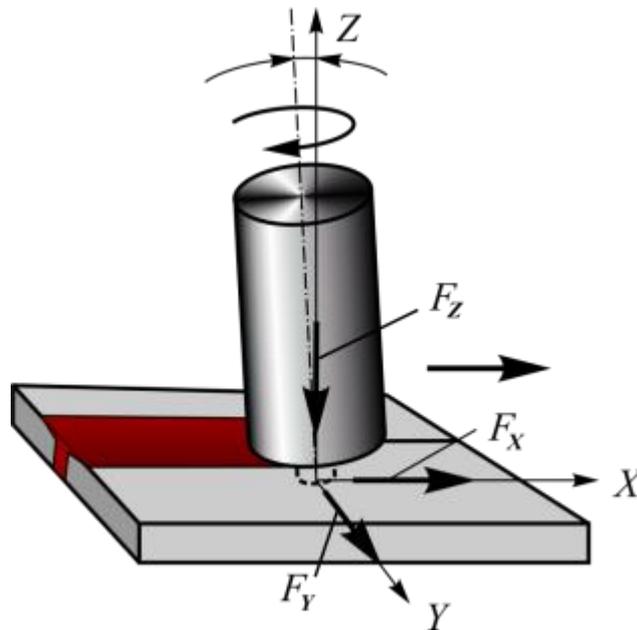


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема сварки трением с перемешиванием

Бурт входит в соприкосновение с верхней стороной соединяемых деталей с некоторым давлением. Трение бурта о поверхность деталей, вызывает тепловыделение, за счёт которого материал размягчается. Давления бурта инструмента на соединяемые детали, в зоне стыка деталей вызывает сильную пластическую деформацию и течение пластифицированного металла, перемешиваемого профилированным наконечником.

При СТП формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала перенесенного выступом инструмента, зону термопластической деформации и зону термического влияния.

Схема формирования сварного шва при перемешивающей сварки трением с указанием типичных зон влияния представлены на рисунке 2.3.

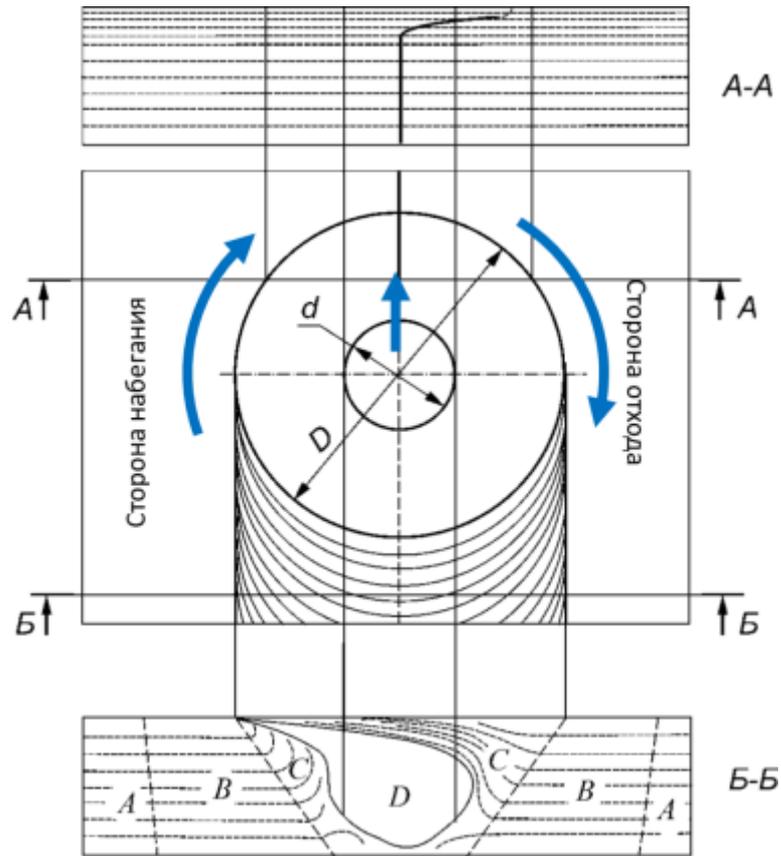


Рисунок 2.3 – Формирование шва при СТП с указанием зон в его сечении: А – основной материал; В – зона термического влияния; С – зона термомеханического (термомеханического) воздействия; D – зона перемешивания

Внешний вид сварного шва представлен на рисунке 2.4. Типичное поперечное сечение соединения и характерная микроструктура поперечного сечения шва, полученного СТП, показаны на рисунке 2.5. [100, 118, 120-122].

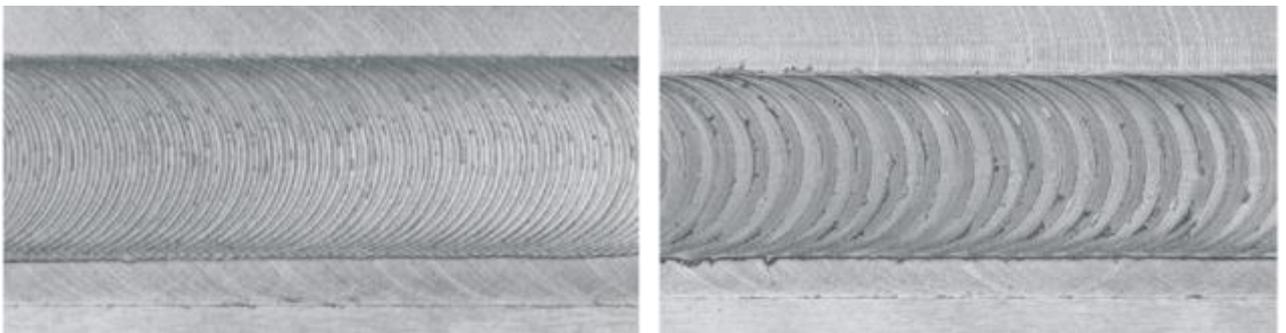


Рисунок 2.4 – Внешний вид сварного шва (вид сверху)

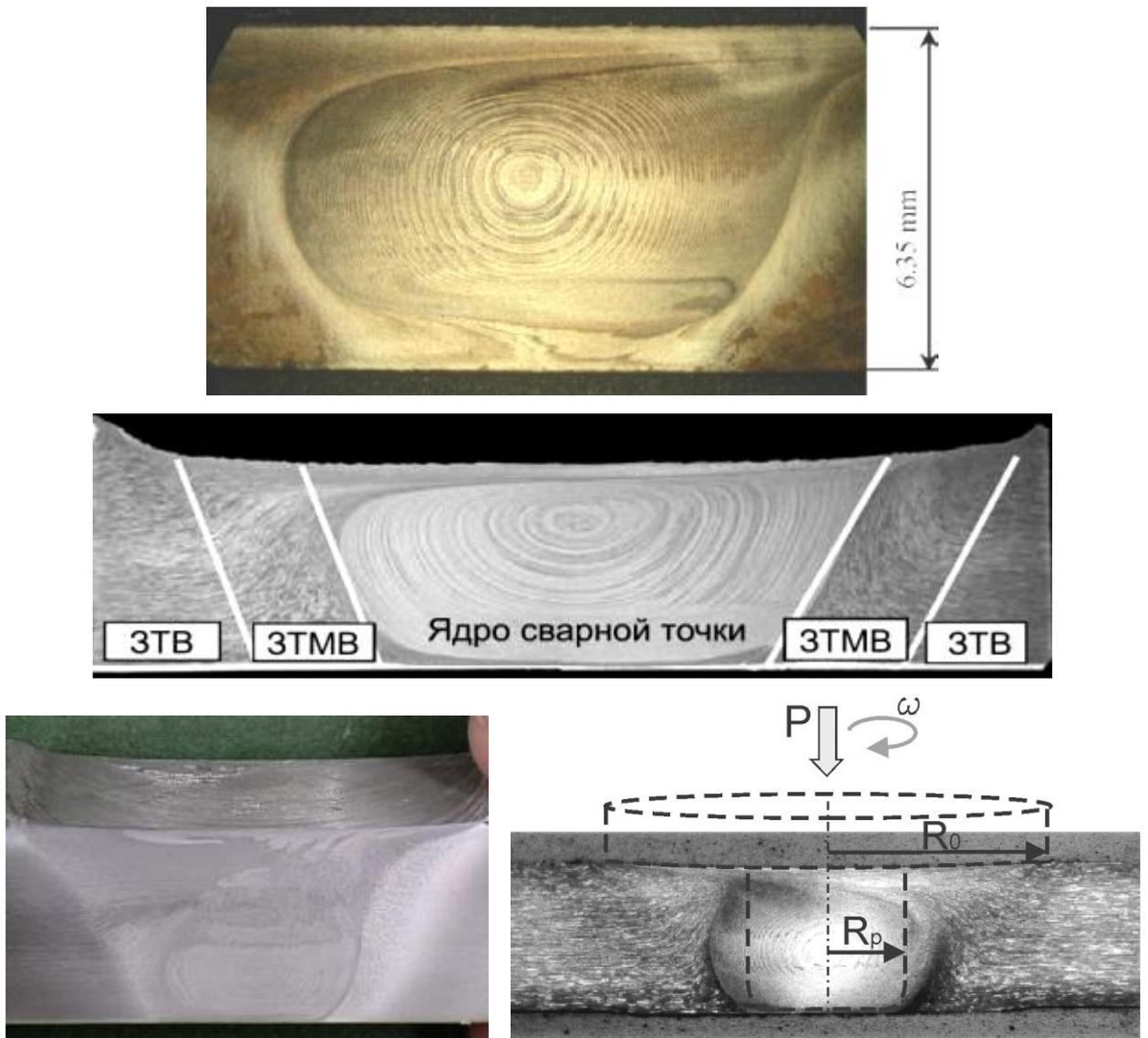


Рисунок 2.5 – Основные зоны сечения сварного шва СПП:

ЗТВ – зона термического влияния; ЗТМВ – зона термомеханического влияния

*Центральная зона перемешивания (ядро сварки)* имеет мелкие равноосные зерна. Такая структура образуется в результате рекристаллизации при действии интенсивных пластических деформаций и высоких температур. В этой зоне величина зерна мало отличается от исходного материала. Макроструктура зоны перемешивания часто имеет выраженные «кольца» (луковичная структура) «закрученного» материала, испытывает самое сильное искажение, и является следствием данного способа.

*Зона термомеханического влияния* лежит по обе стороны зоны перемешивания. Пластическая деформация и температура в этих зонах ниже чем в зоне пере-

мешивания, следствием чего является образование структуры, имеющей участки мелких и сравнительно крупных зерен поскольку эта зона рекристаллизована только частично. В зонах термического влияния зерна имеют большие размеры, поскольку их материал подвергается только воздействию повышенных температур при отсутствии пластических деформаций, что сопровождается ростом зерна. Материал в этой зоне имеет наиболее низкие прочностные свойства.

*Зона термического влияния* формируется в условиях меньших температур и температурных градиентов, чем при сварке плавлением, что положительно сказывается на ее структуре. Рост зерен выражен в значительно меньшей мере.

Асимметрия поперечной структуры шва сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием, обусловлена взаимно противоположным движением частей инструмента по правую и левую сторону от его оси вращения (по ходу движения и против хода движения). Различают сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением линии сварки, и противоположную сторону – отхода.

### 2.2.2 Физико-механические явления в зоне сварки трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием относится к процессам соединения материалов в твердой фазе и поэтому лишена недостатков, связанных с расплавлением и испарением металла. Несмотря на кажущуюся простоту, процесс СТП в действительности сложен. В нем взаимодействуют такие явления, как:

- тепловыделение при трении,
- образование и разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями инструмента и свариваемых заготовок в процессе их относительного движения,
- быстрый нагрев и охлаждение объемов металла при больших давлениях,
- пластическая деформация,
- деформационное упрочнение,
- рекристаллизация металла и др.

СТП является результатом сложного взаимодействия множества одновре-

менных термомеханических процессов. Эти процессы оказывают влияние на:

- скорости нагрева и охлаждения,
- пластическую деформацию и течение материала,
- динамику рекристаллизации,
- механическую целостность соединения.

Отличительной особенностью технологии СТП от других методов сварки металлов является тот факт, что соединение материалов осуществляется без их плавления. Тепло, генерируемое трением вращающегося рабочего стержня инструмента со свариваемыми поверхностями, размягчает материал заготовок. Вследствие дополнительного к вращению осевого давления и поступательного движения инструмента, материал заготовок, находясь в пластичном состоянии, смешивается, переходя с фронтальной стороны инструмента к задней, где, охлаждаясь, затвердевает.

Хотя по технологии СТП не происходит расплавления материала, благодаря тепловому воздействию, шов, сформированный деформацией материала в горячем состоянии, обладает мелкозернистой структурой без оксидирования и пористости. Отсутствие фазы плавления материала в самой заготовке позволяет тем самым избежать множества проблем, возникающих из-за таких изменений состояния, как объемные изменения и растворимость газа, которые часто мешают процессу сварки плавлением. Кроме того, снижение температуры сварки позволяет значительно уменьшить деформацию материала и снизить остаточные напряжения и улучшить усталостные характеристики.

### 2.2.3 Определяющие технологические параметры и циклограммы процесса сварки трением с перемешиванием

Силы трения и напряженное состояние деформируемого объема материала зависят от закономерностей изменения физико-механических свойств свариваемых материалов в процессе СТП, обусловленных такими факторами как температура, степень и скорость деформации, геометрия инструмента и технологические режимы.

Параметры процесса сварки зависят от типа соединяемых материалов, физико-механических свойств свариваемых материалов, толщины и конфигурации соединений. Как правило, технологические схемы, режимы процесса и инструментальное обеспечение отрабатываются экспериментально.

Основными технологическими параметрами режима сварки, влияющими на качество сварного соединения при СТП, являются (рисунок 2.6):

- 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.

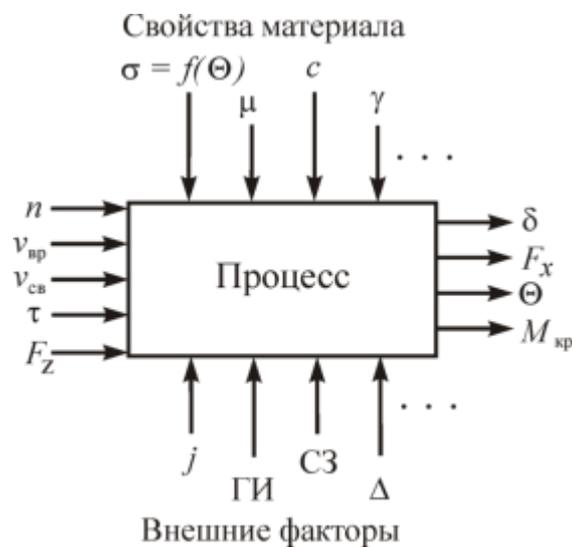


Рисунок 2.6 – Системное представление процесса СТП

С данными параметрами очевидными зависимостями связаны показатели:

- угловая скорость вращения инструмента ( $\omega$ ),
- подача инструмента ( $s$ , мм/об).

Условия рабочего процесса, существенно влияющие на качество СТП:

- геометрия инструмента (ГИ): радиус бурта ( $R_0$ , мм) и штыря ( $R_p$ , мм), форма бурта и штыря;
- сила, действующая на инструмент в процессе сварки, которую принято раскладывать на составляющие ( $F_x$  – сила сопротивления перемещению в направлении сварки (вдоль шва),  $F_y$  – сила, действующая перпендикулярно

направлению сварки в плоскости параллельной или касательной (при сварке криволинейных поверхностей) поверхностям стыкуемых элементов (плоскость сварки),  $F_z$  – сила, действующая в направлении, перпендикулярном плоскости сварки), с которой связана нормальная сила прижатия инструмента к свариваемым листам ( $P=F_z, Н$ );

- угол наклона инструмента ( $\alpha$ );
- жесткость технологической системы ( $j$ ), условия и силы закрепления (СЗ).

*Свойства свариваемого материала*, влияющие на процесс СТП:

- предел текучести материала на разных температурах ( $\sigma$ , МПа);
- температура плавления ( $T_{пл}$ , °С);
- энергия кристаллизации;
- условный коэффициент трения ( $\mu$ ) и др.

*Скорость перемещения инструмента* в направлении сварки один из важнейших параметров. Малые скорости сварки могут привести к перегреву материала, изменению условий термомеханического воздействия, увеличению зоны термического влияния и, как следствие, снижению прочностных характеристик сварного соединения.

*Вращение инструмента* обеспечивает нагрев материала путем тепловыделения при трении и его перенос в процессе движения инструмента вдоль шва от фронтальной к тыловой части зоны сварки. Увеличение частоты вращения инструмента повышает тепловыделение, интенсифицирует перенос материала и его перемешивание.

Линейную и угловую скорости предпочитают выбирать так, чтобы достигать температуры в сварном шве, которая ниже температуры фазового перехода и/или точки твердофазного превращения этих материалов. Для достижения оптимальных условий при увеличении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента.

Для полного отсутствия дефектов, а также для обеспечения всех необходимых свойств, надежности и технологичности необходимо строго выбирать режимы, оптимально подходящие для определенной продукции.

*Температура в зоне сварки* (температура материала и инструмента) определяется достигаемыми скоростями, моментом вращения инструмента, условиями трения и тепловыделения. Слишком низкая температура материала вызывает высокие силовые воздействия, приводят к повышенному износу или разрушению инструмента. Слишком высокая температура может привести к дефектам, обусловленным плавлением материала, фазовому переходу и рекристаллизации. Согласно экспериментальным результатам TWI, максимальная температура при сварке трением с перемешиванием составляет около 70% значения температуры плавления и для алюминия не превышает 550°C.

*Усилия прижатия и перемещения* зависят от типа свариваемых материалов, его толщины и скоростного и температурного режима сварки. Очевидно, что величины действующих сил зависят от материалов свариваемых заготовок, температур в зоне сварки, скорости сварки, геометрии сварочного инструмента и его ориентации (наклона) относительно плоскости сварки. При прочих равных условиях значения силы растут с уменьшением температуры и увеличением скорости сварки. Высокие силы могут привести к разрушению инструмента.

*Угол наклона инструмента* относительно нормали к поверхности сварки устанавливается в некоторых случаях для улучшения условий формирования сварного соединения инструмент. Обычно такой наклон производится на угол 1,5...4,5° с обеспечением более низкого положения края бурта за ее зоной. Наклон инструмента способствует улучшению условий проковки шва буртом. Если угол наклона слишком мал, то это может привести к образованию дефектов в виде непроваров на наружной поверхности шва, а если угол наклона слишком велик, возможно нарушение сплошности шва у корня с образованием тоннельного дефекта.

*Крутящий момент*, обеспечиваемый на шпинделе инструмента зависит от частоты вращения инструмента, усилия прижима инструмента к заготовке, коэффициента трения предела текучести материала. Величина крутящего момента определяет мощность процесса сварки ( $N = (M_{кр} * n) / 9549$  [кВт]).

*Глубина погружения инструмента* определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца пина. Практически важными являются глубина заглабления бурта и положение конца пина в корне сварного шва. Глубина погружения бурта инструмента определяется как расстояние от поверхности заготовки до нижнего положения торца бурта. Глубина погружения должна обеспечивать условия проковки шва на всю толщину свариваемого материала и исключение образования дефектов.

Слабое прижатие инструмента к поверхности деталей в процессе сварки или недостаточное заглавление бурта инструмента в свариваемый материал приводит к увеличению объема, который должен заполняться пластифицированным металлом при формировании шва, и, как следствие, к снижению избыточного давления и образованию несплошностей в швах. Кроме того, при небольшом погружении бурта инструмента в свариваемый металл в зоне сварки выделяется недостаточное количество тепла для обеспечения требуемого уровня пластификации, необходимого для качественного формирования шва, и на лицевой поверхности шва образуются дефекты в виде непроплава.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что формирование качественных швов обеспечивается при усилиях прижима инструмента 5...10 кН и зависит от марки свариваемого сплава. При этом бурт инструмента должен погружаться в свариваемый металл на глубину 0.1...0.2 мм. Чрезмерное заглавление бурта приводит к перегреву металла и образованию на лицевой поверхности шва дефектов в виде надрывов.

*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 в объеме деформируемого тела; от химического состава, температуры, степени и скорости деформации; от формы зоны деформации.

При изменении температуры изменяются сопротивление деформации, физико-химические свойства окисных пленок, промежуточных слоев между металлом и инструментом. Установлено, что при нагревании коэффициент трения сначала растет, достигает максимального значения, затем уменьшается. Сначала коэффициент трения растет в связи с окислением поверхности; в этом интервале температур образуется твердая окалина, повышающая коэффициент трения. При дальнейшем повышении температуры происходит размягчение окалины, и она начинает играть роль смазки. Максимального значения коэффициент трения достигает при температуре примерно 800 - 900°C. Горячая обработка давлением стали происходит при температурах выше 850-950°C, в основном в области уменьшения коэффициента трения.

Экелунд М. установил зависимость коэффициента трения от температуры:  $f = \alpha \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot t)$ , где  $\alpha$  – коэффициент равный 0,8 для чугуна и 1,0 для стальных;  $t$  - температура обработки, °C.

*Геометрия сварочного инструмента* во многом определяет качество сварки трением перемешиванием и ее производительность. 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. Материал инструмента должен иметь высокую жаростойкость, твердость и жаропрочность, сопротивление изнашиванию, низкую теплопроводность. В особой мере это относится к материалам инструмента, предназначенного для сваривания сталей, титановых и никелевых сплавов и др. Для повышения качественных характеристик инструмента иногда используют технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. На поверхностях пина и бурта выполняют специальные профильные нарезки, обеспечивающие управление течением пластифицированного материала. Форма

бурта может быть плоской, вогнутой или конической. Геометрия инструмента и параметры процесса сварки оптимизируются для каждого конкретного материала (для каждой пары свариваемых материалов).

К выходным характеристикам качества процесса сварки трением перемешиванием, контролируемым при отработке режимов и выполнении соединения, относятся:

- прочность сварного соединения при различных видах нагружения;
- микро и макроструктура шва;
- уровень и распределения остаточных напряжений;
- твердость поверхности;
- производительность процесса;
- стойкость инструмента;
- затраты на оборудование и оснащение и др.

Факторами, определяющим прочность получаемого шва, являются температура и условия деформации материала в зоне сварки при этой температуре.

*Уровень остаточных напряжений* в соединениях СТП достаточно низкий из-за относительно невысоких рабочих температур процесса. Однако, жесткое закрепление заготовок препятствует сжатию металла при охлаждении зоны динамической рекристаллизации и зоны термического влияния в продольном и в поперечном направлении, приводя к поперечным и продольным остаточным напряжениям. При СТП сплавов 2024 – Т3 і 6013 – Т6 обнаружено, что продольные остаточные напряжения выше поперечных (скорость сварки составляла  $300 \div 1000$  мм/мин, скорость вращения инструмента –  $1000 \div 2500$  об/мин). Высокие растягивающие напряжения преобладают в зоне термического влияния. Величина остаточных напряжений уменьшается при снижении скорости сварки и скорости вращения инструмента. Максимальные значения продольных растягивающих напряжений достигают значений  $30 \div 60\%$  предела текучести сварного соединения и  $20 \div 50\%$  предела текучести основного металла [99 Dalle].

*Макроструктура сварных соединений* при сварке трением с перемешиванием характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным способами

сварки плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра, которое содержит овалы концентрические кольца, различающиеся структурой [123 Volpone M.]. К ядру примыкает сложный профиль, который образует верхнюю часть шва. Образование овалов колец связывается с особенностями перемешивания металла наконечником инструмента.

*Твердость металла* уменьшается в направлении от основного металла к центру шва, и минимальное значение достигается в зоне термического влияния. Снижение твердости в этой зоне происходит за счет перестаривания, уменьшения плотности дислокаций либо за счет обоих этих механизмов.

### *Специальные условия процесса СТП*

СТП может выполняться с присадочным материалом, с дополнительным нагревом, с применением инертных и легирующих сред, с механической и упрочняющей обработкой сварного шва.

Предварительный нагрев зоны сварки целесообразно выполнять для материалов с относительно высокими температурами плавления, такими как стали, титановые сплавы и проч. с целью снижения действующих сил и повышения стойкости инструмента, ускорения процесса разогрева и увеличения скорости сварки. Обычно для этих целей используют индукционный нагрев.

Охлаждение зоны сварки выполняют для алюминиевых и магниевых сплавов, в первую очередь, для уменьшения роста зерна. Охлаждение выполняют потоком воздуха. Кроме того, СТП может выполняться в воде.

На основе СТП разработаны технологии различного назначения: шовная сварка, точечная сварка, наплавка, устранение дефектов материала и его модифицирование, формирование внутренних каналов, пайка, наращивание материала (аддитивная технология) и др.

### *Циклограммы рабочего процесса СТП*

Циклограммы СТП иллюстрирующие изменение основных параметров процесса показаны на рисунках 2.7, 2.8. Отрезки времени, характеризующие этапы всего цикла: А – начало процесса, внедрение инструмента; Б – начало движения

вдоль шва до достижения требуемой скорости сварки; В – штатный режим непосредственно сварки; Г – завершение процесса до остановки инструмента.

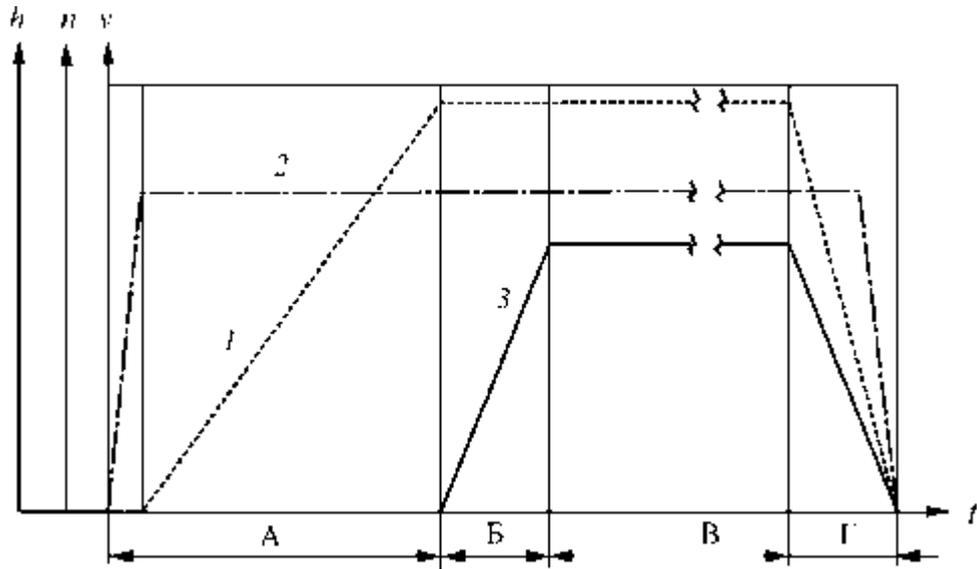


Рисунок 2.7 – Характерная циклограмма сварки трением, отражающая изменение режимных параметров: 1 – величина внедрения инструмента ( $h$ ); 2 – частота вращения инструмента ( $n$ ); 3 – скорость сварки ( $v$ )

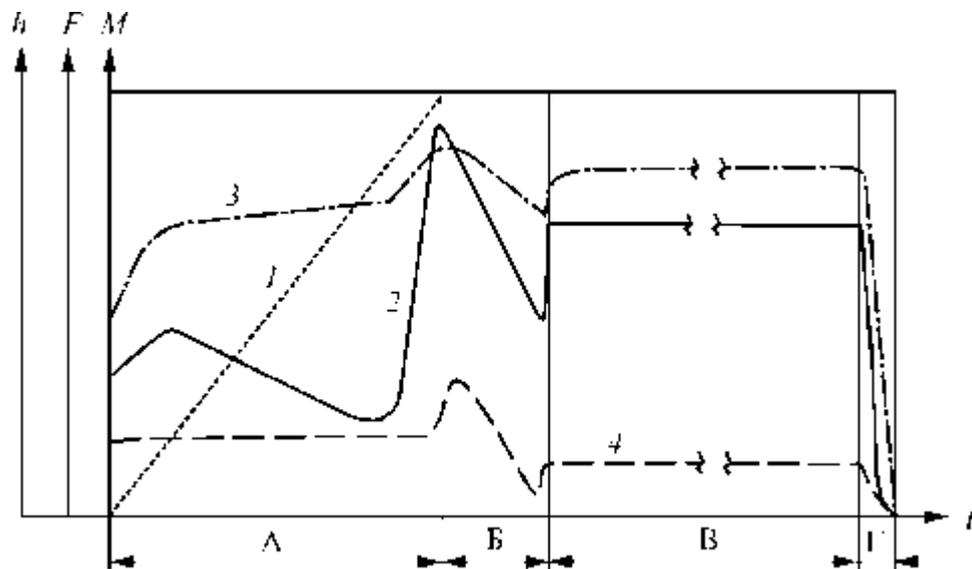


Рисунок 2.8 – Характерная циклограмма сварки трением отражающая характер изменения силовых параметров: 1 – величина внедрения инструмента ( $h$ ); 2 – нормальная (осевая) сила ( $P$ ); 3 – величина крутящего момента ( $M$ ); 4 – сила сопротивления перемещению в направлении сварки ( $F$ )

### 2.2.4 Энергия пластического деформирования

Количество выделяемого тепла и степень перемешивания материала зависят от его свойств, а также переменных СТП, включающих скорость вращения и скорость перемещения инструмента, а также от геометрии инструмента.

В СТП, соединение осуществляется в условиях экструзии, с проковкой материал при высоких скоростях относительной деформации.

В СТП металл не нагревается до температуры плавления, благодаря чему в швах и зонах термического влияния степень структурно-фазовых превращений намного меньше, чем при сварке плавлением. Улучшенные физико-механические свойства таких соединений обеспечивают более высокие эксплуатационные характеристики конструкций, изготовленных с применением СТП.

В процессе СТП тепло генерируется трением между инструментом и свариваемой поверхностью, а также за счёт пластической деформации. Часть энергии пластической деформации запасается в зоне термомеханического влияния.

При СТП инструмент движется с постоянной скоростью вдоль шва ( $U$ ), вращаясь со скоростью вокруг своей оси ( $\omega$ ). В любой точке рабочей поверхности инструмента тангенциальная скорость может быть определена:

$$v_r = \omega \cdot r - U \cdot \sin \theta, \quad (2.1)$$

где  $r$  – радиус от оси инструмента,  $\theta$  – угол между вектором  $r$  и направлением соединения. Тепло генерируется за счёт трения и пластической деформации в контакте рабочего инструмента, а также за счет пластической деформации в зоне термомеханического влияния [98 Cho J.H., Boyce D.E.].

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

$$de_f = \delta \cdot (\omega \cdot r - U \cdot \sin(\theta)) \cdot \mu_f \cdot p \cdot dA, \quad (2.2)$$

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

Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшения скорости перемещения его вдоль стыка. При определенном для данного материала соотношении частоты вращения инструмента и скорости сварки выделяемой за счёт трения теплоты может оказаться недостаточно для пластификации требуемого объёма металла, чтобы заполнить всю полость, образуемую цапфой инструмента. В результате нарушается непрерывность потока, перемещающегося по сложной траектории металла, и в шве образуются внутренние не заполненные металлом полости. При сохранении той же скорости вращения и уменьшении скорости его перемещения пластифицированного материала становится больше, благодаря чему качество сварного шва улучшается. Однако, при чрезмерном уменьшении скорости сварки происходит избыточное выделение тепла, приводящее к перегреву металла и образованию внутренних дефектов в виде полостей и несплошностей.

Результаты экспериментальных исследований показали, что качество швов, при перемешивающей сварке трением алюминиевых сплавов толщиной 1.5...2.5 мм, главным образом зависит от таких параметров процесса, как размер и конфигурация рабочих поверхностей бурта и цапфы инструмента, силы прижатия инструмента к поверхностям листов и глубины его погружения в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости сварки.

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. Титановые сплавы и стали свариваются в диапазоне скорости сварки (25...80 мм/мин) при частоте вращения 1250...1600 об/мин.

Инструмент должен обеспечивать нагрев металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивание его по всей толщине свариваемых кромок и перемещение в замкнутом объеме при избыточном давлении.

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

$$q = \eta \mu p v = \frac{2 \eta \mu P \omega}{60 (R_o^2 - R_p^2)} r; \quad R_p \leq r \leq R_o, \quad (2.3)$$

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 практике ошибки в определении количества выделяющегося тепла могут происходить из различных факторов. Например, величина силы трения может изменяться из-за температуры, а также из-за скорости движения вдоль шва и других факторов. В процессе разогрева шва локальное размягчение материала снижает трение, а с ним и величину выделяющегося тепла. Некоторые исследователи, учитывая этот эффект, вводят дополнительный коэффициент трения. Однако, нет однозначного метода определения коэффициента трения или закона его изменения в процессе, связанного с температурой и скоростью.

Величина пластической деформации зависит от градиента скорости и быстро уменьшается при отдалении от инструмента, в связи с этим большая часть тепла генерируется в области контакта инструмент – свариваемый материал.

Выделение тепла при разных частотах вращения показано на рисунке 2.9.

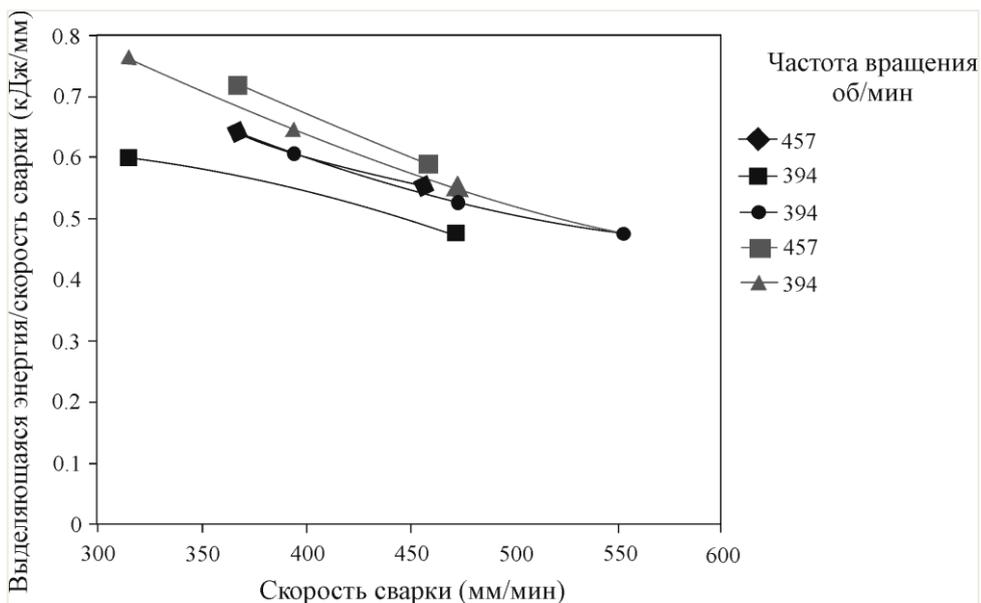


Рисунок 2.9 – Выделение тепла при различных параметрах СТП, используемых при сварке листов из алюминиевого сплава АМГ 6 толщиной 6 мм

Было принято, что изменение предела текучести материала от температуры подчиняется зависимости, показанной на рисунке 2.10.

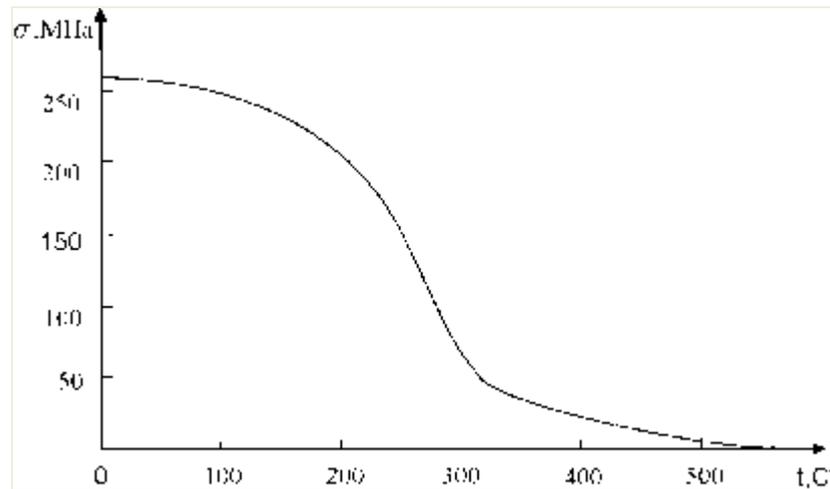


Рисунок 2.10 – Зависимость предела текучести от температуры, принятая для расчетов

При использовании инструмента с малым диаметром бурта объема пластифицированного металла может оказаться недостаточно для полного заполнения освобождающегося позади инструмента пространства, что приведёт к образованию в швах дефектов в виде непроплавки. Чрезмерно большой диаметр бурта способствует формированию широкой лицевой поверхности шва, значительному короблению сварных соединений и образованию дефектов вследствие перегрева металла в зоне сварки. Установлено, что для перемешивающей сварки трением алюминиевых сплавов толщиной 1.5...2.5 мм оптимальный наружный диаметр бурта инструмента должен находиться в пределах 10...15 мм. Кроме того, для обеспечения стабильности формирования швов на торцевой поверхности бурта необходимо делать небольшое кольцевое углубление, обеспечивающее плавное и непрерывное перемещение пластифицированного металла и формирование качественной лицевой поверхности шва [75].

Следует отметить, что область технологических режимов сварки, обеспечивающих ее качество, снижающих износ инструмента и вероятность его поломки очень узка (рисунки 2.11. – 2.12). Причины этого указаны в подрисуночных подписях.

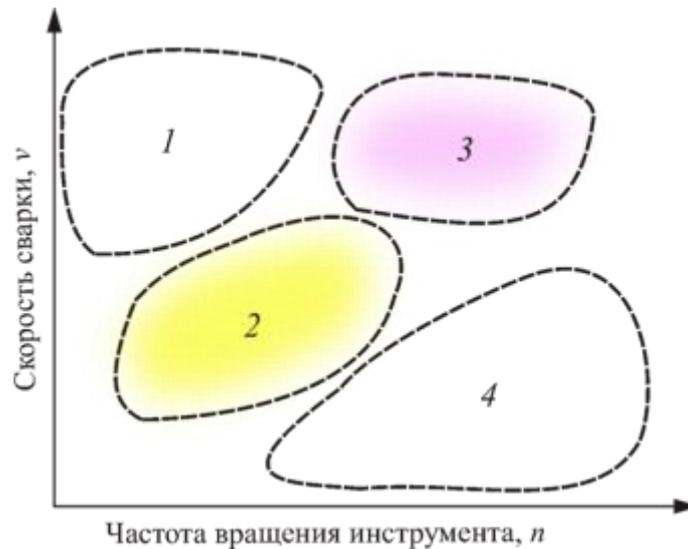


Рисунок 2.11 – Зоны режимов перемешивающей сварки:

1 – высокие нагрузки на инструмент, дефекты в виде непроваров из-за недостаточного разогрева; 2 – область оптимальных условий сварки; 3 – сложность поддержания условий сварки, перспективная область режимов сварки, обеспечивающая высокую производительность; 4 – перегрев металла и ухудшение его структуры, образование задиров и схватывание с инструментом, заглобление инструмента

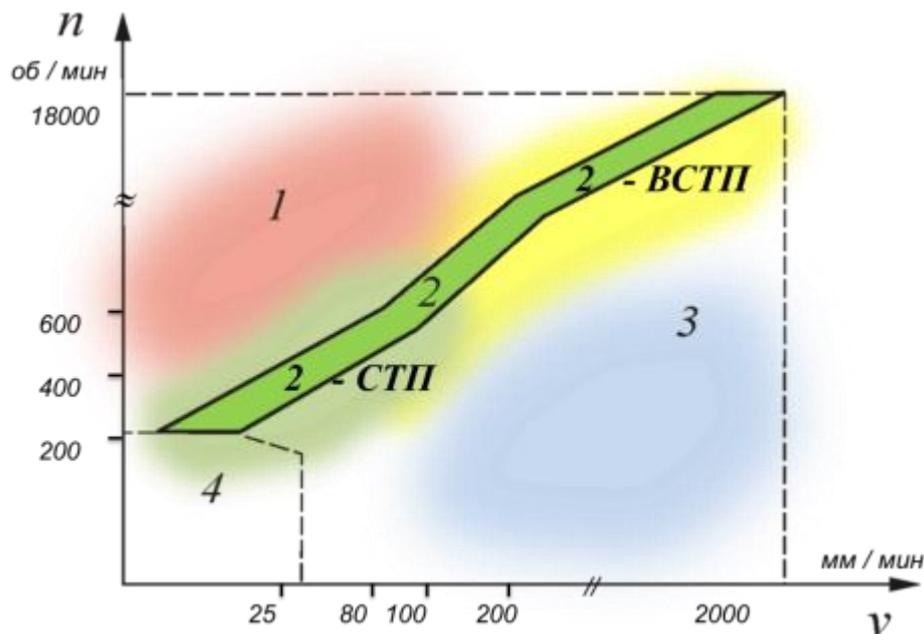


Рисунок 2.12 – Зоны режимов перемешивающей сварки:

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

### 2.2.5 Теоретический потенциал возможности высокоскоростной сварки трением с перемешиванием

На сегодняшний день СТП осуществляется на специальном оборудовании, а также на фрезерных станках с ЧПУ, прошедших модернизацию с использованием специального сварочного инструмента. Основными недостатками этого процесса являются высокие нагрузки на конструкцию оборудования вследствие воздействия осевых сил большой величины, возникающих в процессе сварки, а также ограничения геометрических размеров, свариваемых деталей. Наличие этих недостатков является причиной использования громоздкого оборудования, которое эксплуатируется при низких скоростях вращения шпинделя и способное выдерживать большие нагрузки.

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:

$$Q = \frac{\pi \omega \mu P (R_o^2 + R_o R_p + R_p^2)}{45 (R_o + R_p)} ; \quad (2.4)$$

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 (пина) инструмента.

Из формулы видно, что при установленном необходимом тепловыделении нормальная осевая сила  $P$  обратно пропорциональна угловой скорости вращения шпинделя  $\omega$ .

Из этого следует, что большое значение осевой силы необходимо для компенсации низкого значения скорости вращения шпинделя. Поэтому 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 этого

становится возможным снижение размеров и массы оборудования и инструмента, что позволит изготавливать небольшие портативные машины, способные производить строительные и ремонтные работы в полевых условиях.

На данный момент высокоскоростная сварка трением перемешиванием (ВСТП) в промышленности мало используется в виду не достаточной отработки данного процесса. Поэтому ВСТП является перспективной технологией, требующая более тщательного изучения особенностей данного процесса, к которым относятся следующие параметры: динамика формирования сварного шва; форма и конструкция рабочей части сварочного инструмента и его влияние на процесс формирования сварного шва; физико-технические характеристики свариваемого материала и др. [30, 31, 42, 43].

### 2.3 Экспериментальная отработка режимов сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов с возможностью высокоскоростной обработки

#### 2.3.1 Отработка режимов сварки трением перемешиванием алюминиевых сплавов

Исследования проводились на образцах из листов высокопрочного алюминиевого сплава 1163 РДТВ после анодирования, толщиной 1.8 мм. Химический состав сплава 1163 РДТВ приведен в таблице 2.1, а его механические свойства – в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Химический состав алюминиевого сплава 1163 РДТВ

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Примеси, не более	
									каждая в отд.	суммарное
Основа	3,8 - 4,5	1,2 - 1,6	0,4 - 0,8	0,15	0,1	0,1	0,01 - 0,07	0.05	0.05	0.1

Таблица 2.2 – Механические свойства алюминиевого сплава 1163 РДТВ

Состояние испытываемых образцов	Механические свойства при растяжении, не менее		
	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_b$	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение, $\sigma$ %
	МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )		
Закаленные и естественно состаренные (Т)	430 (44,0)	295 (30,0)	8,0
Закаленные и искусственно состаренные (Т1)	450 (46,0)	400 (41,0)	5,0

Отработка и оптимизация технологических режимов сварки трением выполнялись на модернизированном и специально оснащённом вертикально фрезерном станке 6Р12 [28, 30-32, 40] и с применением специального оборудования для высокоскоростной перемешивающей сварки с частотой вращения шпинделя до 18000 об/мин.

Для отработки режимов и условий СТП были спроектированы и изготовлены опытные образцы инструментов с разной конструкцией рабочей части: с цилиндрическим штифтом; с коническим штифтом и вогнутым буртом; коническим штифтом и плоским буртом со спиральными канавками. Материалом инструмента была выбрана быстрорежущая сталь Р6М5, закалённая до HRC 54.

### *Варьируемые технологические режимы*

Экспериментальные исследования выполнялись с варьированием технологических режимов согласно (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Варьирование технологических режимов

№ п.п.	$n$ , об/мин	$v$ , мм/мин	$t$ , мм
1	200	25	0.15
2	200	80	0.15
3	200	150	0.15
4	200	200	0.15
5	400	25	0.15
6	400	80	0.15
7	400	150	0.15
8	400	200	0.15
9	600	25	0.15
10	600	80	0.15

№ п.п.	$n$ , об/мин	$v$ , мм/мин	$t$ , мм
11	600	150	0.15
12	600	200	0.15
13	800	25	0.15
14	800	80	0.15
15	800	150	0.15
16	800	200	0.15
17	1000	25	0.15
18	1000	80	0.15
19	1000	150	0.15
20	1000	200	0.15

Значение параметра величины осадки инструмента ( $t$ ) использовалось постоянным, как наиболее оптимальное, как показали предыдущие исследования, для данного процесса.

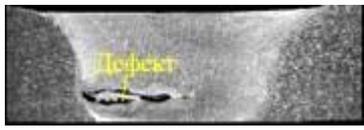
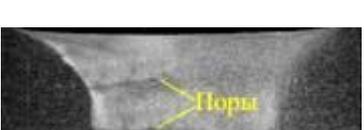
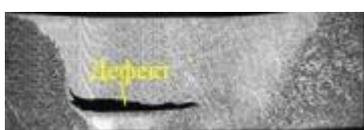
Существенное влияние на формирование швов оказывают *частота вращения инструмента и скорость сварки*. Тепловыделение в зоне сварки повышается с увеличением количества оборотов инструмента или уменьшения скорости перемещения его вдоль стыка. При определённом для данного материала соотношении частоты вращения инструмента и скорости сварки выделяемой за счёт трения теплоты может оказаться недостаточно для пластификации требуемого объёма металла, чтобы заполнить всю полость, образуемую цапфой инструмента. В результате нарушается непрерывность потока, перемещающегося по сложной траектории металла, и в шве образуются внутренние не заполненные металлом полости. При сохранении той же скорости вращения и уменьшении скорости его перемещения пластифицированного материала становится больше, благодаря чему качество сварного шва улучшается. Однако при чрезмерном уменьшении скорости сварки происходит избыточное выделение тепла, приводящее к перегреву металла и образованию внутренних дефектов в виде полостей и несплошностей.

*Металлографические исследования макро- и микроструктуры швов*

Исследование проводилось на шлифах, полученных из сваренных образцов, с помощью металлографического микроскопа ММР – 2Р.

Влияние параметров процесса на структуру шва показано в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Влияние режимов и условий сварки на структуру сварных швов из алюминиевого сплава 1163 РДТВ

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

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. Путем подбора параметров был получен сварной шов, не содержащий дефектов.

На рисунках 2.13 – 2.15 приведены характерные микроструктуры швов, полученные при различных скоростных режимах.

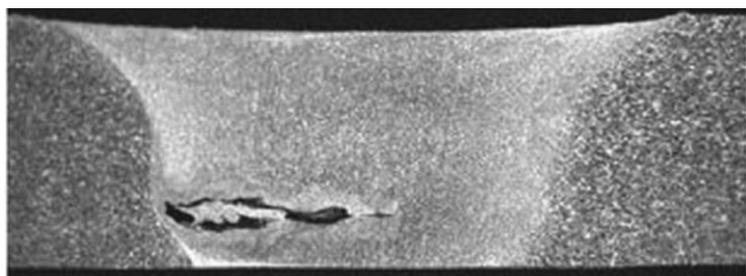


Рисунок 2.13 – Макроструктура сварного шва:  
 $n = 200$  об/мин;  
 $v = 25$  мм/мин

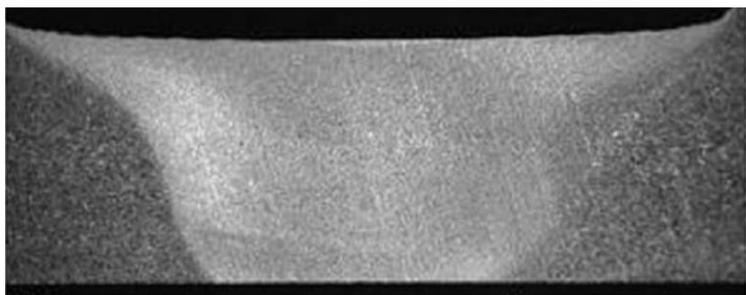


Рисунок 2.14 – Макроструктура сварного шва:  
 $n = 1000$  об/мин;  
 $v = 200$  мм/мин

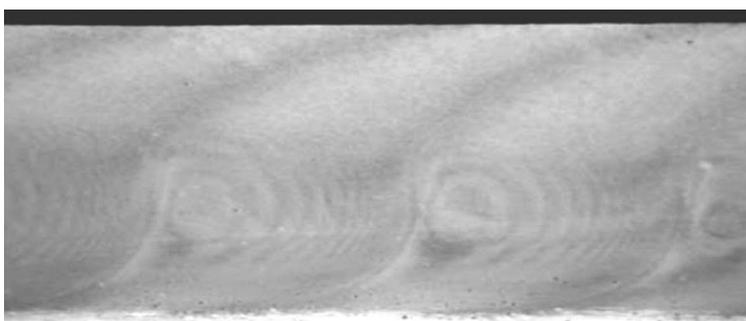


Рисунок 2.15 – Макроструктура при сплошном многопроходном сваривании

Результаты экспериментов показали, что алюминиевые сплавы свариваются перемешивающей сваркой трением без дефектов в широком диапазоне изменения скорости сварки (80...500 мм/мин) при частоте вращения 500...1600 об/мин (рисунок 2.16).

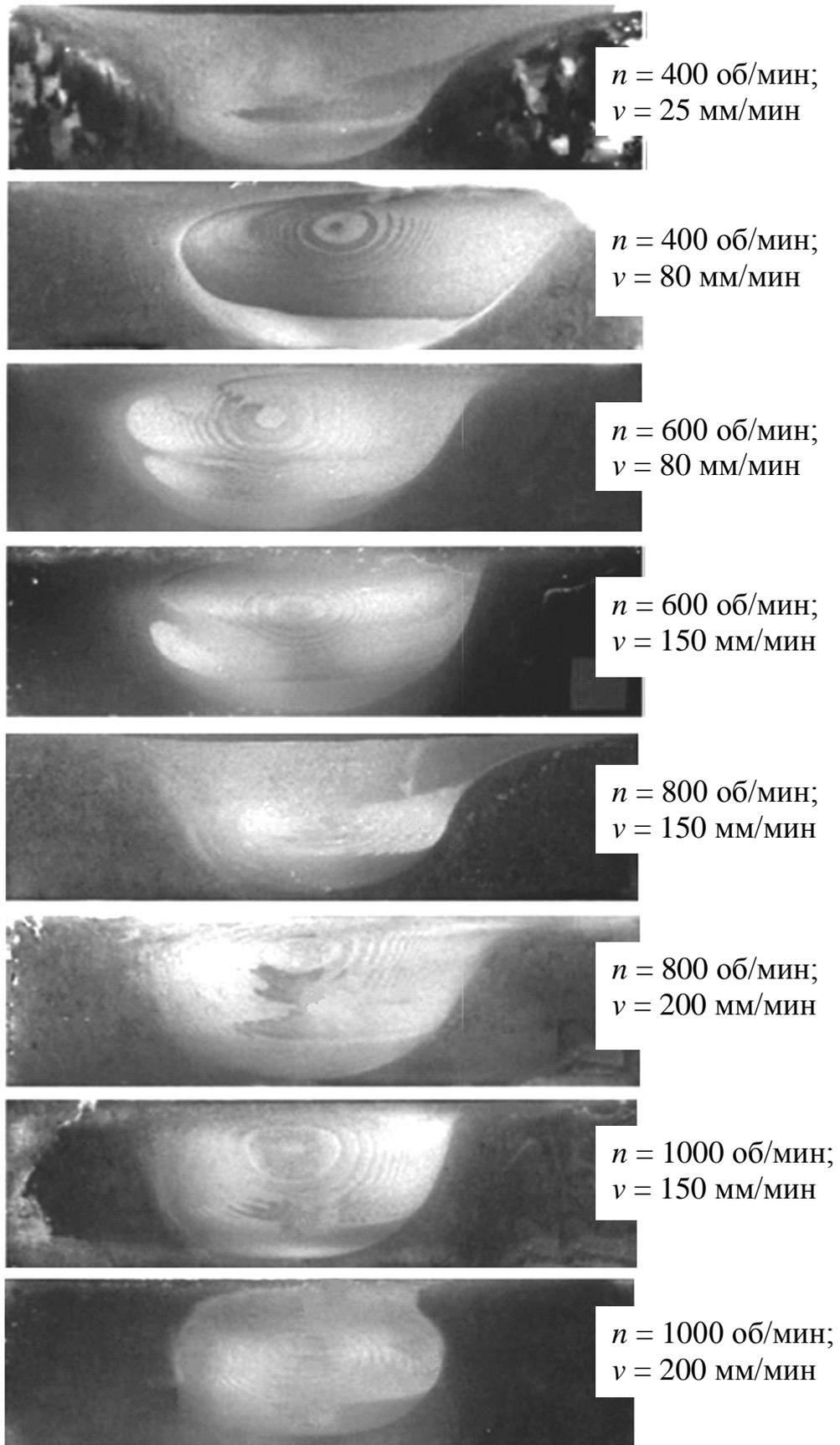


Рисунок 2.16 – Характерные макроструктуры сварных швов, формирующиеся при СТП

### 2.3.2 Прочностные испытания сваренных образцов

Прочностные испытания проводились на разрывной машине Р 0.5. Из сваренных листов изготавливали образцы для испытаний на растяжение, которые подвергали прочностным испытаниям (рисунки 2.17, 2.18) [28].



Рисунок 2.17 – Разрывная машина Р0.5, которая использовалась для определения прочности сварных швов

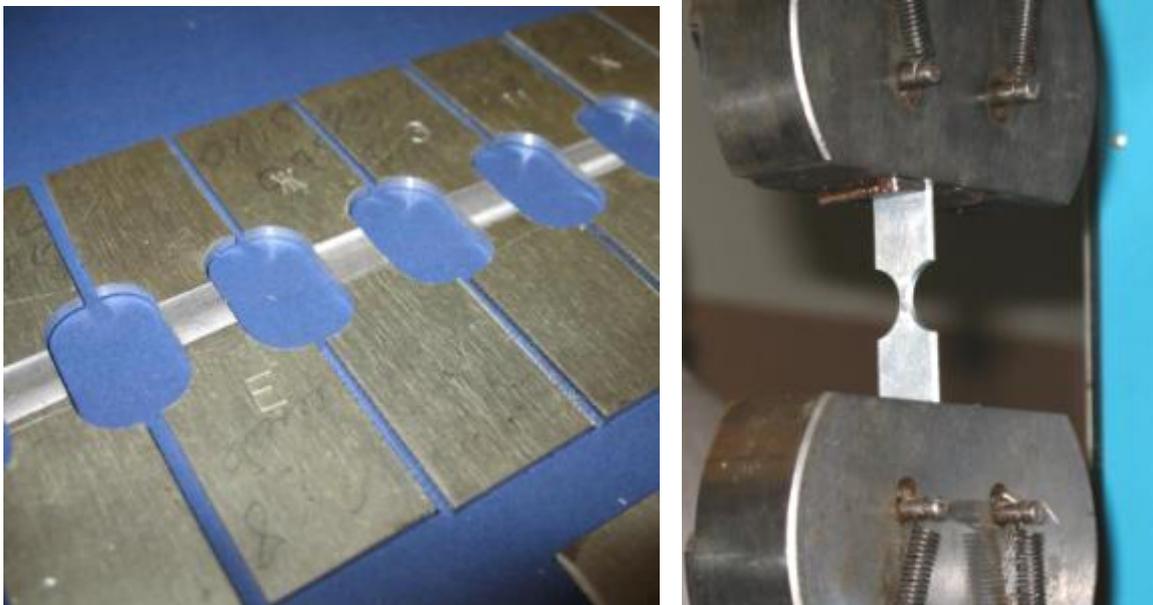


Рисунок 2.18 – Испытания образцов на растяжение

Результаты прочностных испытаний образцов, сваренных СТП приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты прочностных испытаний образцов, сваренных СТП

№ п.п.	$n$ (об/мин)	$v$ (мм/мин)	$t$ (мм)	$\sigma_b$ (МПа)	№ п.п.	$n$ (об/мин)	$v$ (мм/мин)	$t$ (мм)	$\sigma_b$ (МПа)
1	200	25	0.15	336	11	600	150	0.15	н.р.
2	200	80	0.15	350	12	600	200	0.15	353
3	200	150	0.15	300	13	800	25	0.15	346
4	200	200	0.15	280	14	800	80	0.15	н.р.
5	400	25	0.15	350.1	15	800	150	0.15	н.р.
6	400	80	0.15	н.р.	16	800	200	0.15	н.р.
7	400	150	0.15	н.р.	17	1000	25	0.15	н.р.
8	400	200	0.15	н.р.	18	1000	80	0.15	н.р.
9	600	25	0.15	н.р.	19	1000	150	0.15	н.р.
10	600	80	0.15	н.р.	20	1000	200	0.15	н.р.

На основе полученных результатов были построены графические зависимости предела текучести, предела прочности и относительного удлинения (рисунках 2.19 – 2.21) от параметров процесса.

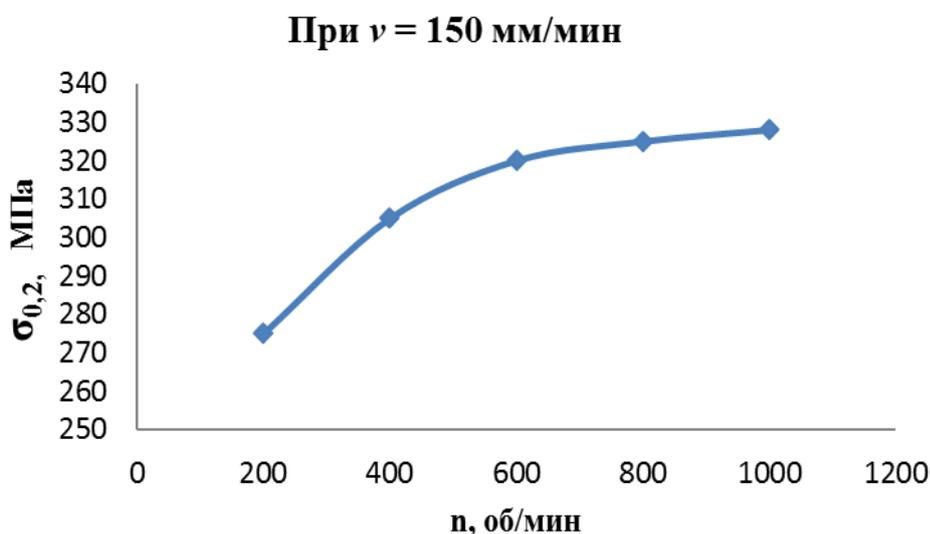


Рисунок 2.19 – Изменение предела текучести с изменением частоты вращения

Отмечено влияние на прочность получаемого соединения, отношения частоты вращения инструмента  $n$  к скорости его перемещения  $v$ . При значениях этого отношения превышающих 35 наблюдается резкое снижение прочности. Причиной этого может служить перегрев материала при больших частотах вращения, приводящий к нарушениям структуры материала шва (рисунок 2.22). Прочность шва оценивалась в процентах от прочности исходного материала.

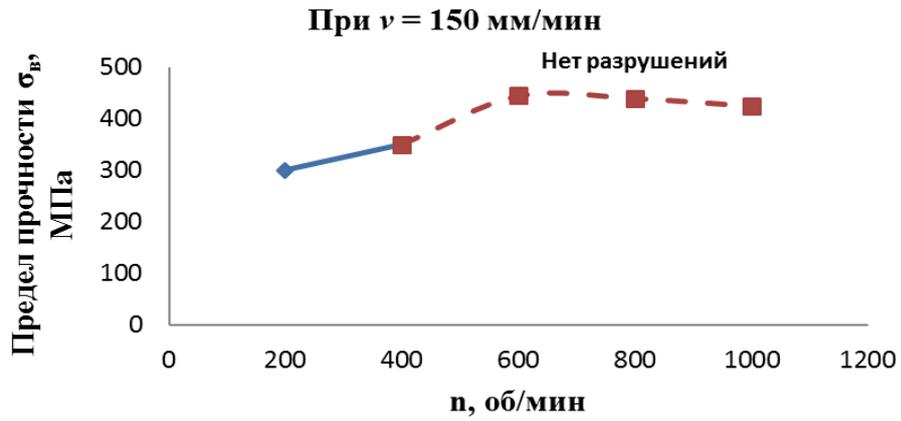


Рисунок 2.20 – Изменение предела прочности с изменением частоты вращения

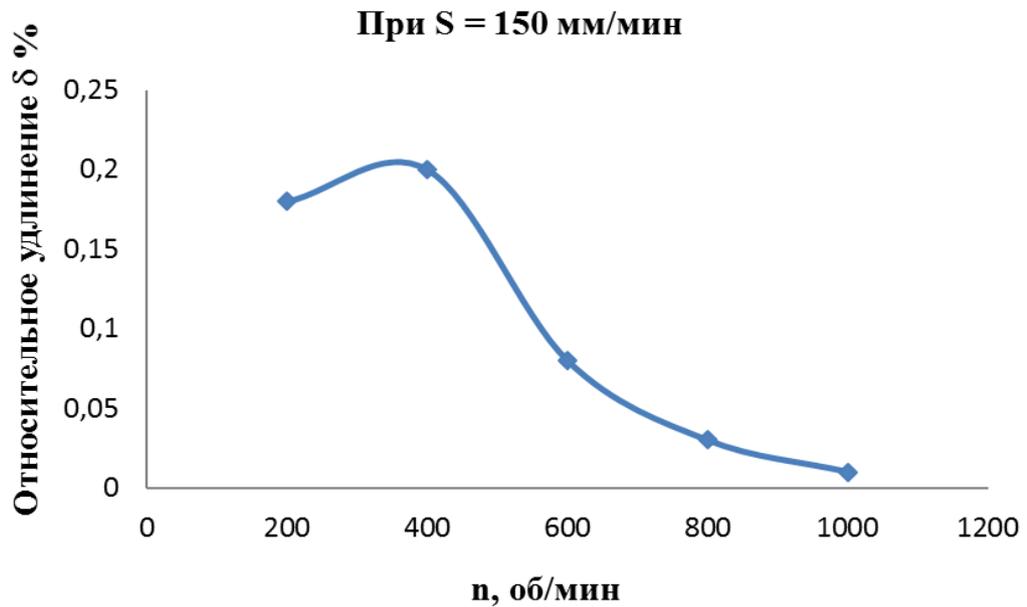


Рисунок 2.21 – График зависимости относительного удлинения от частоты вращения инструмента при сварке

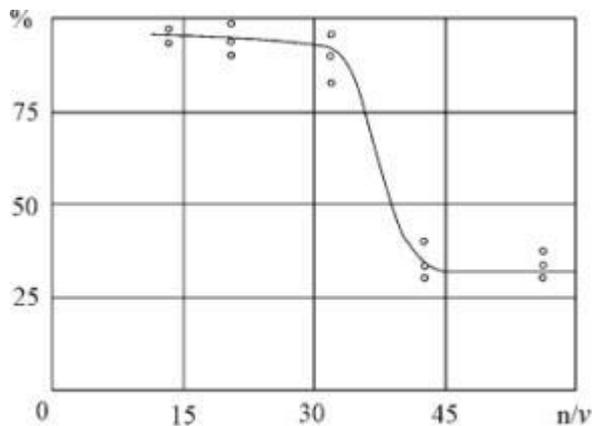


Рисунок 2.22 – Влияние режима сварки алюминиевого сплава АД-1 на прочность

По результатам прочностных испытаний была найдена наиболее оптимальная конструкция инструмента для сварки алюминиевого сплава 1163 РДТВ – со спиральными штифтом и буртом производства ОАО «ВНИИАЛМАЗ».

#### *Оптимальные параметры СТП для алюминиевого сплава*

Анализируя полученные данные, были выбраны наиболее оптимальные параметры для СТП алюминиевого сплава 1163 РДТВ:

- частота вращения  $n = 400 \dots 600$  об/мин;
- скорость подачи  $v = 150$  мм/мин;
- глубина осаждения инструмента  $t = 0,15$  мм;
- конструкция инструмента – со спиральными штифтом и буртом.

#### 2.3.3 Экспериментальная отработка режимов высокоскоростной сварки трением с перемешиванием

Исследования проводились на алюминиевом сплаве 1163 РДТВ с использованием следующих технологических режимов: диапазон частоты вращения сварочного инструмента  $n$  – от 1500 об/мин до 18000 об/мин; диапазон скорости подачи  $v$  – от 120 мм/мин до 1000 мм/мин. Измерение изменений сил проводились с помощью динамометра Kistler и компьютера со специальной программой, регистрирующей значения сил, действующих на заготовку [30-32]. Специально для этого была разработана малогабаритная установка со шпиндельным узлом, обеспечивающим частоту вращения до 18000 об/мин.

Исследования ВСТП проводились с использованием сварочного инструмента различной формы, в частности, со спиральной нарезкой, с параболической и гиперболической формой пина.

Результаты измерения зависимости величины осевой силы от частоты вращения шпинделя для инструментов с различной формой рабочей части показаны на рисунке 2.23.

Установлено, что при больших частотах вращения шпинделя минимальные значения сил, действующих на инструмент, наблюдаются при использовании инструмента с рабочей частью гиперболической формы.

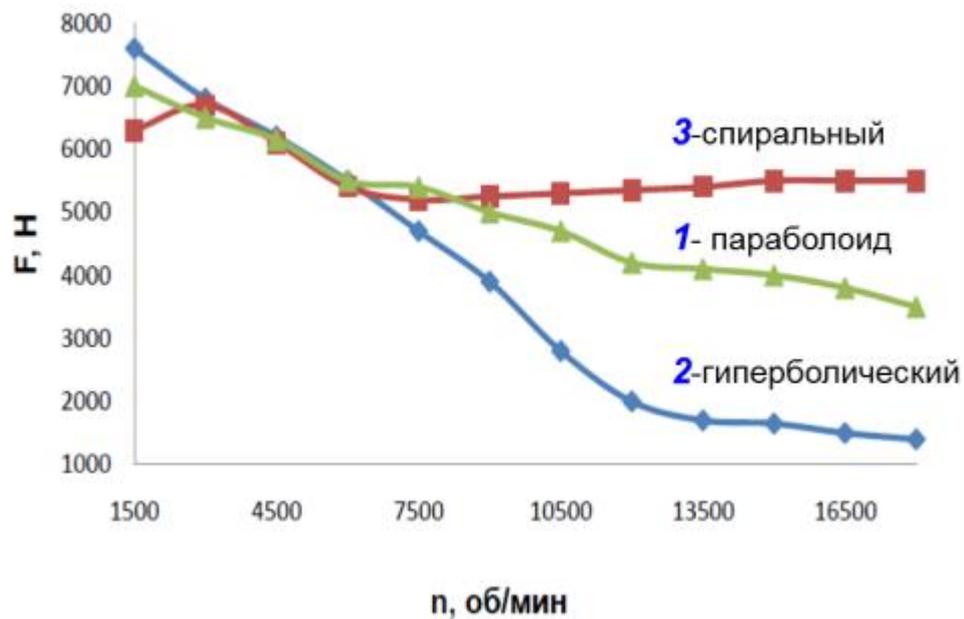


Рисунок 2.23 – Влияние частоты вращения инструмента на величину осевой силы (величина скорости сварки  $v = 700$  мм/мин):

1 – инструмент с параболическим наконечником; 2 – инструмент с гиперболическим наконечником; 3 – инструмент со спиральной нарезкой

Из графика видно, что наименьшее значение осевой силы удалось достичь с инструментом, имеющим наконечник гиперболической формы.

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), выше не поднимается, соответственно не меняется и пластичность материала.

Отсюда следует, что существует определённый предел частоты вращения инструмента, при достижении которого нормальная осевая сила дальше слабо уменьшается или не уменьшается вовсе.

Некоторое возрастание осевой силы с увеличением частоты вращения для инструмента со спиральной нарезкой можно объяснить тем, что меняется характер течения материала в спиральных нарезках инструмента. Вследствие этого возникают вибрационные процессы, приводящие к тому, что сила не уменьшается, а наоборот немного увеличивается.

### Прочностные испытания образцов

Для проверки качества получаемого соединения были проведены прочностные испытания на разрыв, а также анализ макроструктуры сварного шва. Результаты испытаний приведены в таблице 2.6 и на рисунках 2.24, 2.25.

Таблица 2.6 – Результаты прочностных испытаний на разрыв  
(\* разрушение в зоне основного материала)

№ п.п	$n$ (об/мин)	$v$ (мм/мин)	$t$ (мм)	$\sigma_b$ (МПа)	№ п.п	$n$ (об/мин)	$v$ (мм/мин)	$t$ (мм)	$\sigma_b$ (МПа)
1	1500	250	0.15	336	11	12000	1500	0.15	р.р.*
2	1500	800	0.15	350	12	12000	2000	0.15	р.р.*
3	1500	1500	0.15	300	13	15000	250	0.15	р.р.*
4	1500	2000	0.15	280	14	15000	800	0.15	р.р.*
5	7500	250	0.15	350.1	15	15000	1500	0.15	р.р.*
6	7500	800	0.15	р.р.*	16	15000	2000	0.15	р.р.*
7	7500	1500	0.15	р.р.*	17	18000	250	0.15	р.р.*
8	7500	2000	0.15	р.р.*	18	18000	800	0.15	р.р.*
9	12000	250	0.15	р.р.*	19	18000	1500	0.15	р.р.*
10	12000	800	0.15	р.р.	20	18000	2000	0.15	р.р.

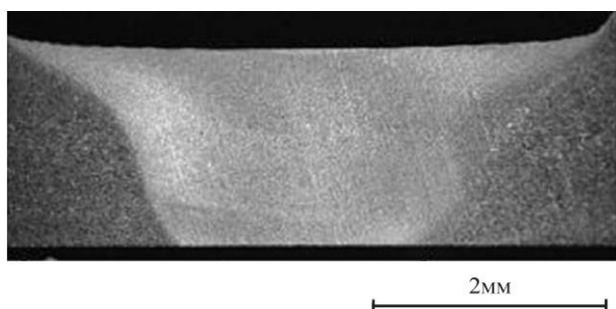


Рисунок 2.24 – Макроструктура сварного шва СТП:

$n=1500$  об/мин;  $v=250$  мм/мин

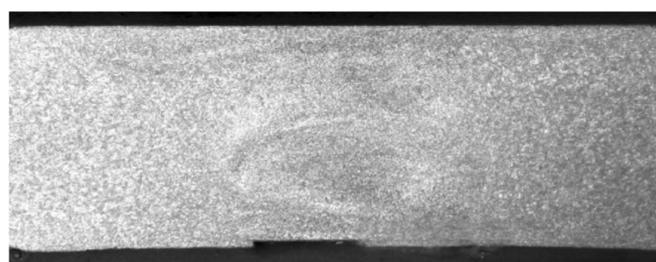


Рисунок 2.25 – Макроструктура сварного шва ВСТП:

$n=18000$  об/мин;  $v=2000$  мм/мин

Результаты испытаний показали, что прочность материала, сваренного СТП при высоких скоростях технологических параметров, превосходит прочность основного материала. Из полученных данных можно сделать вывод, что ВСТП позволяет получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования. Следовательно, данное направление открывает новые возможности в развитии перемешивающей сварки трением.

## 2.4 Экспериментальная отработка режимов сварки трением перемешиванием титанового сплава и жаропрочной стали

### 2.4.1 Свариваемые материалы

Применение сплавов на основе титана и жаропрочных сталей в авиационной и ракетно-космической промышленности трудно переоценить. Это одни из самых распространенных материалов в производстве двигателей и агрегатов летательных аппаратов. Именно основные функциональные достоинства этих материалов – высокая прочность, твердость, жаропрочность – создают технологические трудности в их обработке как при формообразовании, так и в процессах неразъемного соединения деталей, создают проблемы производственного инструментального обеспечения, обладающего удовлетворительной стойкостью и ресурсом. Такие высокотвердые износостойкие инструментальные материалы в свою очередь создают технологические проблемы их изготовления и формообразования рабочих частей сложных форм. В целях экспериментальной отработки свариваемости методом СТП и оптимизации конструкции инструмента были выполнены образцы заготовок размером 120x40 из листов титана ВТ-6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 толщиной 2 мм для сварки. Основные механические и физические свойства титанового сплава ВТ6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 представлены в таблицах 2.7 – 2.10.

Таблица 2.7 – Химический состав ВТ6

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
до 0.6	до 0.1	до 0.1	3.5 - 5.3	до 0.05	86.45 - 90.9	5.3 - 6.8	до 0.3	до 0.2	до 0.015

Таблица 2.8 – Физико-механические свойства материалов

Марка материала	$T_{пл}, ^\circ C$	Временное сопротивление разрыву, $\sigma_6$	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Температура сварки $(0.7..0,8T_{пл}), ^\circ C$
ВТ6	970-1010	850-1000		707...808
12Х18Н10Т	1800	550-650	225-315	1260...1440

Таблица 2.9 – Химический состав стали 12Х18Н10Т

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
до 0.12	до 0.8	до 2	9 - 11	до 0.02	до 0.035	17 - 19	до 0.3

Таблица 2.10 – Механические свойства стали 12Х18Н10Т при повышенных температурах

Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	$\sigma_B$ (МПа)	$\delta_5$ (%)	$\psi$ %	KCU (кДж / см <sup>2</sup> )
Закалка 1050-1100 °С, охлаждение на воздухе					
20	225-315	550-650	46-74	66-80	215-372
500	135-205	390-440	30-42	60-70	196-353
550	135-205	380-450	31-41	61-68	215-353
600	120-205	340-410	28-38	51-74	196-358
650	120-195	270-390	27-37	52-73	245-353
700	120-195	265-360	20-38	40-70	255-353

На основе анализа механических свойств ВТ6 и 12Х18Н10Т были разработаны требования к рабочей температуре инструментальных материалов для СТП сплавов на основе титана и железа.

#### 2.4.2 Выбор инструмента для обработки режимов сварки трением

Правильный выбор инструментального материала обеспечивает эффективную эксплуатацию инструмента при СТП. Для инструмента СТП сплавов на основе титана и железа выбрали исходя из оптимального сочетания его теплостойкости и прочности.

При выборе инструментального материала для макетного образцов инструмента СТП титанового сплава ВТ6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 руководствовались условием, что температура, возникающая в результате трения сварочного инструмента о поверхность свариваемых заготовок, не превышает значения 0,7...0,8 Тпл материала заготовок.

С целью выбора инструментального материала, наиболее пригодного для СТП сплавов ВТ6 и 12Х18Н10Т образцов толщины 2 мм были изготовлены макетные образцы инструмента из твердого сплава А04 ТУ 48-4205-90-2010 (аналог ВК8) и H10F Sandvik Coromant (аналог ВК20-ОМ) и вольфрам-рениевого сплава ВР25 ТУ 48-19-274-77.

Вольфрам-рениевый сплав ВР25 ТУ 48-19-274-77 имеет очень высокий предел длительной прочности при повышенных температурах 500÷2 000 °С, он выдерживает многократные нагревы и охлаждения без потери прочностных показате-

телей, что является очень важным для инструмента СТП. Предел прочности при растяжении вольфрам-рениевого сплава ВР25 составляет 2800 МПа. Даже при повышенных температурах предел прочности при растяжении вольфрам-рениевого сплава ВР25 значительно выше чем у других тугоплавких металлов, например, молибдена, тантала, ниобия и хрома. Так, при 550°С предел прочности равен примерно 1960, при 1100°С - 1300, а при 2200°С-120 МПа.

*Твёрдые сплавы* группы WC - Co имеют высокие твёрдость 88...92 HRA и теплостойкость до 800...1000°С. Прочность и износостойкость твердых сплавов вольфрамокобальтовой группы WC - Co зависят от химического состава. С повышением содержания кобальта и с увеличением среднего размера зерен карбида вольфрама твёрдость линейно снижается. При этом снижается и сопротивление износу, но увеличивается прочность. Твёрдость крупнозернистых сплавов на 2-3 единицы ниже, чем мелкозернистых сплавов. Предел прочности при изгибе – наиболее распространенная прочностная характеристика твердых сплавов. С увеличением содержания кобальта  $\sigma_{и}$  увеличивается, при 5-20% кобальта  $\sigma_{и}$  имеет максимальное значение, затем уменьшается. С повышением температуры до 400°С  $\sigma_{и}$  твердых сплавов в основном уменьшается незначительно. При дальнейшем повышении температуры  $\sigma_{и}$  значительно уменьшается. Например, при температуре 800°С  $\sigma_{и}$  сплава ВК20 в 2 раза меньше, чем при комнатной температуре. С увеличением содержания кобальта ударная вязкость  $a_{н}$  повышается. У крупнозернистых сплавов  $a_{н}$  выше, чем у мелкозернистых. Максимальное сопротивление износу имеют твердые сплавы с малым содержанием кобальта. С увеличением содержания кобальта износ сплавов увеличивается, но при этом увеличивается вязкость сплавов и сплавы выдерживают большие нагрузки, что чрезвычайно важно для инструмента СТП.

Для отработки режимов и условий СТП сплавов на основе титана и железа, спроектированы и изготовлены макетные образцы инструментов, состоящие из 1 - хвостовика, 2 - штифта и прижимного бурта - 3. Инструмент СТП (рисунок 2.26) с штифтом в виде усеченного конуса с тремя лысками 120°, обеспечивает высокую механическую прочность инструмента в процессе сварки и внедрения. Прижим-

ной бург - плоский с внутренним поднутрением  $3^\circ$ , обеспечивает направление свариваемого материала к корню шва. Цилиндрический хвостовик диаметром 16 мм для зажима в цанговом патроне ER32.

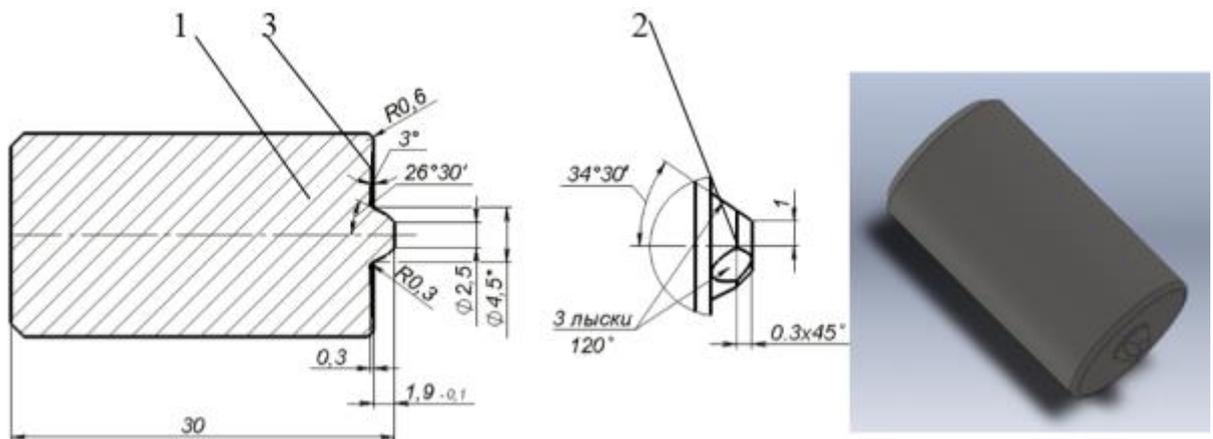


Рисунок 2.26 – Инструмент ФС для сплавов на основе титана и железа: эскиз и 3D модель макетного образца инструмента

#### 2.4.3 Испытательное оборудование, средства измерения и контроля

Испытания проводились на модернизированном вертикально-фрезерном станке мод. 6P13. Крепления образцов для сварки из ВТ6 и 12Х18Н10Т размером 120x40 мм выполнялось в специально спроектированном и изготовленном приспособлении АЛНФ.301313.000.01СБ (рисунок 2.27). Это приспособление обеспечивает плотное прижатие свариваемых образцов к подложке и препятствует раскрытию стыка. Для надёжного крепления макетных образцов инструмента ФС в шпинделе станка мод.6P13 использовалась специальная оснастка (рисунок 2.28). Макетный образец инструмента крепился в цанговом патроне ER-32 ГОСТ 26539-85 по средствам шлицевой гайки. В свою очередь, цанговый патрона ER-32 крепится к шпиндельному узлу станка мод. 6P13 через переходную втулку.

В качестве вспомогательного оборудования для подачи аргона ГОСТ 10157-79 в зону ФС были использованы: баллон газовый ГОСТ 9731-79; регулятор расхода газа АР-40-КР1 ГОСТ 13861-89 предназначенный для понижения и регулирования давления газа, поступающего в регулятор из баллона, и автоматического поддержания постоянным заданного расхода; газовый шланг ГОСТ 9356-75.

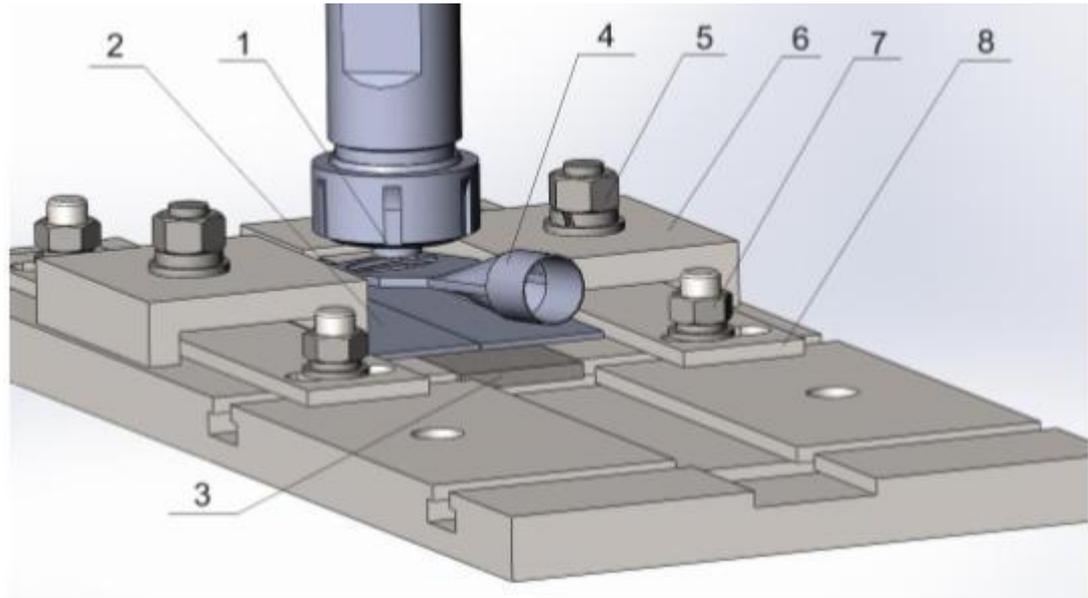


Рисунок 2.27 – 3D модель приспособления АЛНФ.301313.000.01СБ для крепления свариваемых образцов: 1 - макетный образец инструмента для ФС; 2 - свариваемые образцы; 3 - подложка; 4 - форсунка для подвода аргона; 5-7 - гайка; 6 - прижим; 8 - упор

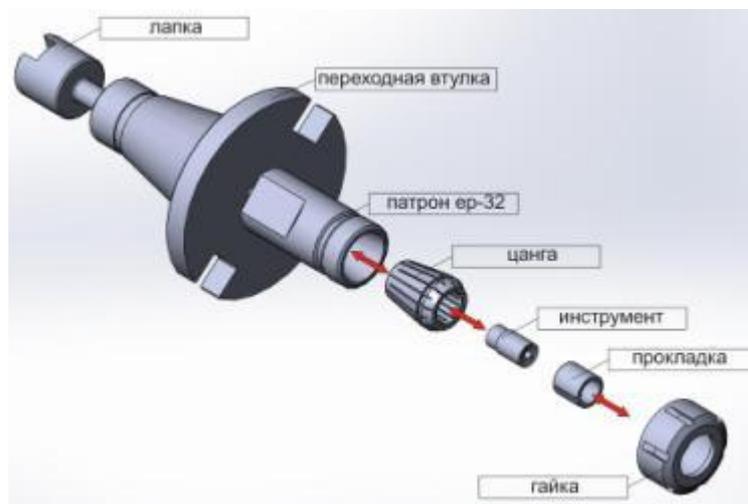


Рисунок 2.28 – 3D модель оснастки для крепления макетного образца инструмента СТП в шпинделе станка мод.6Р13

#### 2.4.4 Факторный эксперимент отработки технологических режимов

В качестве первого приближения в планировании экспериментов были проведены серии предварительных опытов. Экспериментальные исследования выпол-

нялись с варьированием технологических режимов (таблица 2.11). Значение параметра величины осадки инструмента ( $t$ ) и расход аргона использовалось постоянным, как наиболее оптимальное, как показали предыдущие исследования, для данного процесса.

Таблица 2.11 – Отработка технологических режимов СТП  
ВТ6 ГОСТ 19807-91 и 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 листов толщиной 2 мм

12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72				ВТ6 ГОСТ 19807-91			
№ п.п.	$n$ , об/мин	$v$ , мм/мин	$t$ , мм	№ п.п.	$n$ , об/мин	$v$ , мм/мин	$t$ , мм
1	600	50	0.1	1	400	50	0.1
2	600	80	0.1	2	400	100	0.1
3	600	150	0.1	3	400	200	0.1
4	800	50	0.1	4	600	50	0.1
5	800	80	0.1	5	600	100	0.1
6	800	150	0.1	6	600	200	0.1
7	1250	50	0.1	7	1000	50	0.1
8	1250	80	0.1	8	1000	100	0.1
9	1250	150	0.1	9	1000	200	0.1

Результаты сварки предварительной серии испытаний представлены на рисунках 2.29, 2.30.

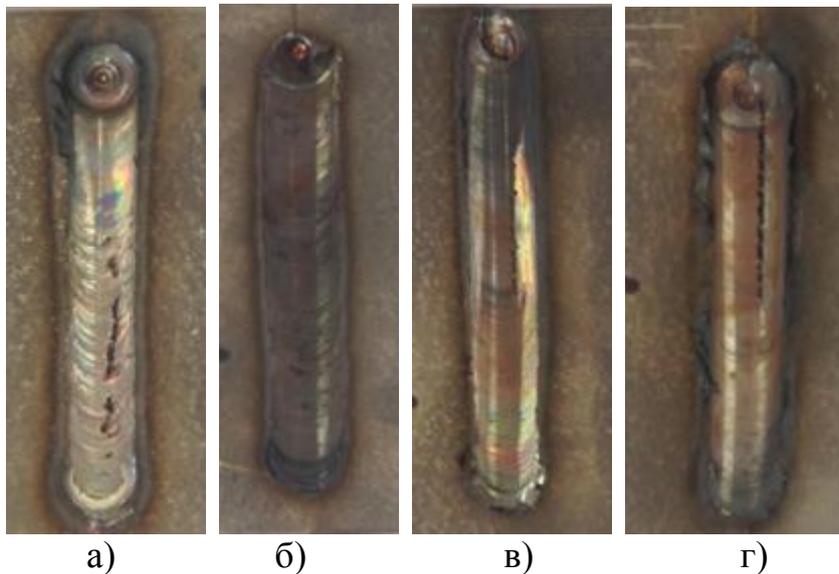


Рисунок 2.29 – Фотографии сварных швов стали 12Х18Н10Т после СТП на режимах:

- а)  $n=600$  об/мин,  
 $v=80$  мм/мин;
- б)  $n=1250$  об/мин,  
 $v=50$  мм/мин;
- в)  $n=800$  об/мин,  
 $v=150$  мм/мин;
- г)  $n=1250$  об/мин,  
 $v=150$  мм/мин

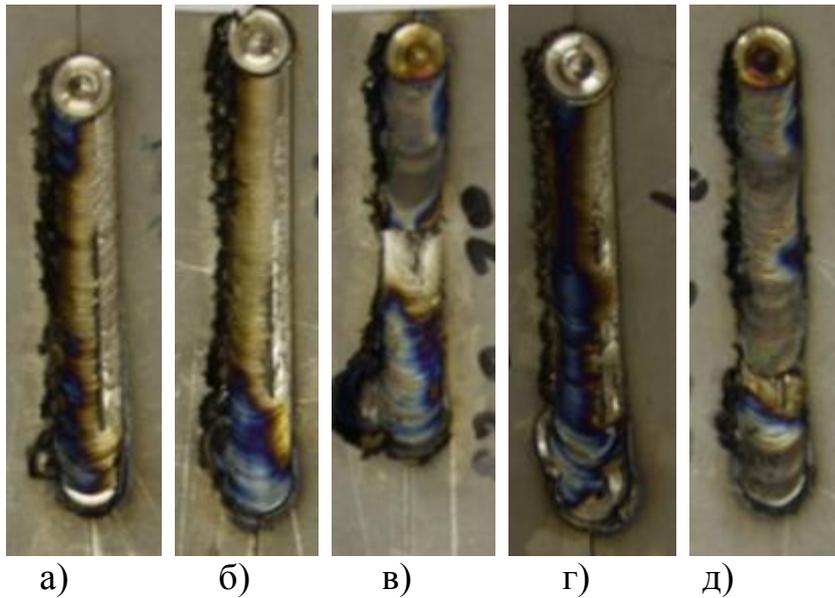


Рисунок 2.30 – Фото сварных швов титана ВТ6 после СТП на режимах:

а)  $n=1000$  об/мин,  
 $v=100$  мм/мин;

б)  $n=1000$  об/мин,  
 $v=200$  мм/мин;

в)  $n=400$  об/мин,  
 $v=200$  мм/мин;

г)  $n=400$  об/мин,  
 $v=100$  мм/мин;

д)  $n=600$  об/мин,  
 $v=200$  мм/мин

На основании проведённого радиографического контроля на соответствие ГОСТ 7512-82 и ОСТ 92 8828-76 (рисунок 2.31) сварных швов после СТП определены технологические режимы (таблица 2.12, рисунок 2.32), оптимальные для проведения ресурсных испытаний макетных образцов инструмента для СТП.

Таблица 2.11 – Технологические режимы проведения СТП сплавов ВТ6 и 12Х18Н10Т

Материал образцов для фрикционной сварки	Скорость внедрения инструмента, мм/мин	Скорость сварки, мм/мин	Частота вращения шпинделя, об/мин
ВТ6 ГОСТ 19807-91	2	200	400
12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72	1	50	1250

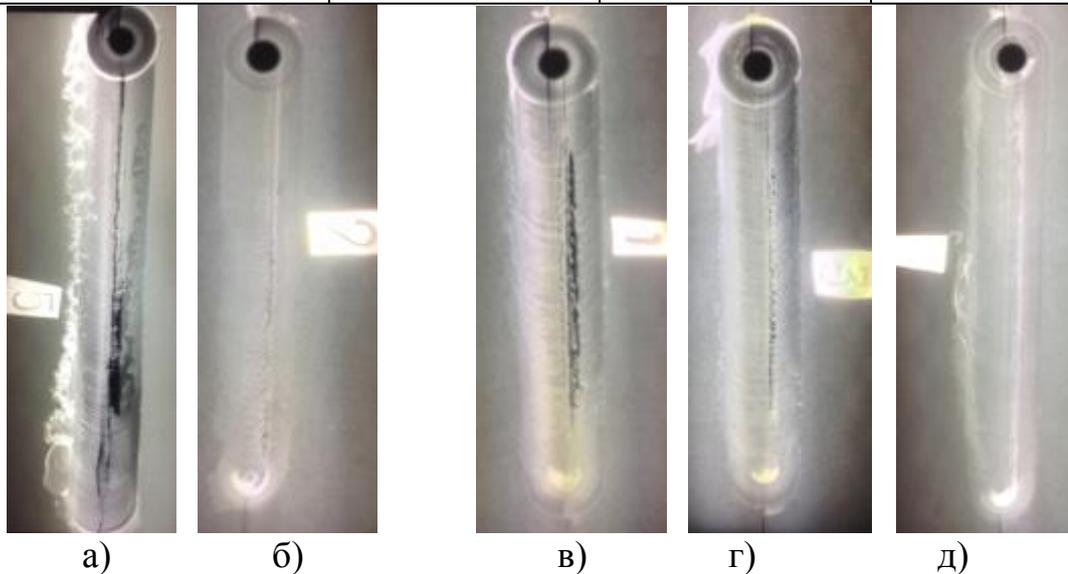


Рисунок 2.31 – Результаты радиографического контроля сварных швов титана ВТ6 (а, б) и стали 12Х18Н10Т (в-д), после СТП на различных режимах: а)  $n=1000$  об/мин,  $v=100$  мм/мин; б)  $n=400$  об/мин,  $v=200$  мм/мин; в)  $n=600$  об/мин,  $v=80$  мм/мин; г)  $n=1250$  об/мин,  $v=150$  мм/мин; д)  $n=1250$  об/мин,  $v=50$  мм/мин

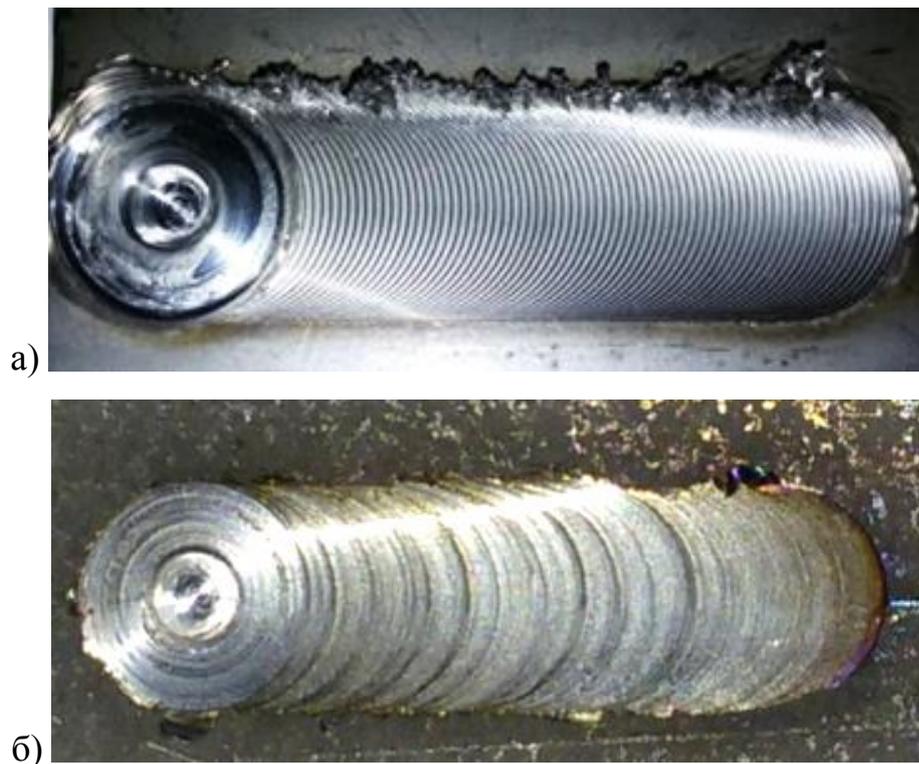


Рисунок 2.32 – Образцы, полученные СТП с оптимальными режимами  
 а) титановый сплав ВТ-6; б) нержавеющая сталь 12Х18Н10Т

Результаты экспериментов показали, что титановые сплавы и стали свариваются в диапазоне скорости сварки (25...80 мм/мин) при частоте вращения 1250...1600 об/мин.

Процесс сварки жаропрочных материалов показан на рисунке 2.33.

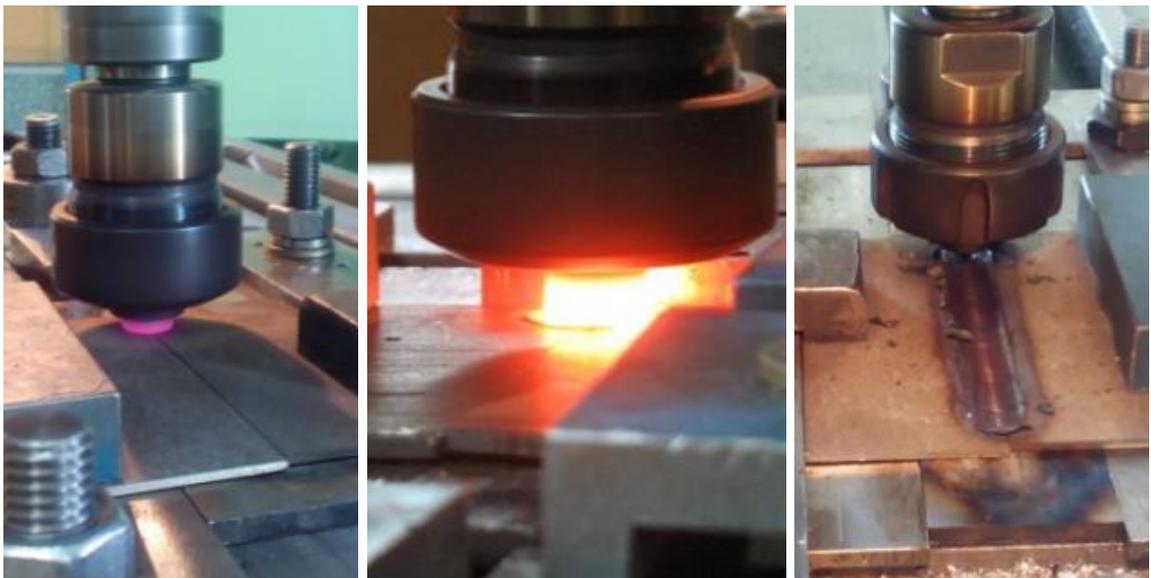


Рисунок 2.33 – Процесс СТП образцов из 12Х18Н10Т:  
 а) процесс внедрения инструмента в свариваемые образцы;  
 б) процесс сварки образцов, в) завершение процесса

Сваренные образцы конструкционной стали показывают хорошие результаты испытаний на прочность (рисунок 2.34).



Рисунок 2.34 – Образец из конструкционной стали, изогнутый после сварки трением

## 2.5 Оценка качества сварного шва по параметрам физико-механическим параметрам

### 2.5.1 Анализ распределения микротвердости в сварном шве

Согласно литературным данным распределение микротвердости по сечению шва может носить различный характер в зависимости от свариваемых материалов, режимов обработки (термомеханических условий формирования шва) и положения сечения по глубине сварного шва [98] (рисунок 2.35).

Это обусловлено множеством факторов, основными из которых являются конкурирование процессов термического воздействия, деформационного упрочнения и его устойчивости при температурном воздействии.

Измерение микротвердости позволяет прогнозировать прочностные свойства шва, определить размеры и особенности зон сварки (термического влияния, термомодеформационной, перемешивания).

В данной работе твёрдость представлена как функция расстояния от линии соединения и глубины. Как показывает практика график твёрдости для алюминиевых сплавов, сваренных СТП, имеет вид «W» – образной кривой.

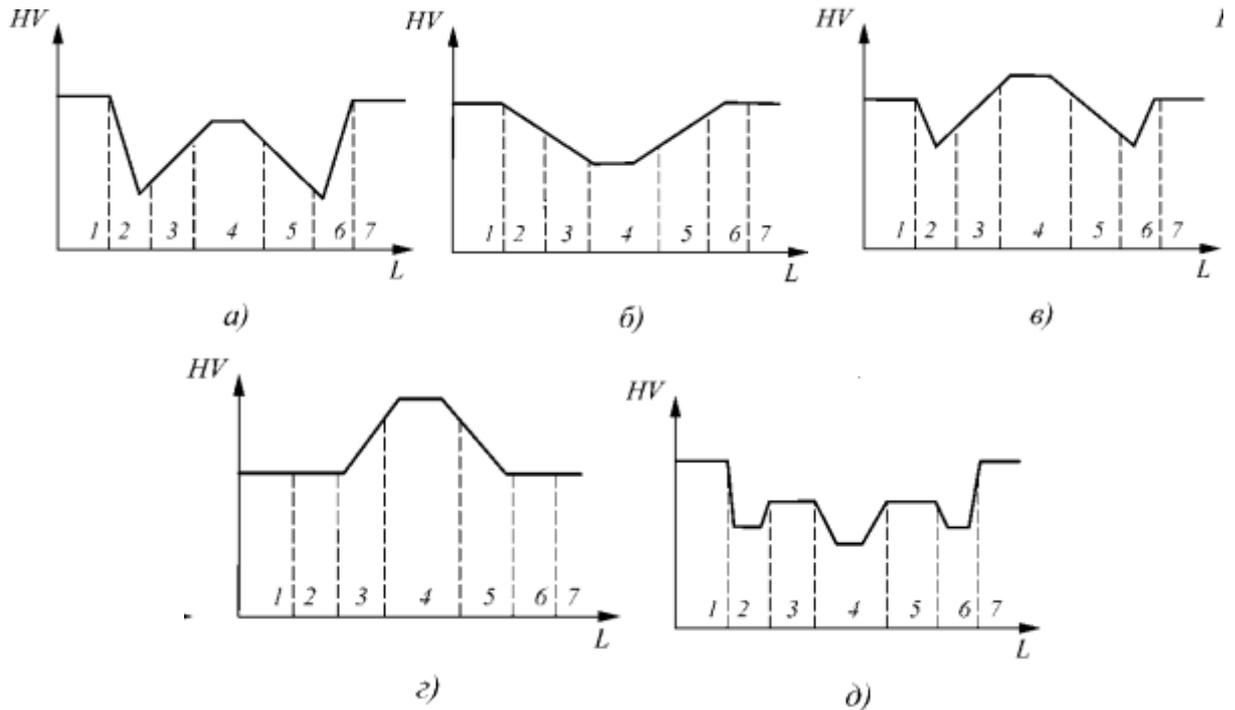


Рисунок 2.35 – Характер распределения микротвердости в сечении шва при сваривании различных материалов, режимов сваривания и положения по глубине:  
 1, 7 – исходный материал; 2, 6 – зона термического влияния;  
 3, 5 – термомеханическая зона; 4 – зона перемешивания

Можно выделить четыре основные зоны распределения твёрдости по поперечному сечению сварного шва:

- на протяжении ядра сварной точки 5...6 мм с каждой стороны линии соединения, в этой зоне твёрдость почти постоянна,
- зона термомеханического влияния (ЗТМВ) находится на протяжении 5÷6 мм от зоны ядра сварной точки, в ней твёрдость имеет пониженный уровень,
- зона термического влияния ЗТВ находится на протяжении 15...20 мм от ЗТМВ, здесь твёрдость достигает минимума, а затем увеличивается с увеличением расстояния от центра сварки и даже достигает твёрдости больше, чем основного металла,
- основной материал, не затронутый СТП.

В деформируемых алюминиевых сплавах большая часть упрочнения (естественное старение) происходит при комнатной температуре в течение одного дня. В целом механические свойства стабилизируются после четырёх дней. На рисун-

ке 2.36а показано изменение твердости материала после СТП, находившегося при комнатной температуре 1200 часов. Большая часть изменения твердости происходит в первую неделю. По истечении этого времени, твердость стабилизируется и материал достигает состояния равновесия. Распределение микротвердости алюминиевых сплавов и титана представлено на рисунке 2.36.

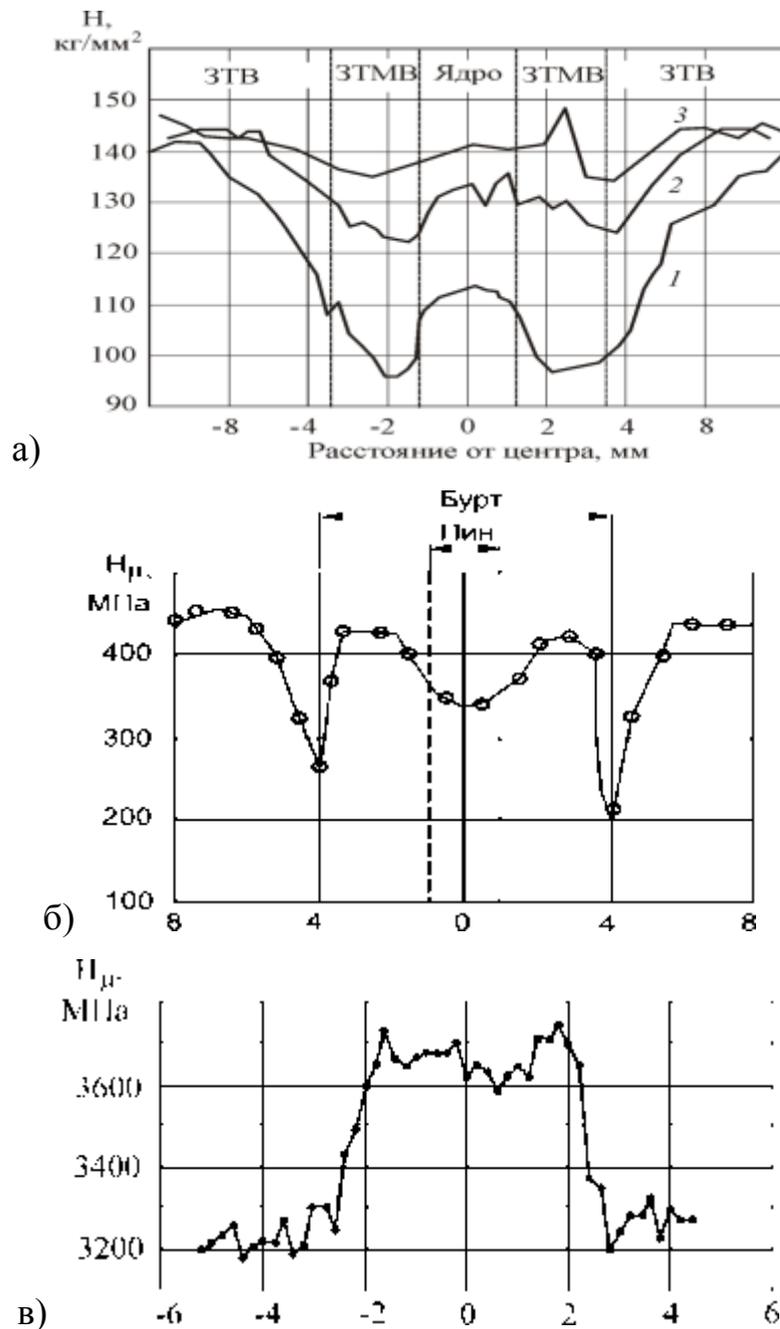


Рисунок 2.36 – Распределение микротвердости в сечении сварного шва:  
 а) изменение микротвердости после СТП сплава 1163 РДТВ в процессе естественного старения: 1 – 24 ч; 2 – 192 ч; 3 – 1200 ч; б) изменение твердости после ФС в зависимости от расстояния от линии сварки для алюминиевого сплава АМг6;  
 в) зависимость микротвердости от расстояния от центра шва, сплав ВТ6

На рисунке 2.37 приведена зависимость изменения микротвёрдости в ЗТВ и в ядре сварной точки с изменением частоты вращения инструмента.

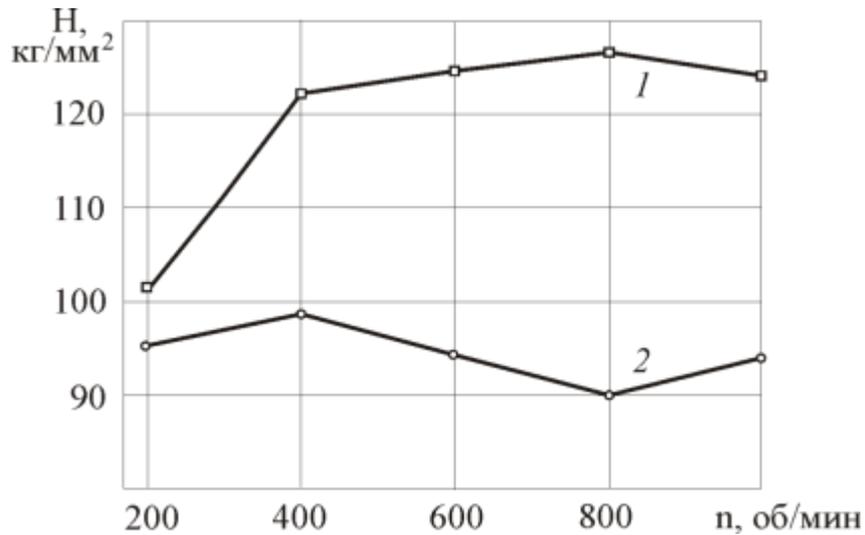


Рисунок 2.37 – Изменения микротвердости в зависимости от частоты вращения:  
1 – в «ядре» сварки; 2 – в зоне термического влияния

### 2.5.2 Анализ остаточных напряжений

Остаточные сварочные напряжения (ОСН) 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 регулирования - снижение, либо благоприятного перераспределения остаточных напряжений не может быть решена без данных о распределении ОСН. Получение этой информации расчетным путем затруднено большим разнообразием узконаправленных методик и отсутствием общего решения. Кроме того, расчет не в состоянии учесть всех особенностей сварочного процесса и всех случайных факторов. Поэтому во многих случаях предпочтительнее использовать способы непосредственного измерения ОСН.

В настоящей работе определение величины остаточных напряжений производилось рентгеновским способом по методике  $\sin^2\psi$  основанной на измерении деформации кристаллической решетки исследуемого объекта по смещению линий дифракционного спектра.

На рисунке 2.38 приведен характер распределения остаточных напряжений в поперечном сечении шва определенные методом рентгеновской дифракции.

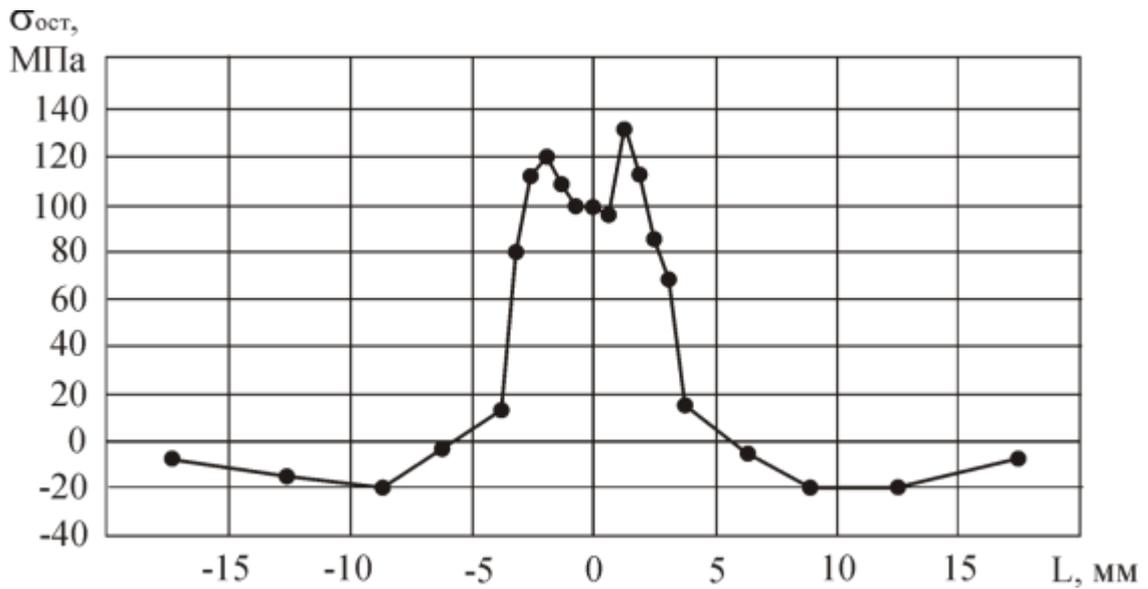


Рисунок 2.38 – Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении шва:

$n = 600$  об/мин,  $v = 150$  мм/мин. Алюминиевый сплав 1163 РДТВ

По результатам моделирования процесса в программе COSMOS SolidWorks получена картина напряженно-деформированного состояния с последующим определением остаточных напряжений (рисунок 2.39).

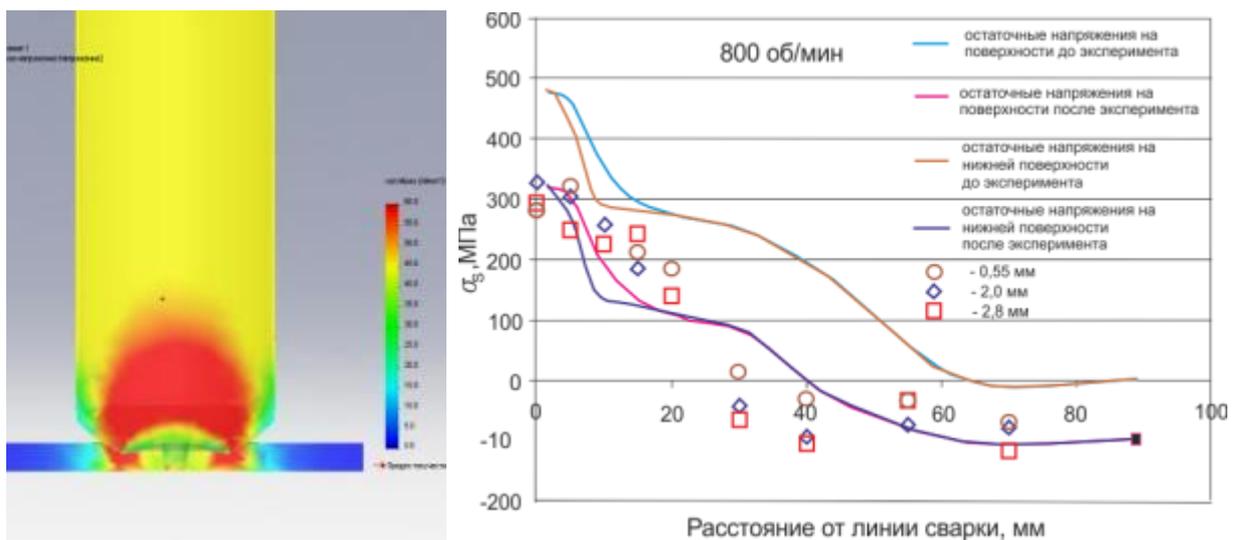


Рисунок 2.39 – Моделирование процесса СТП в системе COSMOS SolidWorks. Определение остаточных напряжений

### 2.5.3 Распределение температурных полей

Определение температурных полей осуществлялось на специальной установке ФС с применением пирометров «Проминь» и «ОПИР-017» при ФС алюминиевого сплава АМгб толщиной 2 мм.

В результате проведённого эксперимента были построены графики зависимостей значений температуры от расстояния от центра сварного шва и времени сварки (рисунок 2.40).

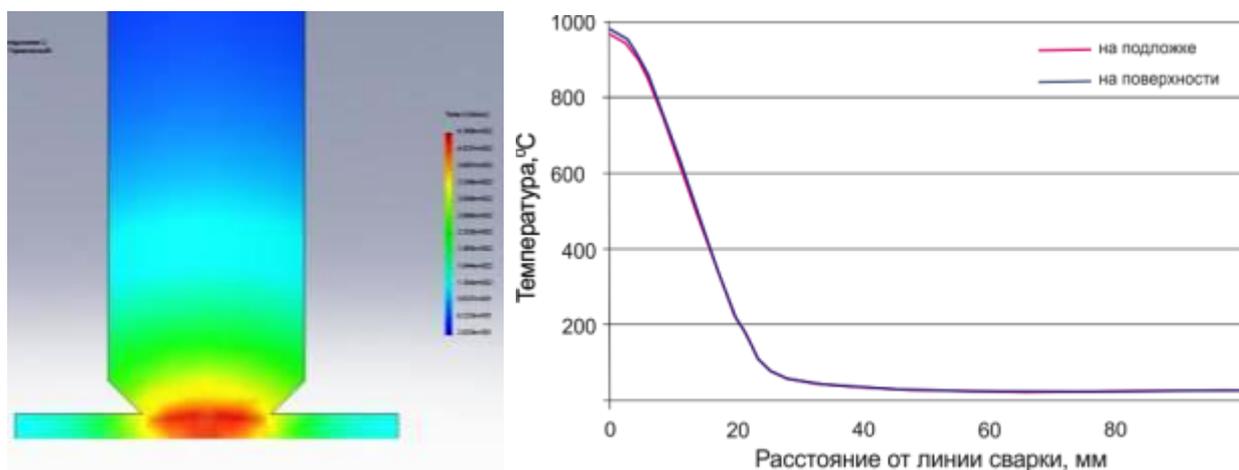


Рисунок 2.40 – Моделирование процесса СТП стали в программе COSMOS SolidWorks:  
распределение поля температур, график распределения температуры в зависимости от расстояния от линии сварки при СТП стали

## Выводы по главе 2

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

2. Проведены исследования и экспериментальная отработка и получены технологические рекомендации 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 выполнена оптимизация технологических режимов и условий сварки на примере сплава АМг6.

3. 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.

4. Исследования высокоскоростной сварки трением перемешивающей проводились на алюминиевом сплаве 1163 РДТВ показали возможность получения качественных швов на режимах  $n = 18000$  об/мин;  $v = 2000$  мм/мин.

6. Выполнены исследования СТП титана ВТ-6 ГОСТ 19807-91 и легированной стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72, позволившие установить особенности формирования сварных соединений и получить практический опыт выполнения технологических операций получения сварных швов.

7. На основе проведённого радиографического контроля на соответствие ГОСТ 7512-82 и ОСТ 92 8828-76 сварных швов после ФС проведена оптимизация технологических режимов и условий сварки титана ВТ-6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.

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

9. Исследована динамика восстановления свойств сварного шва в процессе естественного старения термоупрочняемого алюминиевого сплава 1163 РДТВ, установлено, что прочность шва после и старения составляет более 84% прочности основного материала.

### 3 Методика конструкторско-технологической обработки инструмента повышенной стойкости для сварки трением перемешиванием жаропрочных материалов

#### 3.1 Особенности конструкции инструмента для сварки трением перемешиванием

##### 3.1.1 Конфигурации рабочих частей инструментов

Одним из основных элементов, обеспечивающих качественную сварку трением, является применение инструмента из специальных сверхтвердых материалов, имеющих низкую теплопроводность, высокую теплостойкость и устраняющих его схватывания со свариваемым материалом для реализации массопереноса за счет деформационной составляющей силы трения, обеспечиваемой специальной геометрией инструмента (рисунок 3.1).

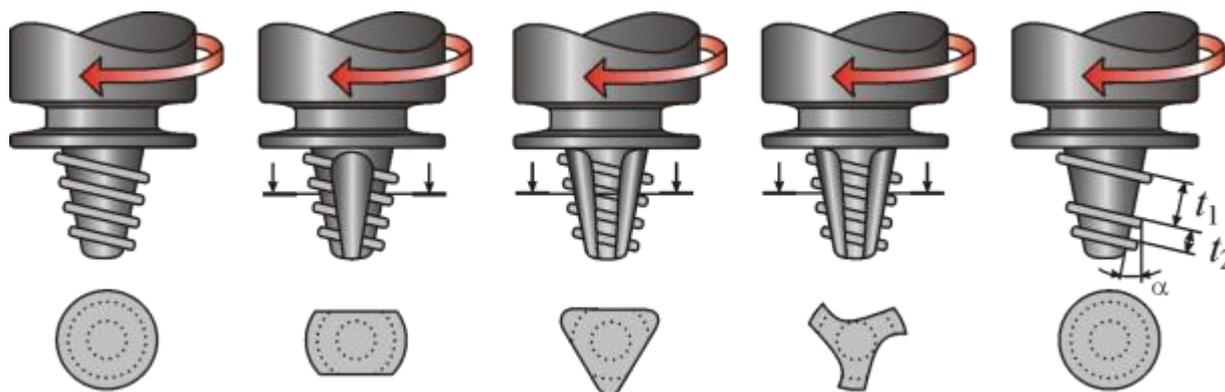


Рисунок 3.1 – Рабочие части инструментов, используемых при СТП

Условия вязкопластического течения и перемешивания свариваемого материала определяют качественные параметры сварного шва при сварке трением перемешиванием. 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.

*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.

Конструкции и пина и бурта могут иметь как простые геометрические формы, так и могут иметь сложное профилирование.

Для повышения качественных характеристик инструмента иногда используют технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. На поверхностях пина и бурта выполняют специальные профильные нарезки, обеспечивающие управление течением пластифицированного материала. Форма бурта может быть плоской, вогнутой или конической. Для СТП могут применяться сварочные инструменты с вращающимся буртом, со стационарным буртом, катушечные, с конусным пином, с изменяемой длиной пина, без пина.

В литературе описываются разнообразные конструкции рабочих частей инструментов для разных инструментальных и свариваемых материалов, толщин и форм [104, 108, 114, 112]. Поиск оптимальных форм идет, как правило, в ходе экспериментальной отработки (рисунок 3.2).

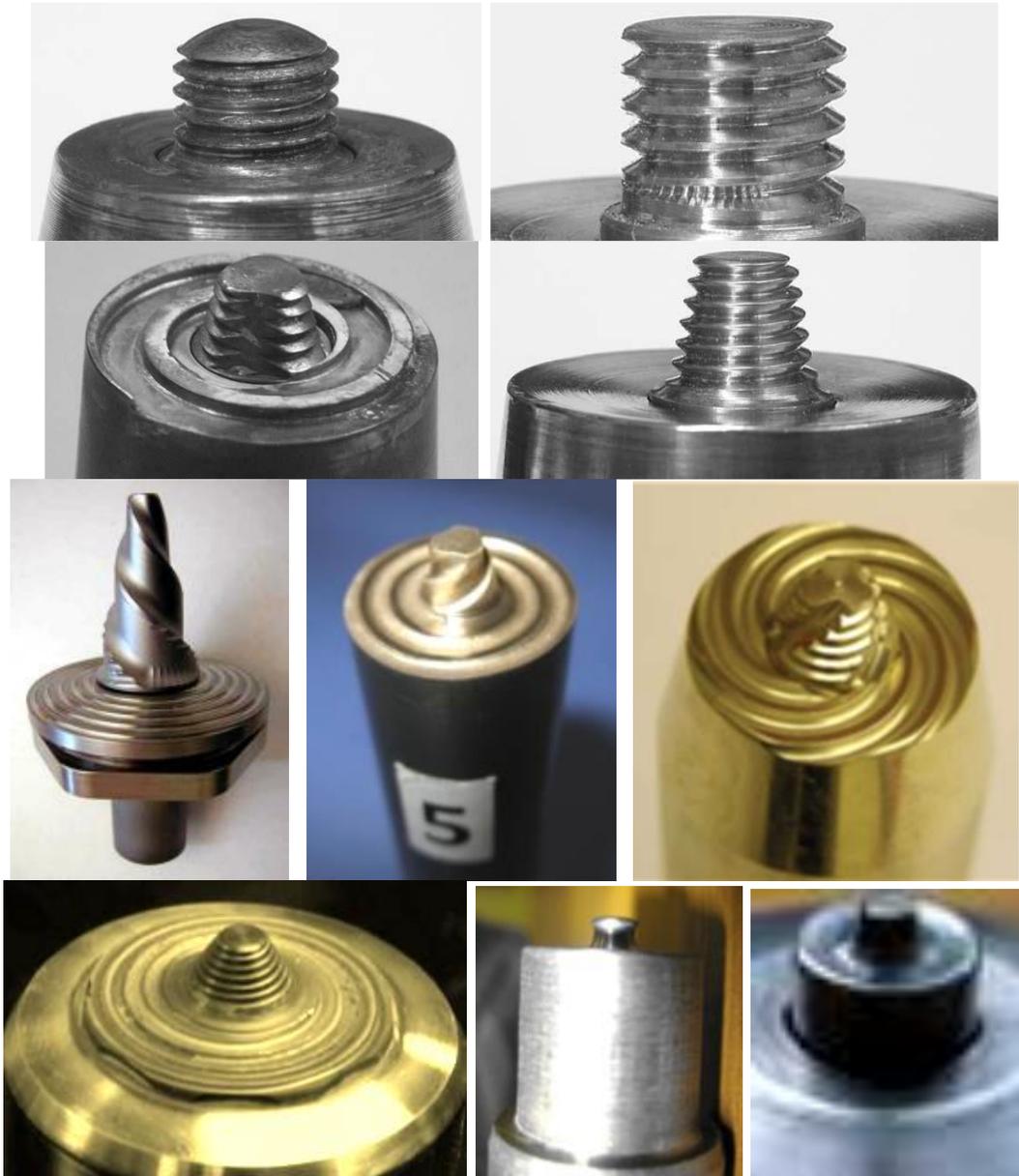


Рисунок 3.2 – Рабочие части инструментов для СТП

### 3.1.2 Инструментальные материалы для сварки трением с перемешиванием

Одним из основных элементов, обеспечивающих качественную сварку трением, является применение инструмента из специальных сверхтвердых материалов, имеющих низкую теплопроводность, высокую теплостойкость и устраняющих его схватывания со свариваемым материалом.

Материалы для изготовления инструментов для СТП:

- инструментальных сталей (сварка пластиков и легкоплавких металлов);
- быстрорежущих сталей (сварка алюминиевых и магниевых сплавов);
- металлокерамических твердых сплавов;

- минералокерамик;
- сверхтвердых материалов и композиционных сверхтвердых материалов (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах).

Для сварки используют инструменты из материалов, приведенных в таблице 3.1. При выборе инструментального материала стремятся избежать намазывания оттесняемого металла на поверхности инструмента.

Таблица 3.1 – Инструментальные материалы для сварки трением с перемешиванием

<i>Свариваемый материал</i>	<i>Толщина, мм</i>	<i>Материал инструмента</i>
Алюминиевые сплавы	<12	Инструментальные стали, твердые сплавы системы WC – Co
	>12	Сплавы на кобальто-никелевой основах (MP 159)*
Медь и медные сплавы	<50	Никелевые сплавы, кубический нитрид бора (КНБ), вольфрамовые сплавы
Титановые сплавы	<6	Вольфрамовые, вольфрамрениевые сплавы
Нержавеющие стали	<6	КНБ, вольфрамовые сплавы
Низкоуглеродистые стали	<12	твердые сплавы системы WC – Co, КНБ
Никелевые сплавы	<6	КНБ

\* MP159 многофазный сплав, имеющий уникальную комбинацию прочности (1600 МПа), вязкости ( $\delta = 12\%$ ), жаропрочности и жаростойкости. Сплав получают вакуумной индукционной плавкой с контролем процесса отверждения. Сохраняет высокую прочность до температуры 650 °С. Состав MP 159: Al — 0,20%; Cr — 19,0%; Co — 35,7%; Fe — 9,0%; Mo — 7,0%; Ni — 25,5%; Nb, Cb — 0,60%; Ti — 3,0%.

При выборе инструментального материала стремятся избежать намазывания оттесняемого металла на поверхности инструмента.

При выборе материала инструмента решающую роль играют термопрочностные характеристики свариваемых материалов (рисунок 3.3).

*Алюминиевые магниевые и медные сплавы, пластики:*

- быстрорежущие стали, твердые сплавы системы WC-Co,
- сплавы тугоплавких металлов (Mo, W)

*Стали, никелевые и титановые сплавы:*

- твердые сплавы на тугоплавких и жаростойких связках,
- сверхтвердые композиты на основе кубического нитрида бора КНБ.

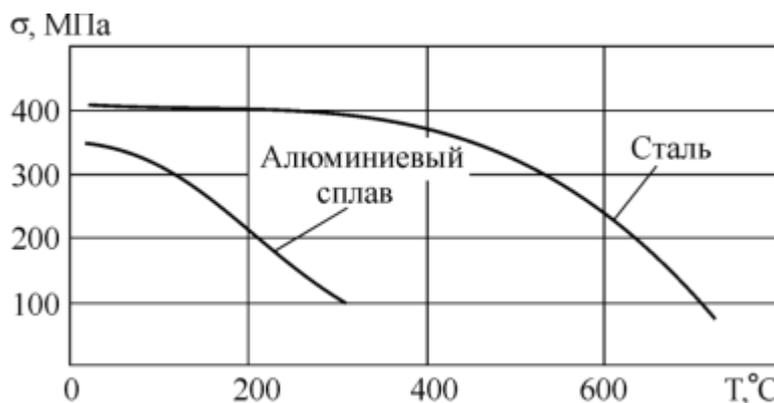


Рисунок 3.3 – Различия в термопрочностных характеристиках свариваемых материалов

Материал инструмента должен иметь высокую жаростойкость, твердость и жаропрочность, сопротивление изнашиванию, низкую теплопроводность. В особой мере это относится к материалам инструмента, предназначенного для сваривания сталей, титановых и никелевых сплавов и др.

Для качественной перемешивающей сварки трением железных, никелевых и других тугоплавких сплавов требуется особое внимание к выбору конфигурации инструмента и контролю режимов процесса.

### 3.2 Оптимизация конструкции рабочей части инструмента для сварки трением с перемешиванием на основе численного моделирования вязкого течения материала в зоне обработки

#### 3.2.1 Параметрическое моделирование конструкции инструмента с учетом физико-механических особенностей формирования шва

Механизмы генерации тепла между пином инструмента и заготовкой определяется составляющими энергии трения и энергии пластификации, доли которых зависят от того, какой процесс превалирует: скольжение или перемешивание. Доля тепловыделения от деформационного нагрева вокруг пина инструмента оценивается в диапазоне от 2% до 20%.

Эмпирические рекомендации по выбору параметров сварки показывают, что более горячие швы при высоких оборотах и низких скоростях подачи, а холоднее швы при низких оборотах и высокой скорости движения.

Температурное поле вокруг штыря инструмента является асимметричным, несколько более высокие температуры на задней стороне (по ходу движения инструмента). Чтобы избежать перегрева при сварке на повышенных скоростях вращения ( $>15000$  об/мин) с успехом применяются инструменты со стационарным буртом (не вращающемся).

Для модельных экспериментов и отработки условий сварки трением с перемешиванием были разработаны 3D модели инструментов различной конфигурации (рисунок 3.4) [44, 45].

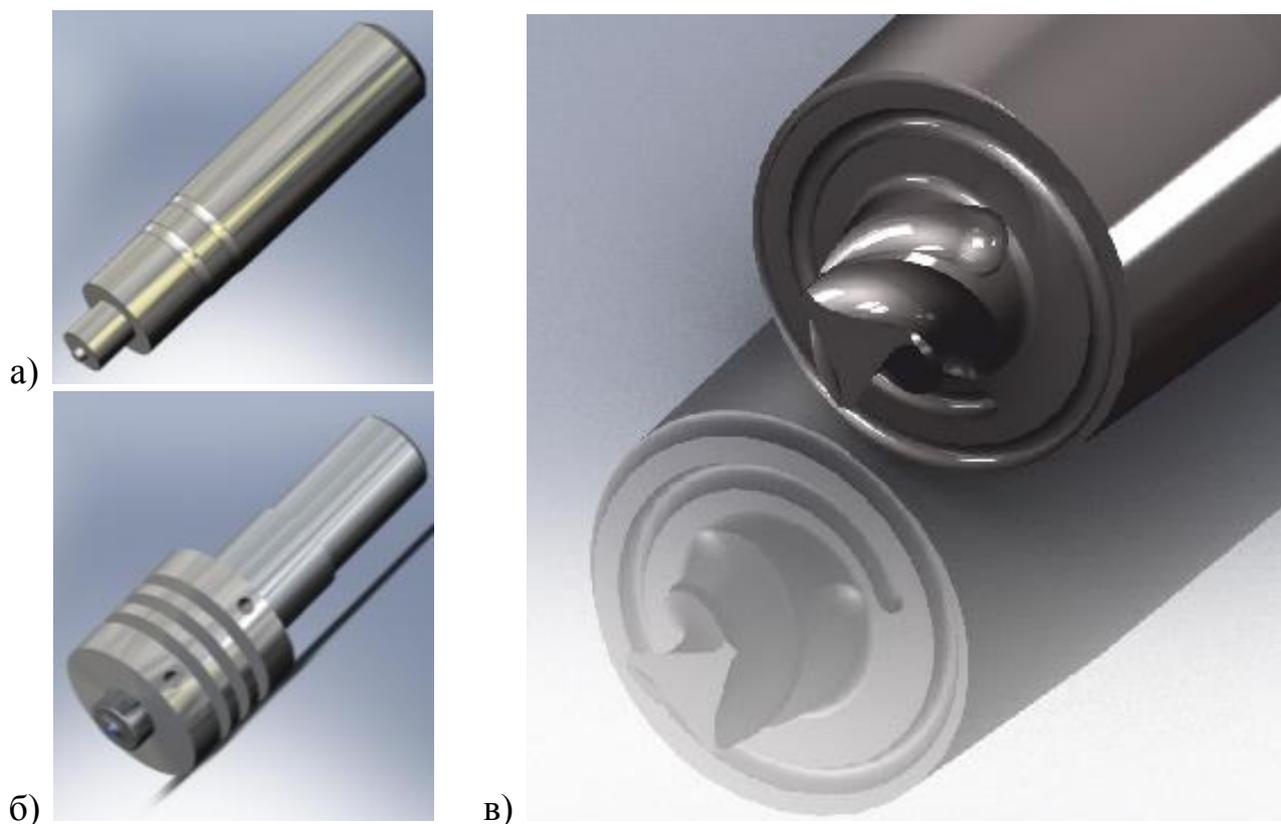


Рисунок 3.4 – 3D модели инструментов СТП, спроектированные для отработки режимов и условий СТП: а) с цилиндрическим штифтом; б) с коническим штифтом и вогнутым буртом; в) с коническим штифтом и плоским буртом со спиральными канавками

Конструкция инструмента рассчитывалась по специальной методике с учётом обеспечения отсутствия в сварном шве дефектов, ухудшающих прочностные свойства получаемого соединения:

- пустоты сварного шва,

- дефект задержки оксида,
- непровар в корне шва.

*Пустоты сварного шва* формируются из-за недостаточного давления уплотнения (проковки) материала в стыке деталей. На это большое влияние оказывает конструкция штифта и бурта инструмента. Если диаметр штифта, при определённых факторах, больше необходимого, материал будет охлаждаться раньше полного заполнения сварного шва. Если диаметр бурта, при определённых условиях, меньше необходимого для генерации достаточного количества тепла или его конструкция спроектирована не верно, то материал будет течь неправильно, что приведёт к образованию пустот.

*Дефект задержки оксида* связан с наличием остатка окисной плёнки в сварном шве с поверхности соединяемых деталей. На данный дефект влияние оказывает конструкция бурта инструмента (слишком большой диаметр).

*Непровар* в корне шва происходит из-за не правильной длины штифта (когда конец штифта расположен на большом расстоянии от подложки). Таким образом, недеформированной остаётся область материала между торцом штифта и подложкой.

### 3.2.2 Моделирование тепломеханических и вязкотекучих процессов перемешивающей сварки трением

Моделирование вязкопластического течения в условиях перемешивания инструментом разной конфигурации является инструментом для определения эффективных конструкций пина и бурта в условиях сварки конкретных материалов и толщин.

Проектирование конструкции инструмента осуществлялась в системе автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks с созданием 3D-моделей инструментов. Моделирование процесса перемешивающей сварки трением выполнялось с использованием приложения COSMOS FloWORKS. Cosmos FloWorks предназначен для:

- проведения расчетов силового (стационарного или нестационарного) воздействия текучей среды, движущейся относительно некоторого твёрдого тела, на это тело или его элементы (на конструкцию или её элементы);
- расчета воздействия (стационарного или нестационарного) твёрдого тела на текучую среду;
- расчёта воздействия различных физических факторов на состав и направление движения текучей среды.
- решения задач сопряжённого теплообмена;
- определения эффективности нагрева или охлаждения текучей среды твёрдыми телами;
- расчёта движения твёрдых или жидких частиц в рассчитанном поле течения газа.

В проекте сварки трением данная программа использовалась для определения результата воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду (свариваемый материал) (рисунок 3.5).

В целях согласования неразрывного течения материала при перемешивании конструкция спиралевидных элементов пина непосредственно связана с такими параметрами технологической схемы движения инструмента как подача и число оборотов инструмента. Определяющим в технологической схеме сварки трением перемешиванием является суперпозиция поступательного и вращательного движений инструмента, то построение модели вязкопластического перемешивания жидкости твердым профилированным телом будет опираться на параметрическое определение спирали и циклоиды (рисунок 3.6). Наряду с кинематическими параметрами, связанными со спиральной геометрией пина, определяющим будет условие неразрывности потока при экструзии вязкой жидкости.

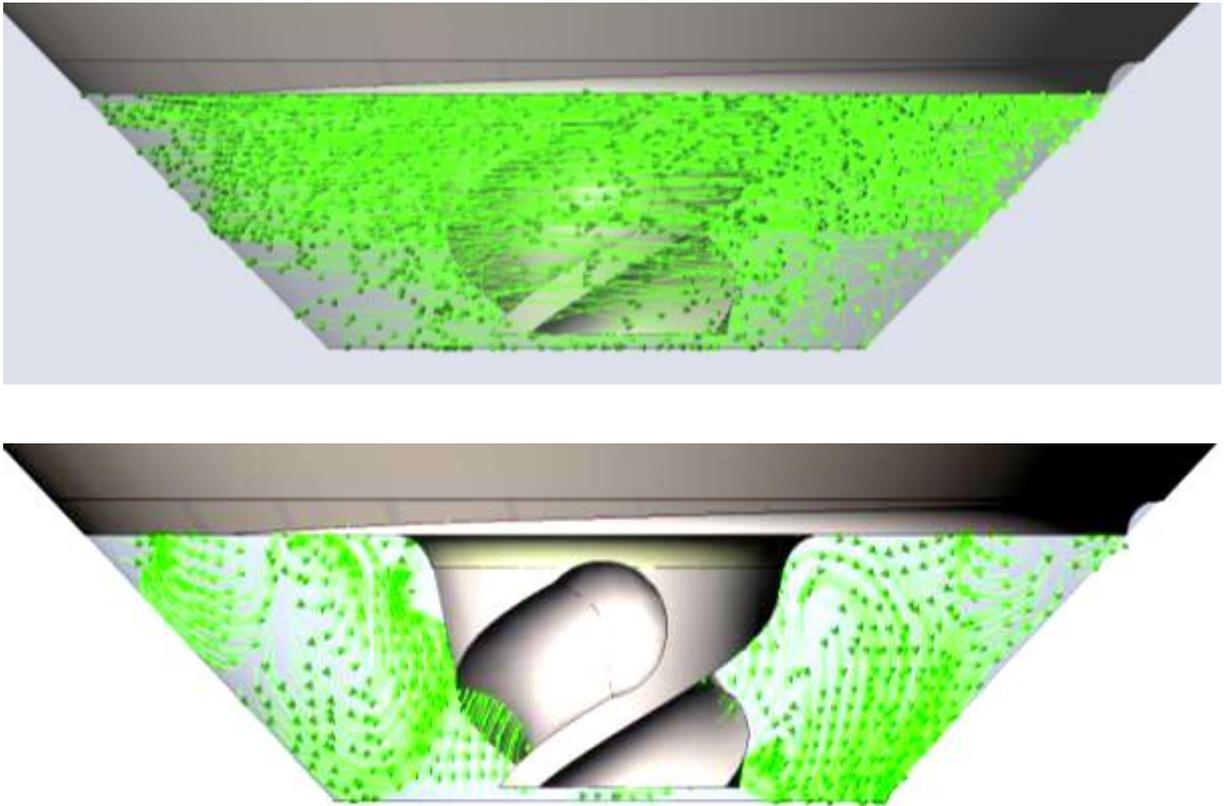
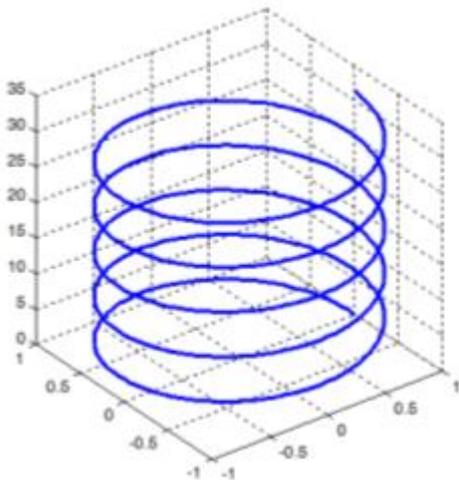
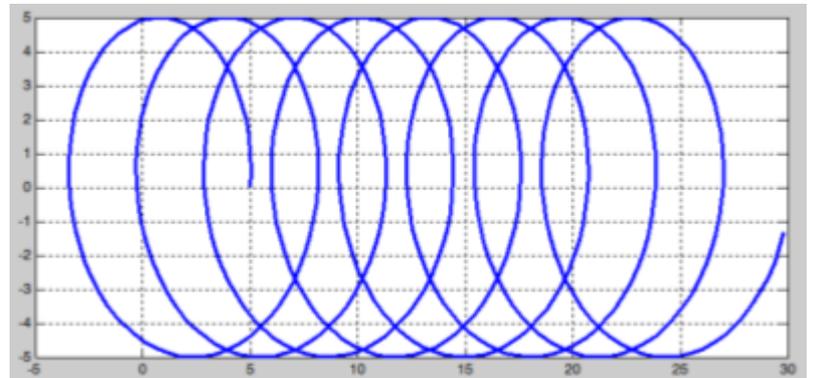


Рисунок 3.5 – Моделирование воздействия твёрдого тела (инструмента) на вязкопластичную среду (свариваемый материал)



```
t=0:pi/50:10*pi;
x = cos(t);
y = sin(t);
z=t
```



```
R=5;
t=0:0.1:50;
x=R*cos(t)+0.5*t;
y=R*sin(t)
```

Рисунок 3.6 – Система уравнений параметрического описания движения элементарного объема материала при суперпозиции вращательного и поступательного рабочих движений инструмента с учетом спиральной нарезки инструмента

Моделирование распределение тепловых полей в зоне сварки выполнено при решении задач теплообмена между материалом, инструментом и оснасткой на примере алюминиевого сплава АМГ-6 толщиной 6 мм:  $R_o = 12$  мм,  $R_p = 3$  мм,  $n = 600$  об/мин;  $v = 350$  мм/мин (рисунок 3.7).

Спроектированные модели инструментов подвергались прочностному анализу в системе SolidWorks – COSMOSWORKS (рисунок 3.8).

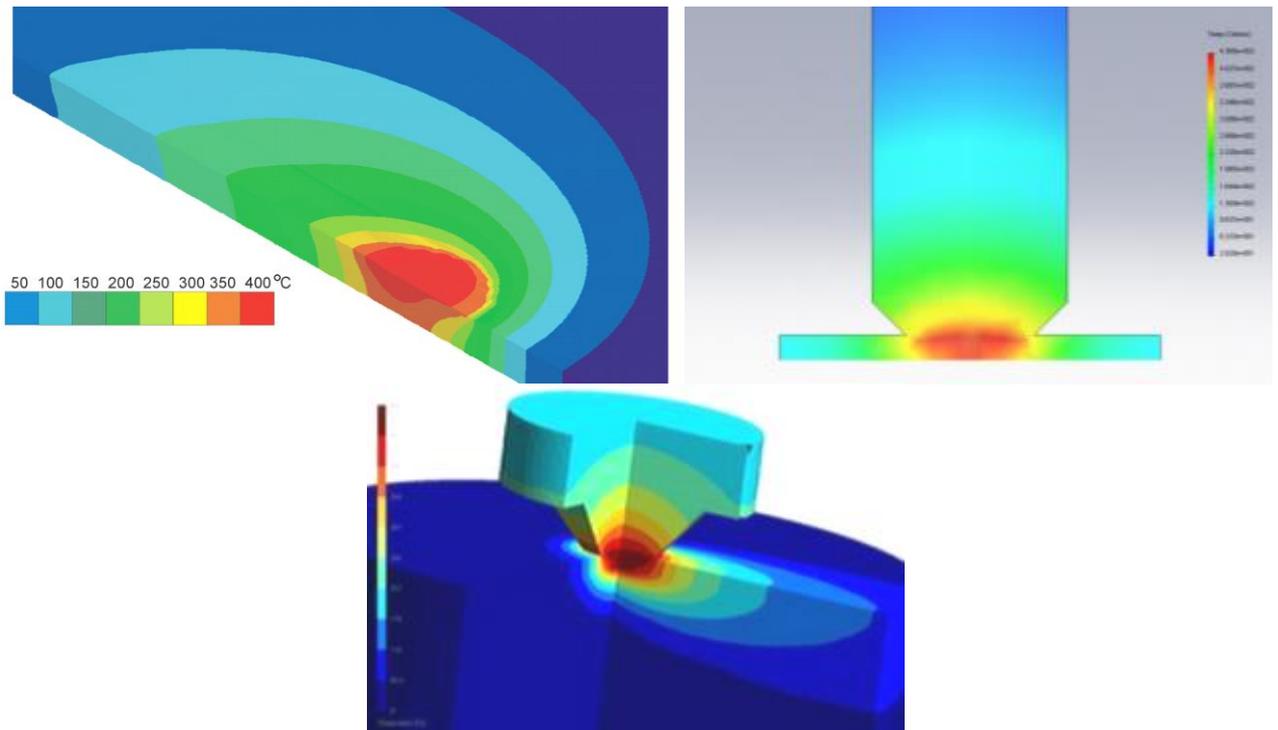


Рисунок 3.7 – Поле температур при сварке алюминиевого сплава АМГ-6 толщиной 6 мм:  $R_o = 12$  мм,  $R_p = 3$  мм,  $n = 600$  об/мин;  $v = 350$  мм/мин

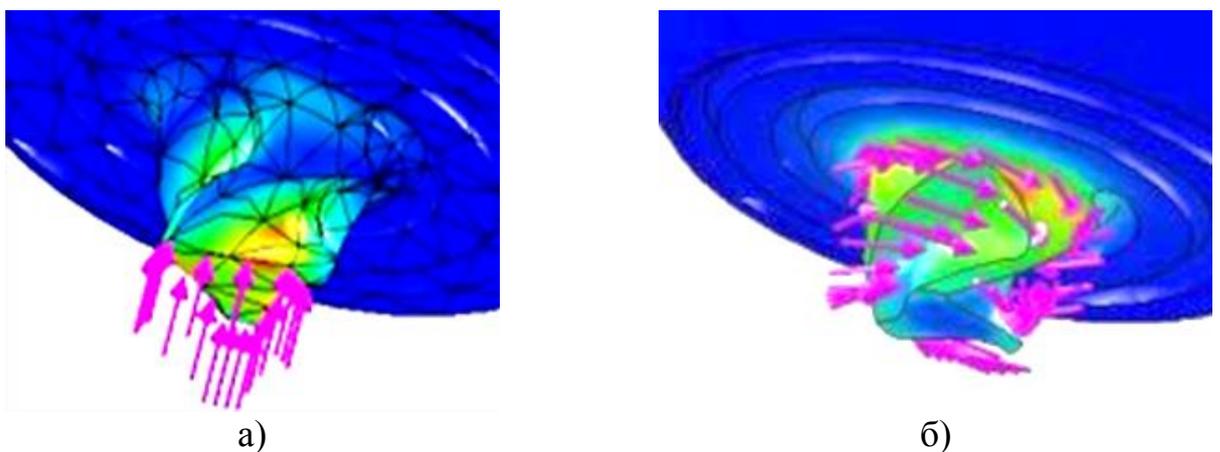


Рисунок 3.8 – Проведение прочностного анализа элементов конструкции инструмента СП:

- а) на действие нагрузок в осевом направлении;
- б) на действие крутящего момента

С использованием теории подобия решена проблема разработки критериальных зависимостей, позволяющих использовать экспериментальные результаты, полученные при сварке малоразмерных образцов для проектирования процессов сваривания конкретных изделий другой толщины и из других материалов с учетом масштабных факторов и коррекций технологических режимов. Был установлен ряд расчетных критериев, являющихся ноу-хау разработчиков, позволяющих решить эту проблему. Особую важность она имеет при разработке нового промышленного оборудования и расчета его необходимых технических показателей [25, 44, 45, 78-80].

Модельные эксперименты показали, что наиболее оптимальной формой в производственных условиях является сложная геометрия, сочетающая в себе спиралевидные канавки круглого сечения двух видов шага и диаметра (рисунок 3.9).

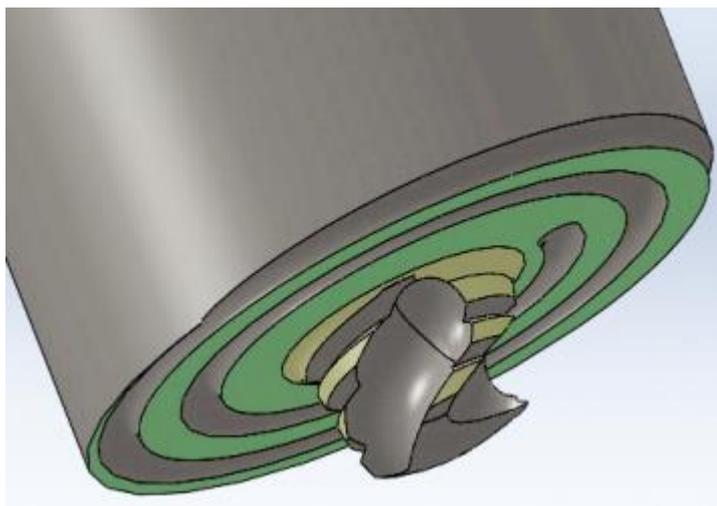


Рисунок 3.9 – Модель расположения спиральных канавок инструмента для СТП с рабочей частью спиралевидной формы

### 3.2.3 Экспериментальная отработка сварочного инструмента

Для экспериментальной отработки рабочей части сварочного инструмента, а также режимов и условий СТП были спроектированы и изготовлены опытные образцы инструментов с разной конструкцией рабочей части (рисунок 3.10).

Среди изготовленных инструментов, опытным путём выбирали наиболее эффективный, способный производить соединение с наибольшими прочностными

характеристиками. Для этого каждый инструмент испытывался при определённом сочетании режимов сварки (числа оборотов и скорости подачи).

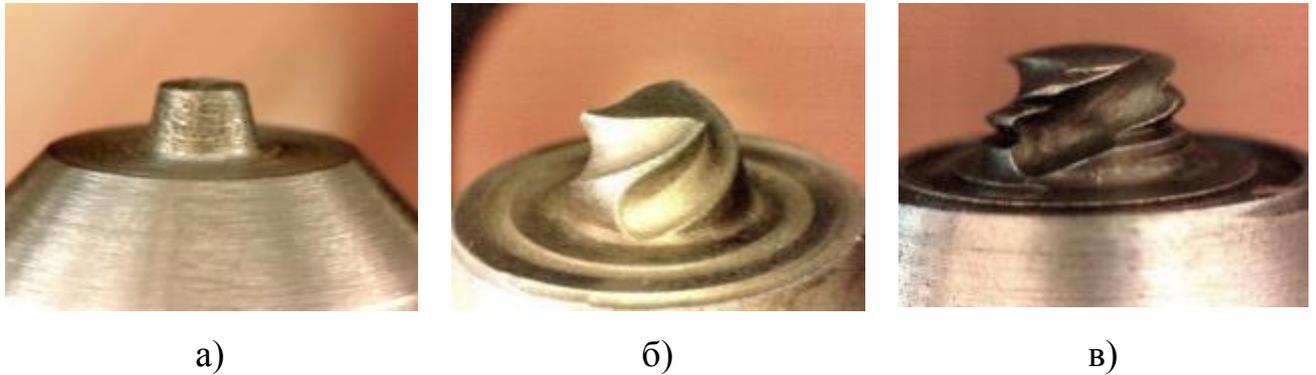


Рисунок 3.10 – Инструменты, изготовленные для отработки режимов и условий СТП:

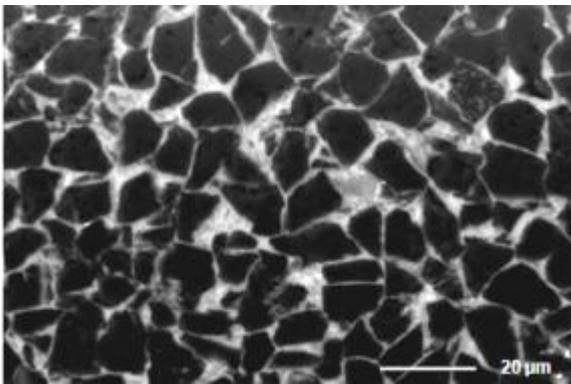
- а) со штифтом в форме усечённого конуса и плоским буртом с поднутрением;
- б) плоским буртом с концентричной спиральной канавкой, со штифтом в форме усечённого конуса с тремя спиральными канавками;
- в) плоским буртом с концентричной спиральной канавкой, со штифтом в форме усечённого конуса с тремя спиральными канавками и спиральной насечкой

На основе разработанной конструкции были спроектированы и изготовлены инструменты для сварки образцов различной толщины, обеспечивающие сваривание образцов в соответствии с требованиями чертежей заказчика (рисунок 3.11).

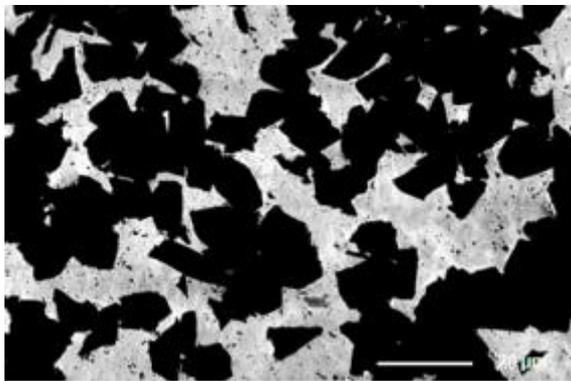


Рисунок 3.11 – Опытные образцы инструмента СТП с рабочей частью спиралевидной формы

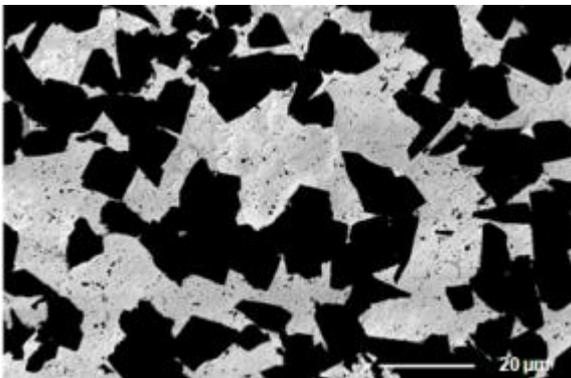
При экспериментальной отработке использовались инструментальные стали (сварка пластиков и легкоплавких металлов), быстрорежущие стали (сварка алюминиевых и магниевых сплавов), металлокерамические твердые сплавы, минералокерамика, твердые сплавы на тугоплавких и жаростойких связках, сверхтвердые композиты на основе кубического нитрида бора КНБ (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах). Эти материалы имеют высокую твердость и износостойкость, но обладают высокой хрупкостью, что ограничивает их применение для изготовления инструмента для сварки трением (рисунок 3.12).



Материал MS80  
на керамической матрице  
на алюминиевой основе.  
(80 % КНБ)



Материал Q70  
на металлической матрице  
сплава W-Re.  
(70% КНБ).



Материал Q60  
на металлической матрице  
сплава W-Re.  
(60% КНБ).

Рисунок 3.12 – Перспективные материалы для изготовления инструмента СТП сталей, никелевых и титановых сплавов

Апробация различных материалов позволила расширить спектр геометрии рабочей части инструмента (рисунки 3.13, 3.14) [21].



Рисунок 3.13 – Заготовки из кубического нитрида бора и жаростойких керамик, используемые для изготовления инструмента для сварки сталей, никелевых и титановых сплавов

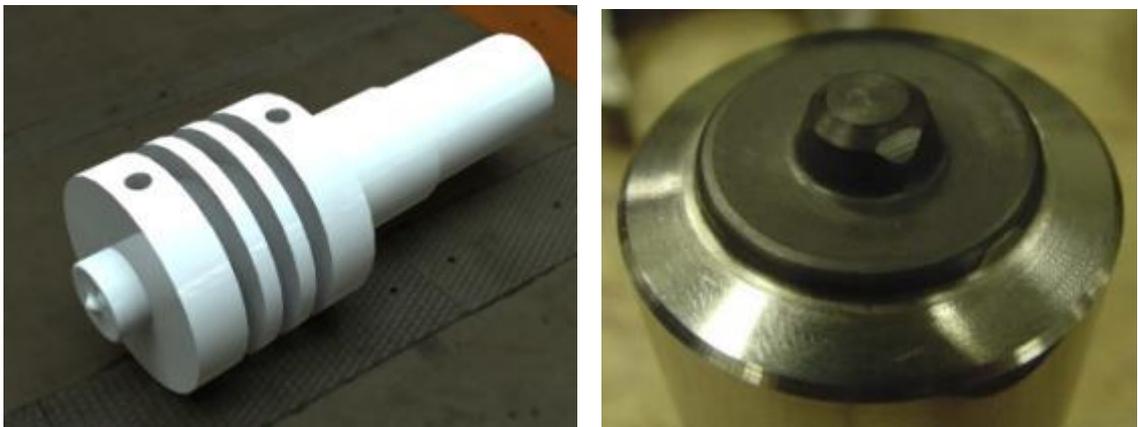


Рисунок 3.14 – Инструмент для сварки трением из сверхтвердых жаростойких композитов и керамик, конструкции ОАО «ВНИИАЛМАЗ»

#### 3.2.4 Новые технические решения конструкции инструмента

В качестве перспективных конструкций инструмента предложены новые концепции геометрии рабочих частей инструмента, в том числе геометрия, изменяемая в ходе рабочего процесса [71]:

- скошенный бурт (рисунок 3.15, а);

- ступенчатый бурт (рисунок 3.15, б);
- спиралевидный ступенчатый пин и бурт (рисунок 3.16);
- сменный наконечник (пин) (рисунок 3.17);
- убираемый наконечник (пин) (рисунок 3.17, 3.18).

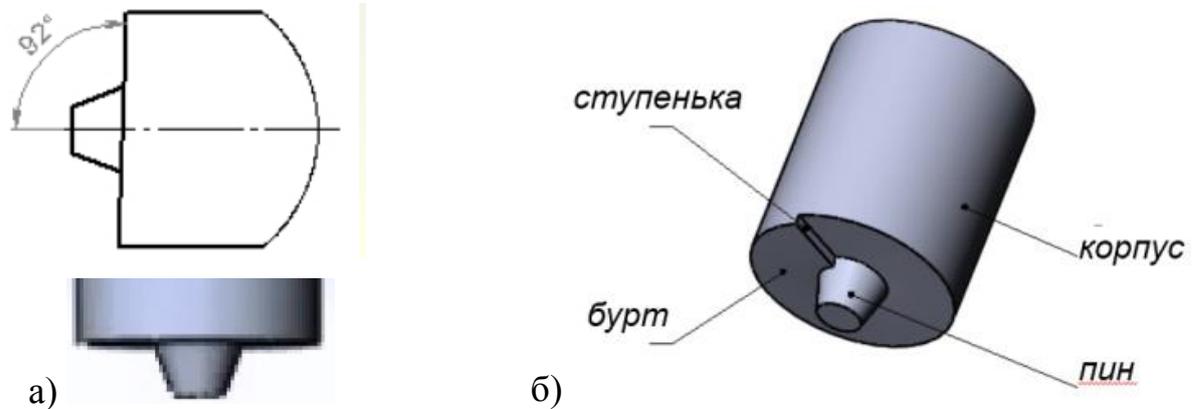


Рисунок 3.15 – Концепт-модель инструмента с перспективной геометрией:  
а) скошенный бурт; б) ступенчатый бурт

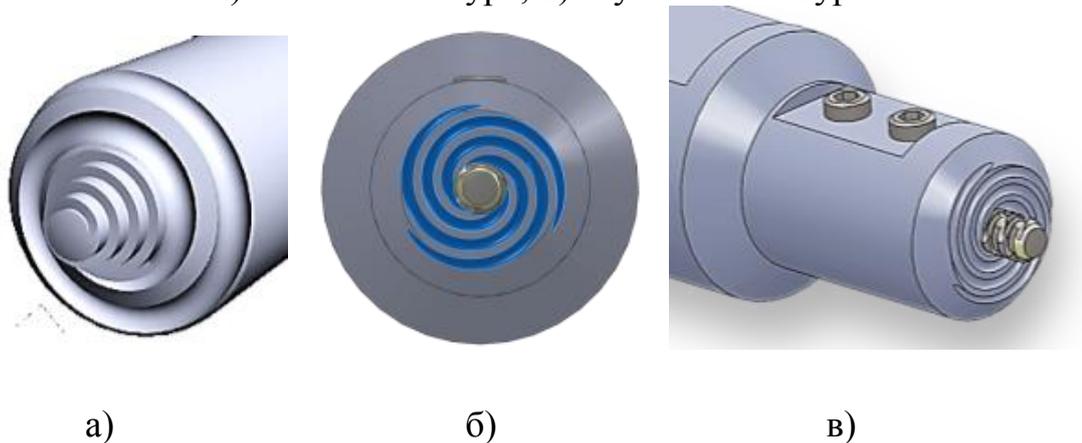


Рисунок 3.16 – Инструмент с перспективной геометрией:  
а) спиралевидный ступенчатый бурт;  
б) трехзаходная винтовая канавка бурта;  
в) сменный пин и трехзаходный бурт



Рисунок 3.17 – Концепт-модель инструмента с перспективной геометрией:  
сменный и убираемый наконечник

*Технические решения проблем технологических отверстий  
и краевых эффектов*

В качестве прогрессивного специального оснащения разработана модель шпиндельного узла с регулируемым профильным наконечником (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Шпиндельный узел для инструмента с регулируемым профильным наконечником (3D модель)

### 3.3 Ресурсные испытания специального инструмента при сварке трением с перемешиванием жаропрочных материалов

#### 3.3.1 Физико-механические и технологические требования, предъявляемые к инструменту

Высокие эксплуатационные характеристики инструментов СТП в значительной степени зависят от качества материала, из которого они сделаны. Материалы, предназначенные для инструмента СТП, должны по ряду показателей значительно превосходить свариваемые материалы.

Основные требования, предъявляемые к материалу инструмента СТП:

*Теплостойкость.* При СТП выделяется большое количество теплоты, при этом штифт и прижимной бурт инструмента нагревается. Температура инструмента зависит от условий, при которых ведётся СТП свариваемого материала, и может достигать 1300 °С (при сварке нержавеющей сталей). Необходимо, чтобы при значительных температурах сварки твёрдость поверхностей инструментов существенно не уменьшалась. Материал для инструмента должен обладать высокой теплостойкостью, т.е. способность материала сохранять высокую твёрдость при повышенных температурах и исходную твёрдость после охлаждения

*Износостойкость.* Материал инструмента СТП должен иметь высокую износостойкость при повышенной температуре, т.е. обладать хорошей сопротивляемостью истиранию при СТП.

*Высокая прочность и твердость.* Важным требованием является достаточно высокая прочность инструментального материала. Если высокая твёрдость материала рабочей части инструмента ФС сопровождается значительной хрупкостью, это приводит к поломке и выкрашиванию штифта инструмента.

*Технологичность.* Материал должен обладать хорошими технологическими свойствами, обеспечивающими оптимальные условия изготовления из него инструментов, в том числе сложнопрофилированных.

### 3.3.2 Экспериментальное определение ресурса инструмента различных инструментальных материалов

С целью оценки эффективности инструментального материала, наиболее пригодного для СТП сплавов ВТ6 и 12Х18Н10Т образцов толщины 2 мм были проведена серия ресурсных испытаний макетных образцов инструмента из твердого сплава А04 ТУ 48-4205-90-2010 (аналог ВК8) и Н10F Sandvik Coromant (аналог ВК20-ОМ) и вольфрам-рениевого сплава ВР25 ТУ 48-19-274-77 [78-80]. Особенности физико-механических характеристик данных материалов отмечены в п.2.3. настоящей работы.

Геометрические характеристики инструментов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Геометрические размеры, шероховатость инструмента для проведения ресурсных испытаний СТП

№	Материал Инструмента ФС	Высота пина h1, 2,0-0,1 мм	Основание пина d1, 4,5-0,1 мм	Вершина пина d2, 2,5-0,1 мм	Шероховатость Ra≤0,8 мкм
1.1	BP25 ТУ 48-19-274-77	1,97	4,43	2,46	0,75
1.2		1,95	4,47	2,47	0,77
1.3		1,93	4,44	2,42	0,78
1.4		1,95	4,48	2,43	0,79
1.5		1,94	4,45	2,46	0,76
1.6		1,95	4,44	2,44	0,79
1.7		1,94	4,47	2,43	0,75
1.8		1,94	4,46	2,45	0,77
1.9		1,98	4,46	2,48	0,78
1.10		1,96	4,47	2,45	0,76
2.1	A04 ТУ 48 -4205-90-210	1,95	4,46	2,45	0,77
2.2		1,93	4,44	2,48	0,76
2.3		1,95	4,47	2,45	0,79
2.4		1,95	4,46	2,46	0,76
2.5		1,92	4,45	2,44	0,79
2.6		1,94	4,46	2,44	0,79
2.7		1,95	4,47	2,43	0,75
2.8		1,93	4,44	2,45	0,77
2.9		1,92	4,47	2,48	0,78
2.10		1,96	4,46	2,45	0,76
3.1	H10 F Sandvik Coromant	1,96	4,44	2,47	0,77
3.2		1,97	4,44	2,44	0,78
3.3		1,98	4,46	2,46	0,76
3.4		1,98	4,47	2,44	0,79
3.5		1,95	4,45	2,43	0,75
3.6		1,96	4,44	2,45	0,77
3.7		1,97	4,47	2,48	0,78
3.8		1,98	4,46	2,45	0,76
3.9		1,95	4,46	2,44	0,79
3.10		1,96	4,47	2,43	0,75

Методика ресурсных испытаний включала: сварку образцов из ВТ6 или 12Х18Н10Т на длине 100 мм с подобранными технологическими режимами (см. таблицу 2.11); регистрацию полученной длины шва (таблицы 3.3 и 3.4); измерение износа инструмента с помощью инструментального микроскопа (таблицы 3.5 и 3.6).

Таблица 3.3 – Результаты ресурса работы инструмента СТП образцов из ВТ6 ГОСТ 19807-91

№ опыта	Материал инструмента СТП	Длина сварного шва, м
1.1	ВР25 ТУ 48-19-274-77	5,9
1.2		5,7
1.3		5,4
1.4		5,7
1.5		5,3
2.1	А04 ТУ 48 -4205-90-210	0,2
2.2		Разрушение
2.3		0,2
2.4		0,2
2.5		Разрушение
3.1	Н10 F Sandvik Coromant	0,5
3.2		0,6
3.3		0,7
3.4		0,7
3.5		0,5

Таблица 3.4 – Результаты ресурса работы инструмента СТП образцов из 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72

№ опыта	Материал инструмента СТП	Длина сварного шва, м
1.6	ВР25 ТУ 48-19-274-77	5,2
1.7		4,8
1.8		5,0
1.9		5,1
1.10		4,7
2.6	А04 ТУ 48 -4205-90-210	Разрушение
2.7		Разрушение
2.8		Разрушение
2.9		Разрушение
2.10		Разрушение
3.6	Н10 F Sandvik Coromant	0,5
3.7		0,4
3.8		0,3
3.9		0,5
3.10		Разрушение

Таблица 3.5 – Результаты контроля износа инструмента ФС АЛНФ.715113.004-01 после сварки образцов из ВТ6 ГОСТ 19807-91

№	Материал инструмента СТП	Высота пина h1, 2,0-0,1 мм	Основание пина d1, 4,5-0,1 мм	Вершина пина d2, 2,5-0,1 мм	Шероховатость Ra≤0,8 мкм
1.1	ВР25 ТУ 48-19-274-77	1,49	3,77	1,14	6,3
1.2		1,54	3,82	1,20	6,3
1.3		1,55	3,95	1,22	6,3
1.4		1,54	3,80	1,25	6,3
1.5		1,55	3,95	1,21	6,3
2.1	А04 ТУ 48 -4205-90-210	1,45	3,54	1,45	6,3
2.2		-	-	-	-
2.3		1,47	3,60	1,50	6,3
2.4		1,45	3,58	1,46	6,3
2.5		-	-	-	-
3.1	Н10 F Sandvik Coromant	1,56	3,75	1,30	6,3
3.2		1,57	3,65	1,43	6,3
3.3		1,55	3,70	1,46	6,3
3.4		1,54	3,68	1,30	6,3
3.5		1,56	3,76	1,43	6,3

Таблица 3.6 – Результаты контроля износа инструмента ФС АЛНФ.715113.004-01 после сварки образцов из 12X18H10T ГОСТ 5632-72

№	Материал инструмента СТП	Высота пи- на h1, 2,0- 0,1 мм	Основание пи- на d1, 4,5-0,1 мм	Вершина пина d2, 2,5-0,1 мм	Шероховатость Ra≤0,8 мкм
1.6	ВР25 ТУ 48-19-274-77	1,47	3,70	1,17	6,3
1.7		1,50	3,75	1,15	6,3
1.8		1,51	3,71	1,17	6,3
1.9		1,48	3,78	1,20	6,3
1.10		1,47	3,74	1,15	6,3
2.6	А04 ТУ 48 -4205-90-210	-	-	-	-
2.7		-	-	-	-
2.8		-	-	-	-
2.9		-	-	-	-
2.10		-	-	-	-
3.6	Н10 F Sandvik Coromant	1,46	3,69	1,37	6,3
3.7		1,49	3,72	1,40	6,3
3.8		1,51	3,73	1,41	6,3
3.9		1,46	3,68	1,39	6,3
3.10		-	-	-	-

Если в процессе измерений определена незначительная величина износа рабочей части испытуемого инструмента, то выполнялось продолжение операции. Инструмент для снимался с испытаний в случае: а) износа рабочей части более 0,5 мм; б) визуально видимых дефектах на поверхности шва после сварки.

Динамика износа рабочей части макетного образца инструмента из ВР25 ТУ 48-19-274-77 при ФС нержавеющей стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72 толщиной 2 мм представлены на рисунке 3.19.

Характерные виды разрушений макетных образцов инструмента при ФС нержавеющей стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72 толщиной 2 мм (рисунок 3.20).

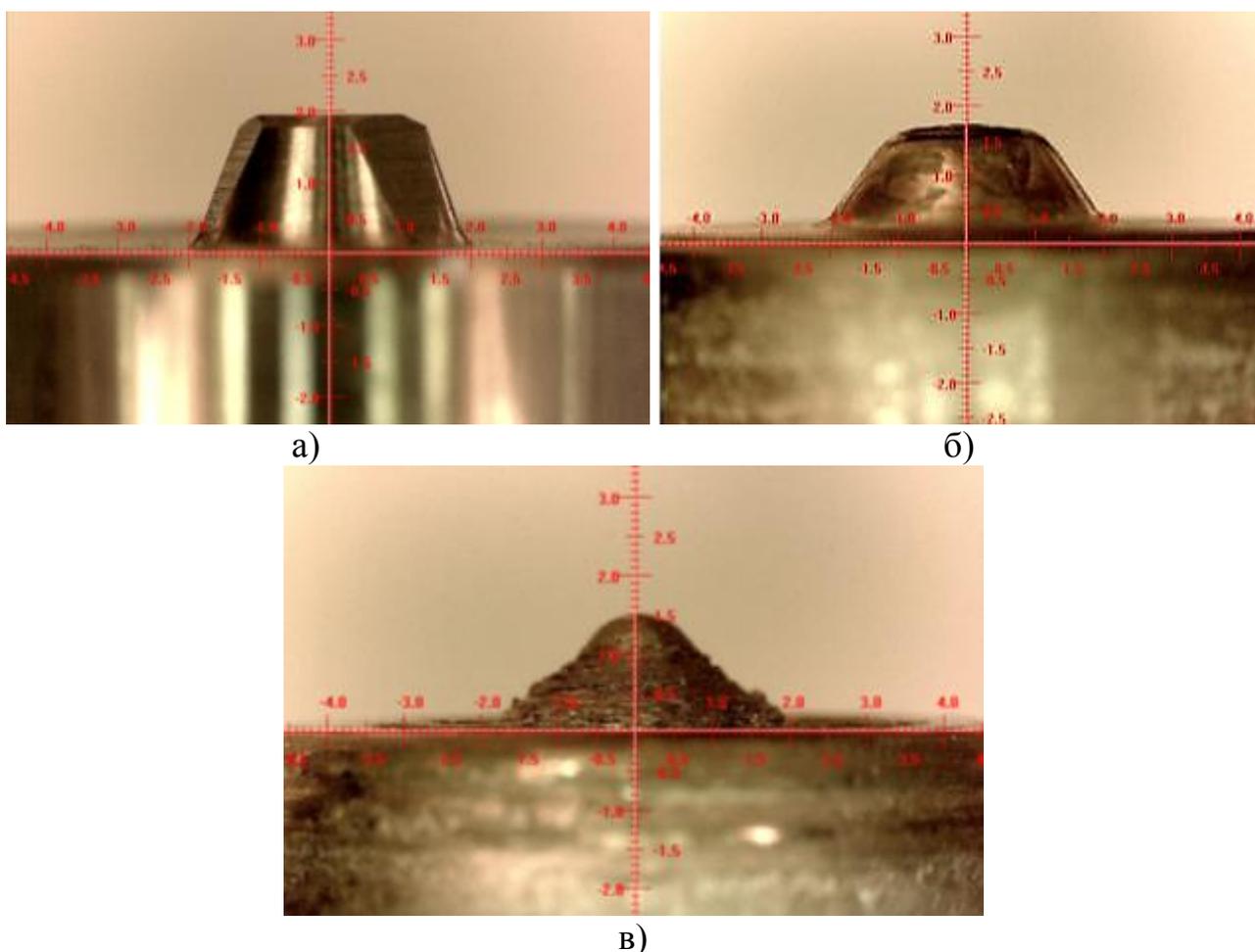


Рисунок 3.19 – Износ рабочей части макетного образца инструмента из ВР25 ТУ 48-19-274-77 при СТП:

а) новый инструмент; б) после ФС 2,2 м; в) после ФС 5,2 м

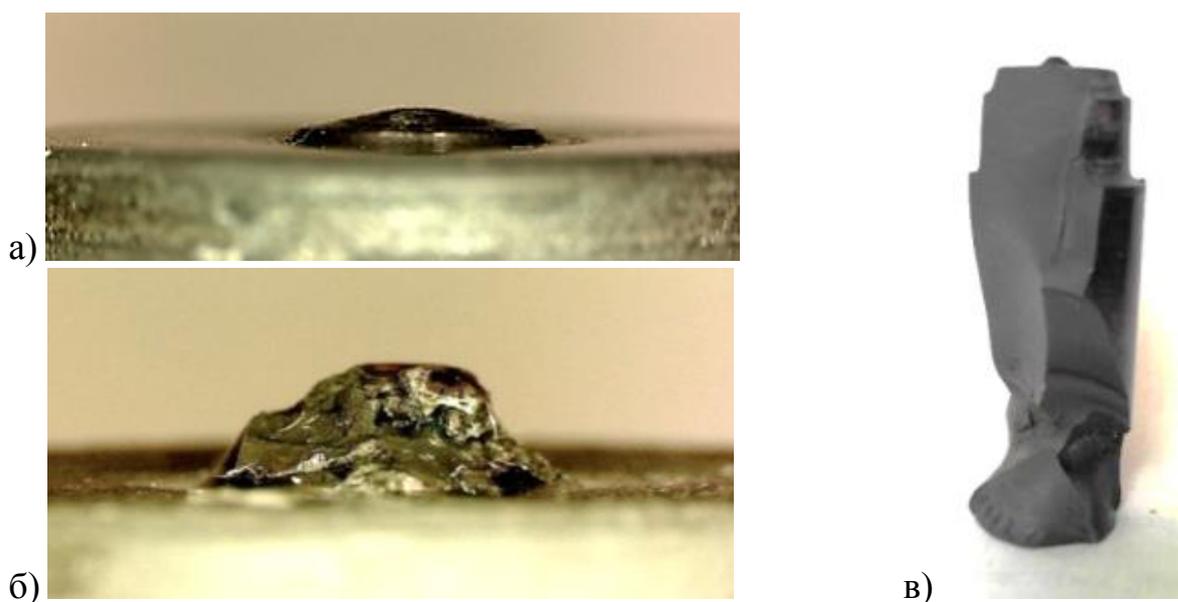


Рисунок 3.20 – Виды разрушений макетных образцов инструмента при ФС:  
 а) выгорание штифта (инструмент из А04 ТУ 48 -4205-90-210);  
 б) выкрашивание штифта (инструмент из Н10 F Sandvik Coromant);  
 в) разрушение всего инструмента (А04 ТУ 48 -4205-90-210)

Расчёт среднего значения износа высоты штифта  $h_1=2_{-0.1}$  мм инструмента выполнен на основании данных контроля геометрии инструмента ФС до и после проведения испытаний по формуле  $n = \frac{\sum_{i=1}^5 h_i}{5}$  мм, где  $h_i$  – величина износа, мм;  $i$ -й инструмент. Оценка значений износа представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Среднее значение износа макетных образцов инструмента СТП

Материал инструмента СТП	Среднее значение износа инструмента, мм для материала свариваемых образцов	
	BT6 ГОСТ 19807-91	12X18H10T ГОСТ 5632-72
BP25 ТУ 48-19-274-77	0,414	0,468
A04 ТУ 48 -4205-90-210	0,493	-
H10 F Sandvik Coromant	0,412	0,485

Определенные по формуле  $n = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i}{5}$  м, где  $m_i$  – длина сварного шва, м;  $i$ -й инструмент, средние значения ресурса работы макетных образцов инструмента СТП представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Среднее значение ресурса работы макетных образцов инструмента СТП

Материал инструмента СТП	Среднее значение ресурса инструмента, м для материала свариваемых образцов	
	BT6 ГОСТ 19807-91	12X18H10T ГОСТ 5632-72
BP25 ТУ 48-19-274-77	5,6	4,96
A04 ТУ 48 -4205-90-210	0,2	-
H10 F Sandvik Coromant	0,6	0,425

На основании полученных данных по среднему значению износа и ресурса работы макетных образцов инструмента для СТП можно сделать вывод: лучшим инструментальным материалом при ФС титана BT6 ГОСТ 19807-91 и нержавеющей стали 12X18H10T ГОСТ 5632-72 является BP25 ТУ 48-19-274-77.

### 3.4 Реализация технологии изготовления высокотвердого инструмента сложной пространственной формы

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. ЭЭО является одним из

наиболее распространенных способов, применяемых при изготовлении деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов (твердых, жаропрочных сталей и сплавов, закаленных сталей и др.). При изготовлении ряда групп изделий, таких как вырубные и отрезные штампы, фильеры, фасонные резцы, сложно-контурные высокоточные детали, она не имеет альтернативы или ощутимой конкуренции среди других видов обработки [86]. Учитывая это, можно утверждать, что данный вид обработки является наиболее подходящим 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 (МВК), цилиндрического стержня – для получения большой винтовой канавки (БВК) и спирали на профилированном основании бурта [19-21, 45]. Рабочая часть заготовки инструмента на данной операции представляет собой форму гладкого конуса. Расположение осей электрод-инструмента и заготовки под соответствующим углом  $\omega$  и совмещение поступательного и вращательного движений обеспечивает формирование МВК с заданным шагом, глубиной и диаметром (рисунок 3.21 а, б). Геометрия пина инструмента получается последующим формообразованием БВК на предварительно сформированном профиле МВК и формированием спирали на опорном бурте (рисунок 3.21 в, г). Следящая система УТ обеспечивает равномерный съём материала на профиле МВК. По прошествии заданного числа проходов производится контроль геометрии винтовых канавок.

Припуск на чистовую обработку снимается на «мягких режимах» установки. Финишный проход выполняется на режимах установки, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности и качество поверхностного слоя пина.

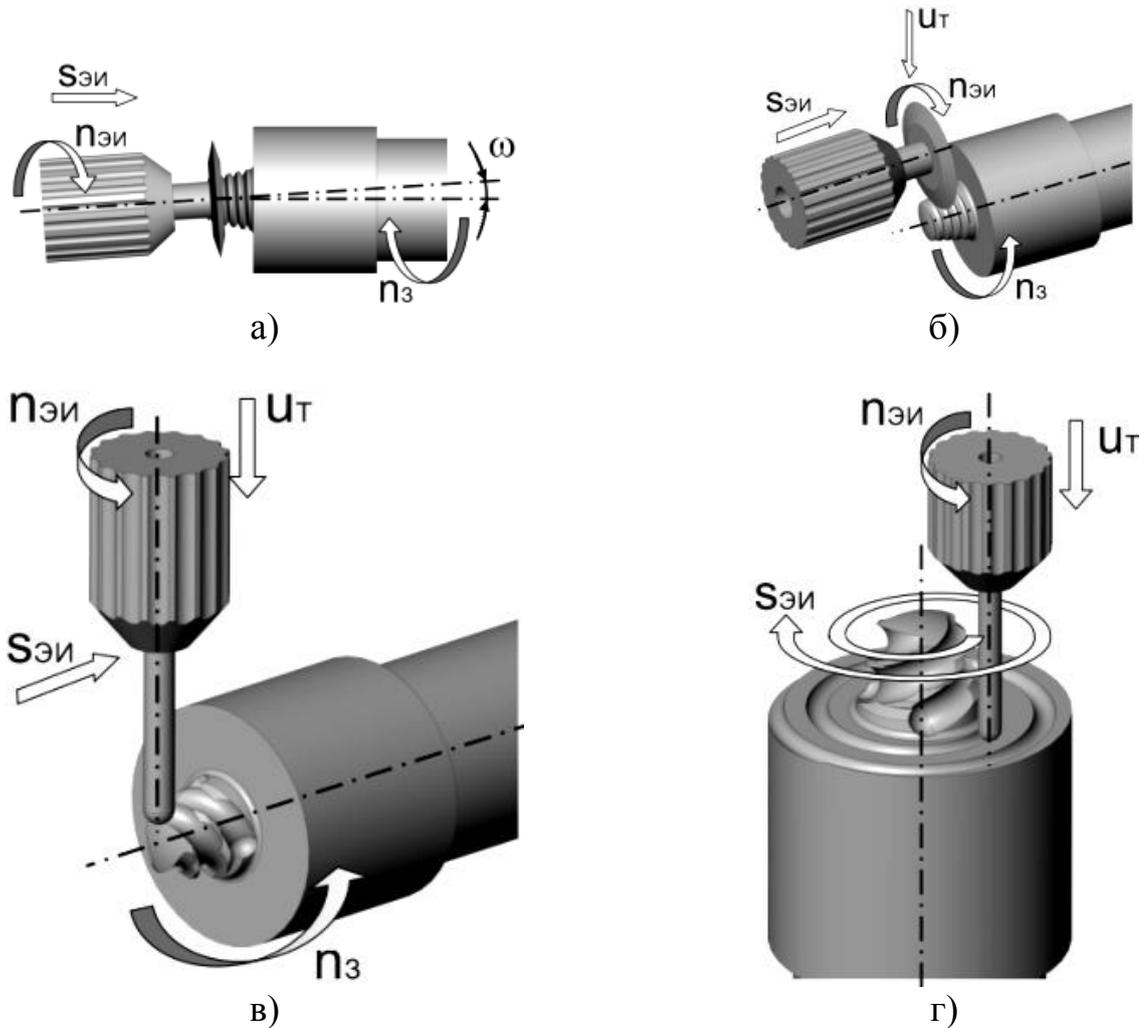


Рисунок 3.21 – Технологические схемы формообразования геометрии инструмента электроэрозионным фрезерованием:  
 а) формирование МВК вид сверху; б) работа следящей системы;  
 в) формирование БВК; г) формирование спирали на опорном бурте

При необходимости производится правка профиля электрода-инструмента, восстанавливающая исходную геометрию (характерно для дискового электрода), в результате его незначительного износа в процессе обработки. Технологическая схема ЭЭФ для формирования рабочей части пина и бурта инструмента СТП была реализована на установке ELFA–731, оснащенной системой ЧПУ класса CNC «Fanuc- 3M» (рисунок 3.22) с применением оригинального программного обеспечения генерирования управляющего кода [26]. Изготовленные инструменты для сварки образцов различной толщины представлены на рисунке 3.23.



Рисунок 3.22 – Реализация технологического процесса изготовления инструмента для СТП методом ЭЭФ

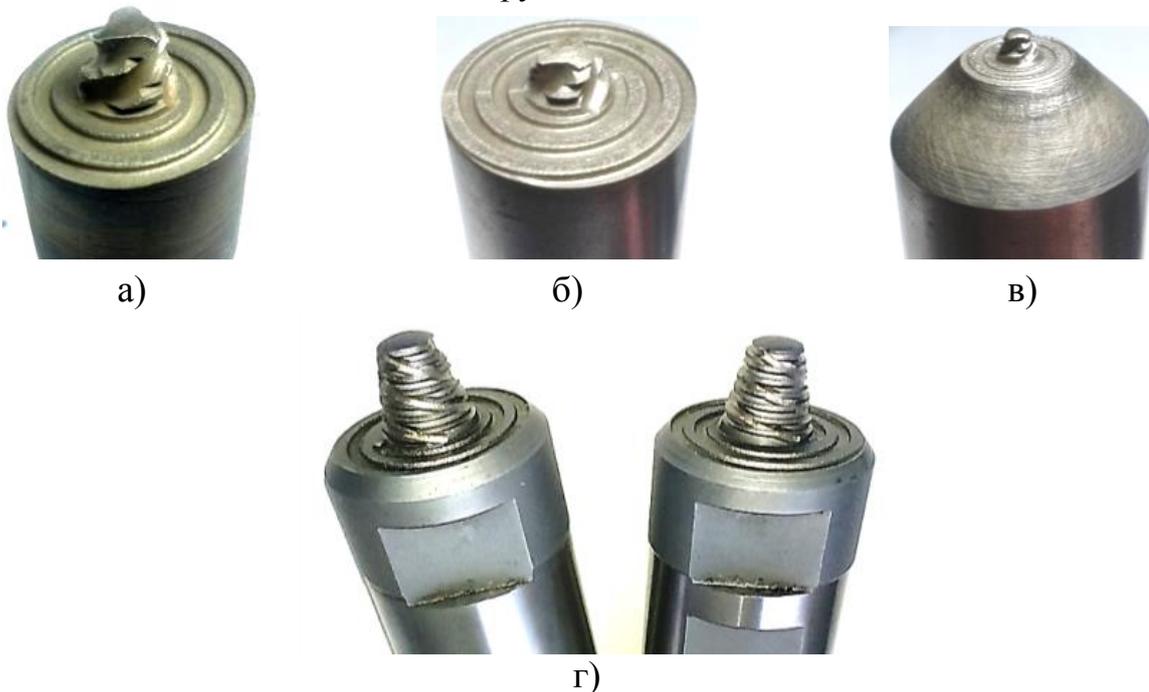


Рисунок 3.23 – Сложнопрофильный инструмент для сварки трением с перемешиванием, полученный методом ЭЭФ для соединения листового материала толщиной: а) 8мм; б) 4мм; в) 2мм; г) инструмент со сменной рабочей частью для сварки листов толщиной свыше 10 мм

Имеется тенденция расширения применения ЭЭО в инструментальном производстве, особенно в опытно-конструкторском. ЭЭО, дает значительный выигрыш за счет снижения трудоемкости подготовки производства, универсальности, высокой точности. Преимуществом ЭЭО является то, что при ее использовании путь от чертежа до готовой детали значительно сокращается. Это позволяет значительно ускорить производство новых образцов изделий.

## Выводы по главе 3

В третьей главе, посвященной разработке методики конструкторско-технологической отработки инструмента повышенной стойкости для сварки трением с перемешиванием жаропрочных материалов, получены следующие результаты:

1. Определены и уточнены функции основных конструктивных элементов инструмента при СТП – бурта (разогрев пришовной зоны, сжатие заготовок и создание необходимого давления в переходной зоне) и пина (перемешивание материала и его перенос в корневую зону шва с созданием в ней избыточного давления), на основе которых разработана модель и разработана методика, позволяющая по результатам моделирования вязкого течения материала в зоне сварки создавать параметрические геометрические модели рабочих частей инструмента при различных конструкторско-технологических ограничениях и требованиях.

2. Результаты моделирования и опытные испытания показали, что наиболее эффективной формой в производственных условиях является сложная геометрия рабочей части инструмента, сочетающая в себе спиралевидные канавки круглого сечения двух видов шага и диаметра.

3. На основе модельных экспериментов спроектированы, изготовлены и прошли опытную и производственную апробацию новые конструкции сложно-профильного высокотвердого инструмента, обладающего высокой стойкостью, обеспечивающие высокое качество сварного шва.

4. Проведены ресурсные испытания макетных образцов инструмента при сварке сплавов на основе титана и железа из различных инструментальных материалов.

5. 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.

6. Предложенные конструкции инструмента для сварки трением с перемешиванием позволяют получить качественное соединение при меньших нагрузках на конструкцию оборудования. Развитие инструментального производства открывает новые возможности перемешивающей сварки трением, особенно применительно к материалам с высокой температурой плавления.

#### 4 Разработка специального оборудования и средств технологического оснащения перемешивающей сварки трением

##### 4.1 Конструирование и проектирование установки высокоскоростной сварки трением

###### 4.1.1 Функциональные требования к конструкции установки высокоскоростной сварки трением перемешиванием

Главные требования к технологическому оборудованию для сварки трением перемешиванием: жесткость технологической системы, обеспечение точности и управляемости позиционирования, прочность конструкции, программируемость, технологичность создания конструкций при повторении.

Максимальная статическая нагрузка, развиваемая рабочим органом (актуатором) установки, составляет 15000 Н.

Функционально установку можно разделялась на три части: а) сварной металлический каркас основания; б) алюминиевая рама; в) узел актуатора. Согласно концепции конструкции, алюминиевое основание крепится к металлическому каркасу в четырёх точках (углах). Отдельные функциональные элементы установки одновременно являются и силовой частью конструкции (рисунок 4.1).

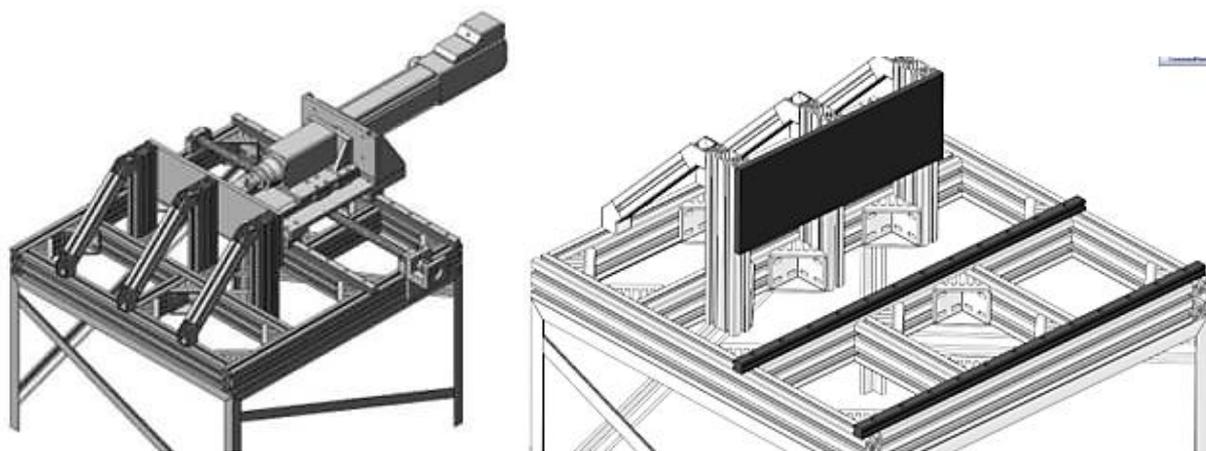


Рисунок 4.1 – Установка для перемешивающей сварки трением,  
функциональные узлы

Функциональные элементы установки, влияющие на жёсткость конструкции в целом: опорная плита для сварки; направляющие для опор скольжения; узел шарико-винтовой передачи (ШВП).

#### 4.1.2 Проектирование установки ВСТП

Проектирование и анализ установки производились методом конечных элементов. В расчете применялась схема агрегатирования и обобщения для удобства расчета общей силовой схемы. Агрегатировались:

- узел ШВП (большое количество элементов в сборке с разъёмными соединениями, сборка как единый узел не привносит значимую жёсткость во всю конструкцию);
- узел актуатора (большое количество элементов в сборе с разъёмными соединениями, сборка как единый узел не привносит значимую жёсткость во всю конструкцию);
- соединительные уголки (узлы со связями балка-уголок-балка при расчёте заменены эквивалентными узлами со связями балка-балка).

На рисунке 4.2 представлена эквивалентная силовая схема и схема нагружения установки. Прикладывалась статическая нагрузка в точках В и С, равная по 3000 Н соответственно, и противоположная по направлению.

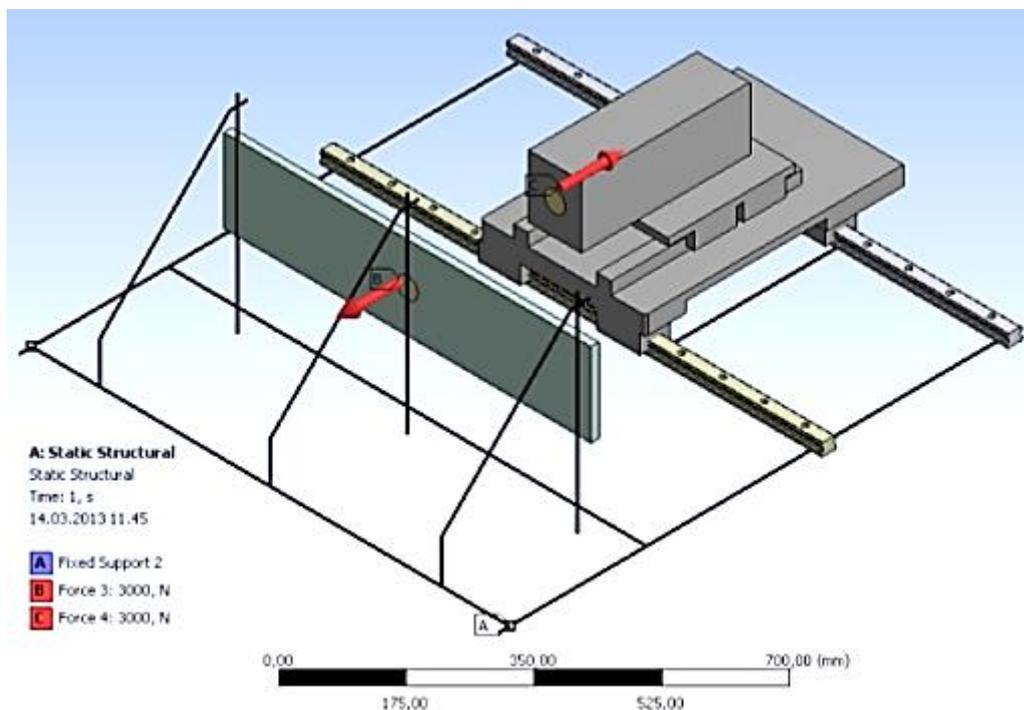


Рисунок 4.2 – Схема нагружения расчётной модели установки ВСТП

Для первичного расчёта жёсткости применялась комбинированная, стержне-

вая с объёмными элементами, расчётная модель конструкции установки. Стержневая схема конструкции позволяет проводить расчёт с минимальными затратами вычислительных ресурсов и времени. При расчётах учитывались сечения балок. Узел актуатора моделировался как эквивалентный единый элемент, что упрощало расчётную модель. Диаграмма эквивалентных напряжений (von-Mises) для узла актуатора и направляющих опор скольжения представлена на рисунке 4.3.

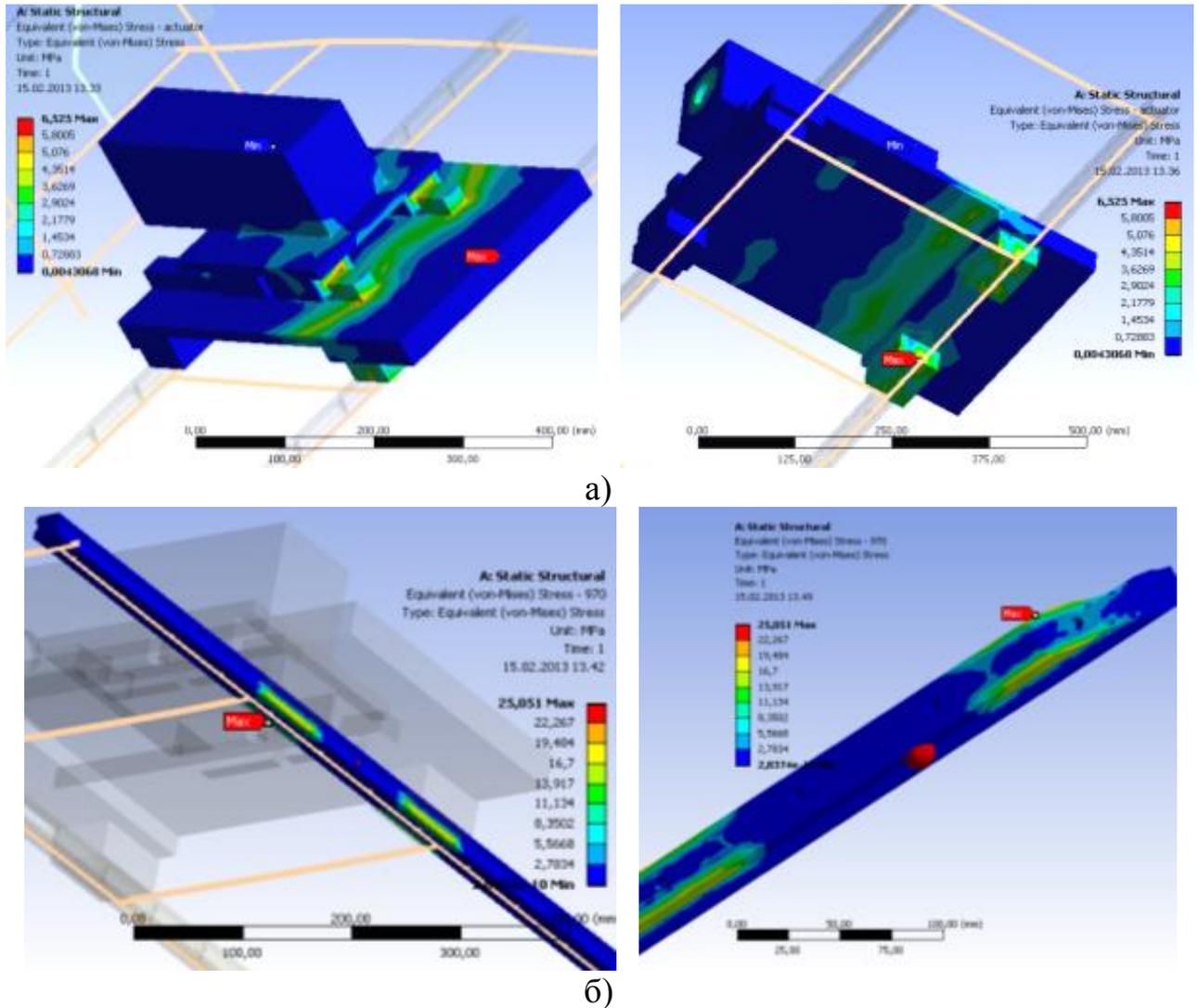


Рисунок 4.3 – Участки силового воздействия:  
 а) в области актуатора воспринимающего наибольшую нагрузку;  
 б) элементов подшипников на направляющие скольжения

Нагрузки с актуатора передаются в большей степени на заднюю направляющую. Максимальные напряжения находятся в допустимых пределах (не превышают 7 Мпа). Максимальные моменты, возникающие в алюминиевых профильных элементах конструкции, показаны на рисунке 4.4. Также определена точка

максимального отклонения элементов профиля конструкции от исходной геометрии при нагрузке.

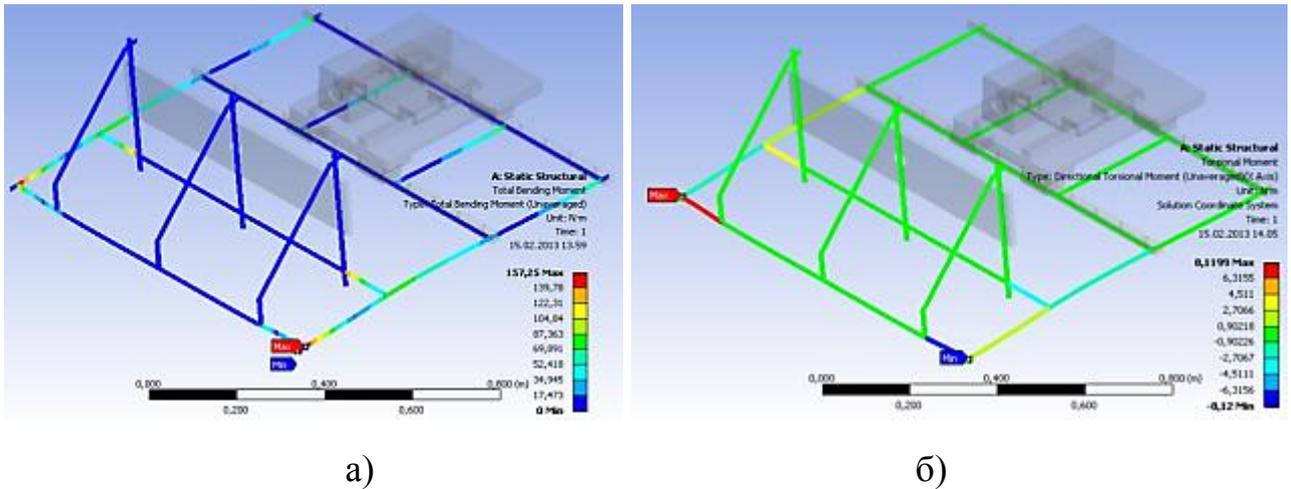


Рисунок 4.4 – Максимальные моменты, возникающие в профильных элементах конструкции: а) на изгиб; б) крутящий

Первичный расчет показал, что алюминиевая конструкция, а также ее функциональные составляющие, в условиях приближенного моделирования обладают достаточной жесткостью. Модель с элементами геометрии из простейших примитивов позволяет проводить расчеты на машинах среднего уровня, при этом характер изменения геометрии конструкции при моделировании практически идентичен поведению геометрии конструкции во время эксперимента. 3D модель установки ВСТП показана на рисунке 4.5.

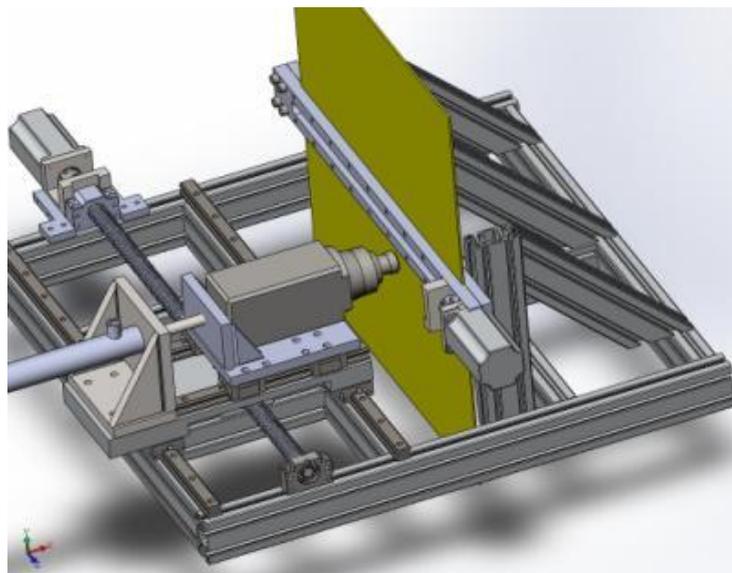


Рисунок 4.5 – 3D модель установки ВСТП

На основе выполненного анализа силовой схемы установки были выработаны рекомендации к проектированию конструкторской документации с указанием наиболее нагруженных мест и требований к их усилению [16, 18].

#### 4.1.3 Изготовление установки

Основная часть элементов конструкции установки для высокоскоростной сварки трением перемешиванием (УСТ ВСПСТ-Р1) создавалась из универсальных деталей и узлов, что позволило значительно повысить ее технологичность и эксплуатационные качества установки, ремонтпригодность. На рисунке 4.6 показан общий производственный экземпляр установки.



Рисунок 4.6 – Общий вид установки УСТ ВСПСТ-Р1

В установке предусмотрено управляемое перемещение по 2-м координатам (ось X и ось Z). Перемещение по оси X осуществляется посредством механизма ШВП, получающего крутящий момент от шагового двигателя. Перемещение по оси Z осуществляется посредством актуатора (рисунок 4.7) линейных перемещений ExlarTritex, имеющего собственный контроллер с управлением величиной перемещения, усилия на штоке и т.д.

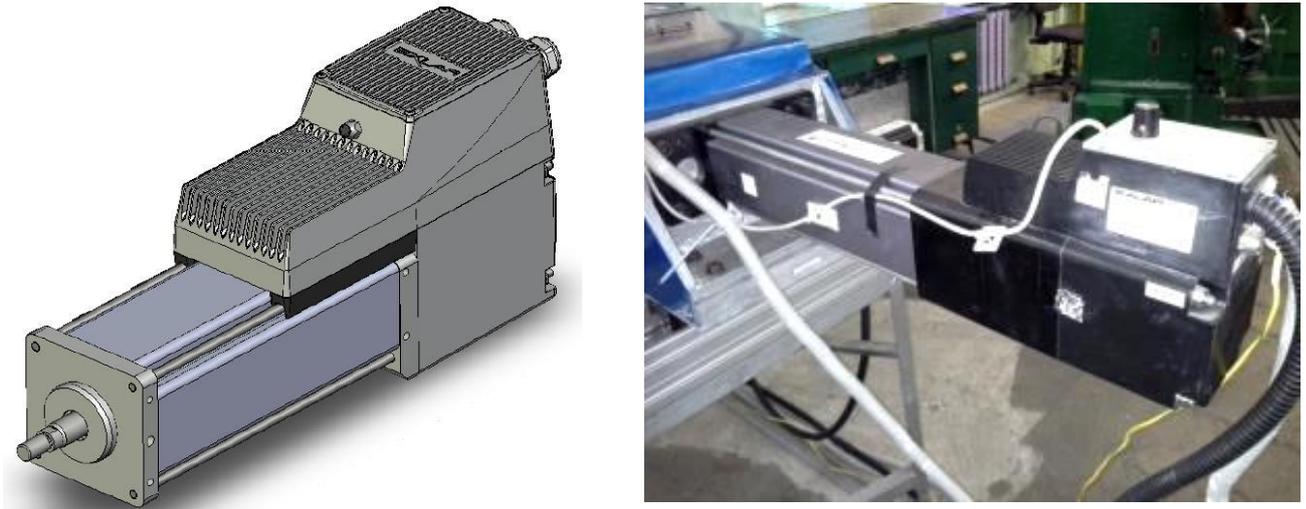


Рисунок 4.7 – Актуатор линейных перемещений ExlarTritex

Управление параметрами контроллера актуатора осуществляется с помощью специальной программы ПК через интерфейс RS 485. Управление вращением сварочного шпинделя и его перемещением по осям X и Z осуществляется посредством PLC-контроллеров и частотного преобразователя, смонтированных вместе в одном электрошкафу. Комплексное управление контроллерами шагового двигателя, актуатора и частотным преобразователем шпиндельного узла осуществляется посредством ПК через программу ЧПУ Mach3. Для облегчения управления и позиционирования сварочного инструмента применяется выносной пульт управления, позволяющий управлять установкой как по отдельным координатам в режиме ручного управления, так и по программе.

Размещение свариваемых заготовок осуществляется на специальной оснастке, оборудованной сменной подложкой и боковыми упорами для предотвращения раскрытия стыка в процессе сварки.

Для прижатия заготовок с лицевой стороны был разработан специальный прижимной подпружиненный узел, перемещающийся в осевом направлении вместе со шпинделем и сварочным инструментом (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Прижимной узел заготовок установки СТП

Общий вид изготовленной установки представлен на рисунке 4.9.

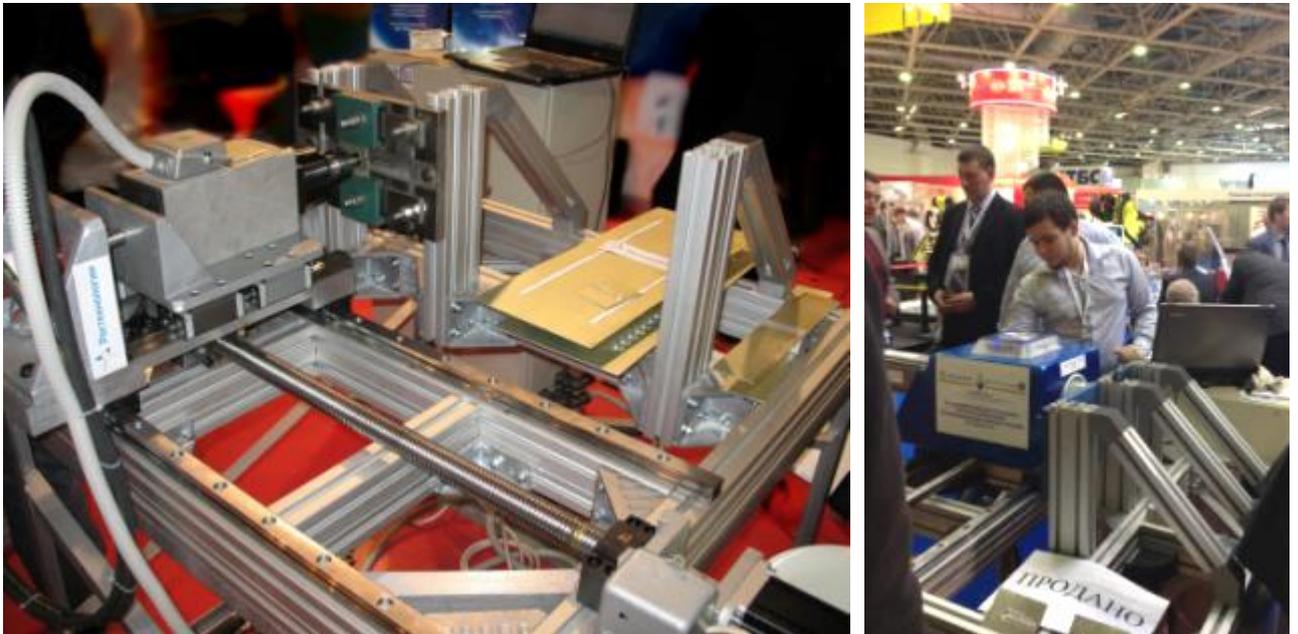


Рисунок 4.9 – Установка высокоскоростной сварки трением с перемешиванием, представленная на выставках «Металлообработка – 2012, 2013»:

а) экспериментальная; б) усовершенствованная

Основные технические характеристики установки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики установки

Наименование параметров	Технические характеристики
Габаритные размеры устройства: - высота, мм - длина, мм - ширина, мм	1000 1640 1218
Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	4
Размеры свариваемых образцов: - ширина, мм - длина, мм - толщина	1200 (при использовании специальной оснастки); 700; до 8 (для алюминиевых сплавов); 2 – для стали и титановых сплавов.
Энергопотребление: - установленная потребляемая мощность, кВт - напряжение питания, В	10 380, ток переменный
Технические параметры - линейная скорость сварки $V_{св}$ , мм/мин - точность линейной сварки, % от $V_{св}$ - угол наклона сварочного инструмента - осевое усилие на инструменте $P$ , КН (кгс) - точность показаний осевого усилия на инструменте, % от $P$ - осевая скорость перемещения инструмента, мм/мин - диапазон скорости вращения инструмента, об/мин	50...250 5 00...30 16,39 (1639,1) $\leq 3\%$ 5...35 мм/мин 500...9000
Количество управляемых координат (координата X)  (координата Z)	2 посредством шагового двигателя посредством актуатора линейных перемещений
Максимальное перемещение - по оси X, мм - по оси Z, мм	800 254
Максимальный диаметр инструмента, мм	20
Протокол связи актуатора с системой ЧПУ	RS485
Система ЧПУ	ПК, (ОС Mach3)

## 4.2 Технологические схемы сварки трением пространственных авиационных конструкций

### 4.2.1 Отработка технологической схемы сварки корпусов приборов

Сварка трением имеет широкие технологические возможности для получения неразъемных соединений деталей узлов авиационной и ракетной техники в качестве альтернативы заклепочным соединениям, контактной, шовной электродуговой, электроннолучевой и лазерной сваркам, обеспечивает возможность сварки разнородных материалов.

Сваркой трением перемешиванием могут быть, в частности, получены сварные соединения, показанные на рисунке 4.10.

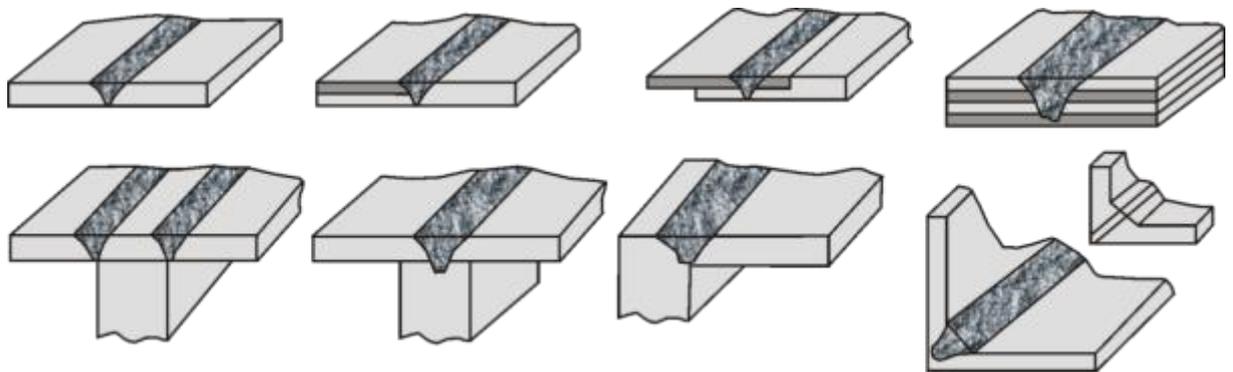


Рисунок 4.10 – Технологические возможности сварки методом СТП пространственных конструкций

Исходя из особенностей конструкции несущих рам корпусов требуется применение разных типов соединений, показанных на рисунке 4.11.

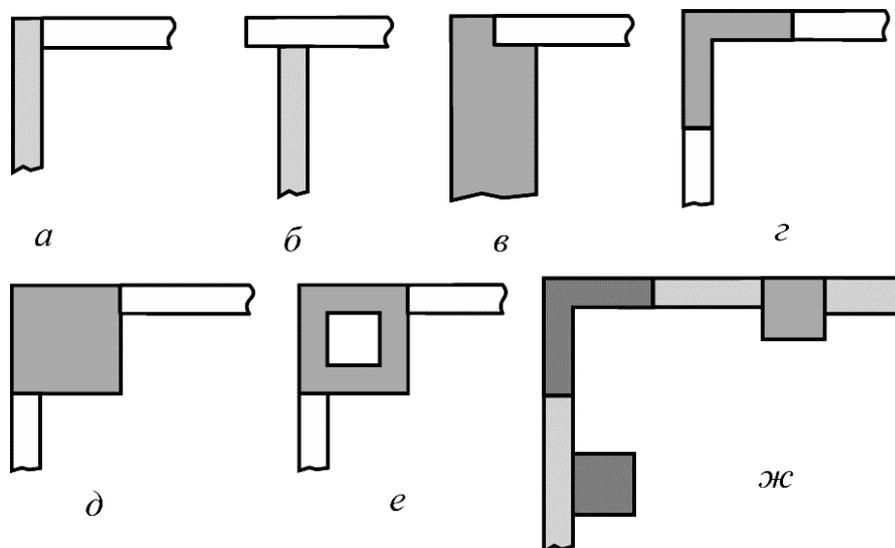


Рисунок 4.11 – Сварные соединения рам корпусов

Получение таких соединений может быть достигнуто применением схем СТП приведенных на рисунке 4.12.

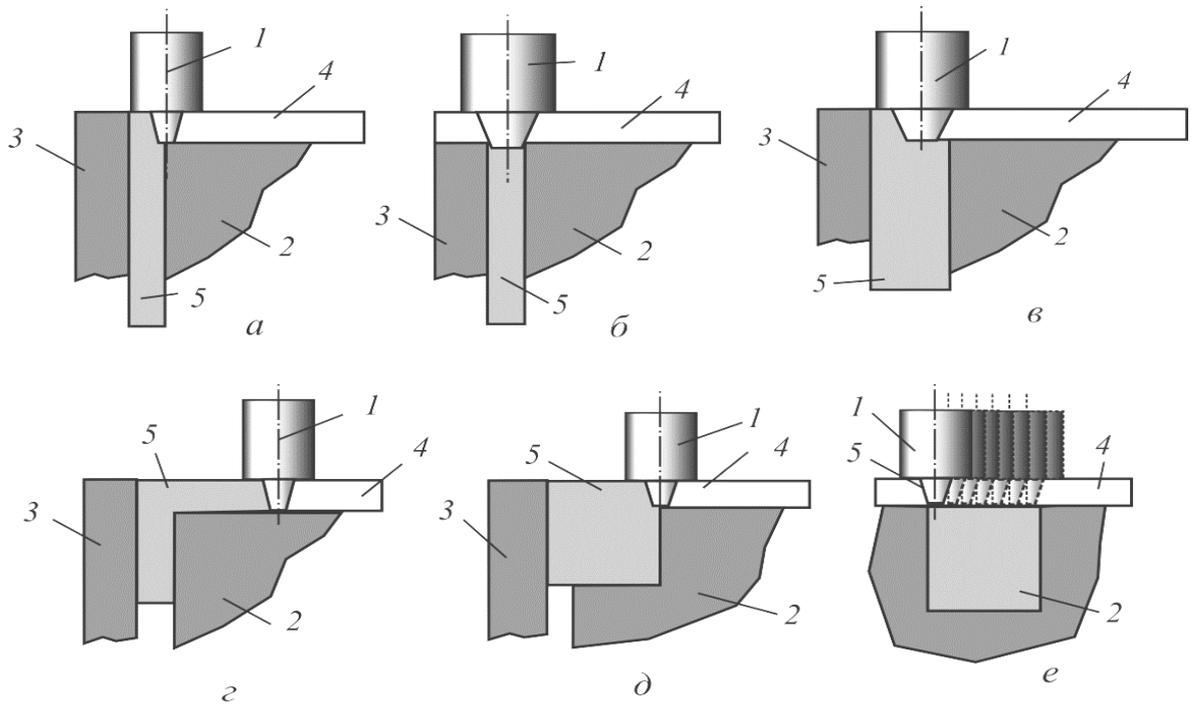


Рисунок 4.12 – Схемы СТП рам корпусов:

1 – сварочный инструмент; 2, 3 – опорные элементы приспособления;  
4,5 – свариваемые элементы

Сварка трением перемещиванием коробчатых угловых конструкций представляет собой самостоятельную проблему, обусловленную близким расположением линии сварки к краю [22, 41]. Это приводит с одной стороны к ухудшению условий проковывания буртом и деформации вертикального листа. В некоторых неизбежно «свисание» бурта инструмента (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13. – Примеры швов, выполненных со «свисанием» бурта

Чтобы устранить эти недостатки необходимо уделять особое внимание условиям закрепления вертикального листа. В результате наблюдается характерное разрушение по углам в зоне термического слияния (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14. – Характерное разрушение углового шва при изгибе

Подбором технологических режимов удалось достигнуть получения качественных соединений (рисунки 4.15, 4.16) и получить опытные заготовки рам простой конфигурации (рисунок 4.17). Макроструктуры угловых швов имеют характерную «луковичную» структуру зоны перемешивания (рисунок 4.18).

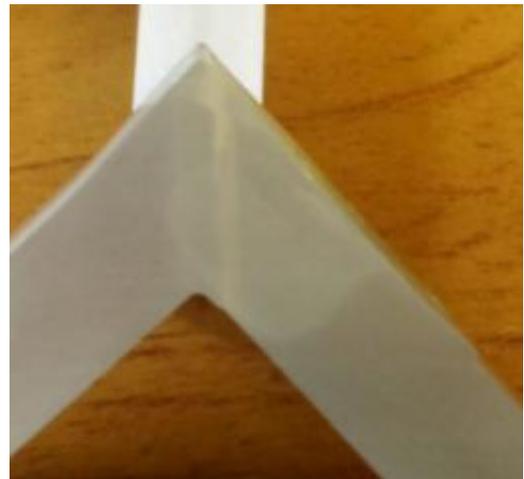


Рисунок 4.15 – Качественные угловые швы. Сплав АМГ6



Рисунок 4.16 – Качественные угловые швы. Сплав Д16АМ



Рисунок 4.17 – Сваренные СТП рамы корпусов



Рисунок 4.18 – Обратная сторона сварного шва

Для сборных коробчатых конструкций требуется последующая механическая обработка (рисунок 4.19).

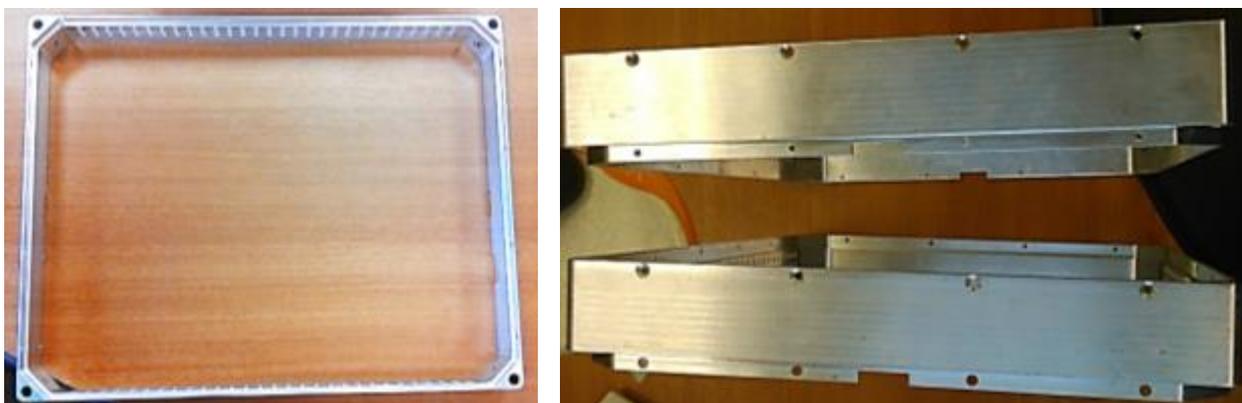


Рисунок 4.19 – Готовая деталь после механической обработки

#### 4.2.2 Обработка технологии сборки конструкций фюзеляжа самолета из экструдированных секций

Внутренние продольные и кольцевые алюминиевые ребра жесткости (шпангоуты и лонжероны), окна и двери прикрепляются к алюминиевой части фюзеляжа внахлест. Существуют также методы, при которых конструкции свариваются СТП из отдельных секций-профилей, полученных методом экструзии. В зависимости от конфигурации секции-профиля применяется различные схемы соединения, пример одной из которых приведен на рисунке 4.20.

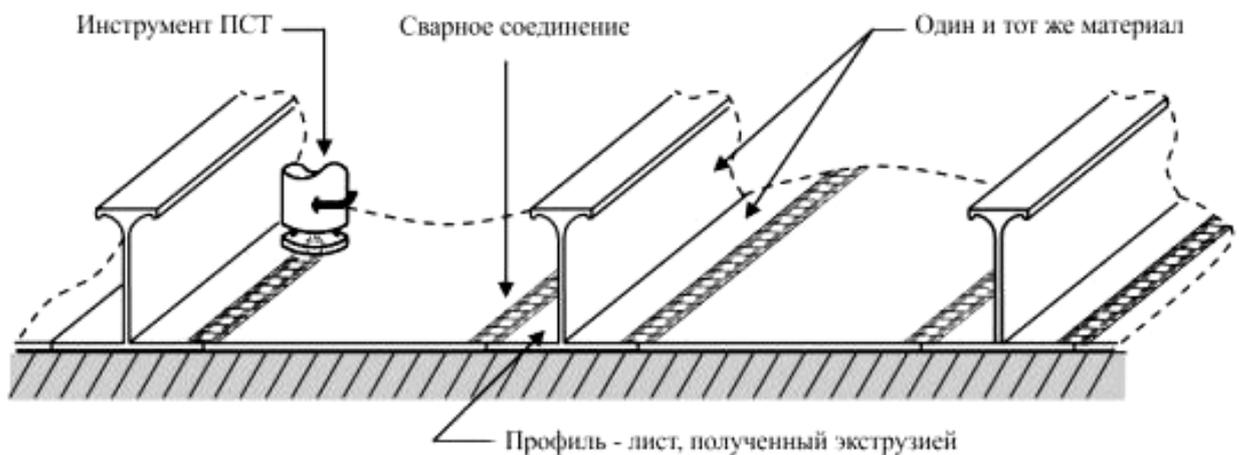


Рисунок 4.20 – Схема соединения экструдированных профилей

Реализация технологической схемы сборки длинномерных деталей фюзеляжа ЛА сплава 1163 РДТВ методом СТП (Рисунок 4.20 а, б) в значительной части элементов конструкций способно заменить заклепочное соединение при сокращении веса конструкции и повышении технологичности.

Испытания образцов соединений на прочность, в том числе на усталостную прочность, показывает, что применение технологии сборки конструкций фюзеляжа самолета из экструдированных секций – профилей методом сварки трением перемешиванием значительно увеличивает прочность и снижает вес конструкции.

Учитывая, что в фюзеляже самолета более 40 тысяч заклепок, порядка 15 тысяч в крыле, обоснованы перспективы снижения массы конструкции более чем на 150 кг без потери прочности, при отсутствии концентраторов напряжений, при сокращении времени сборки более чем на 50%.

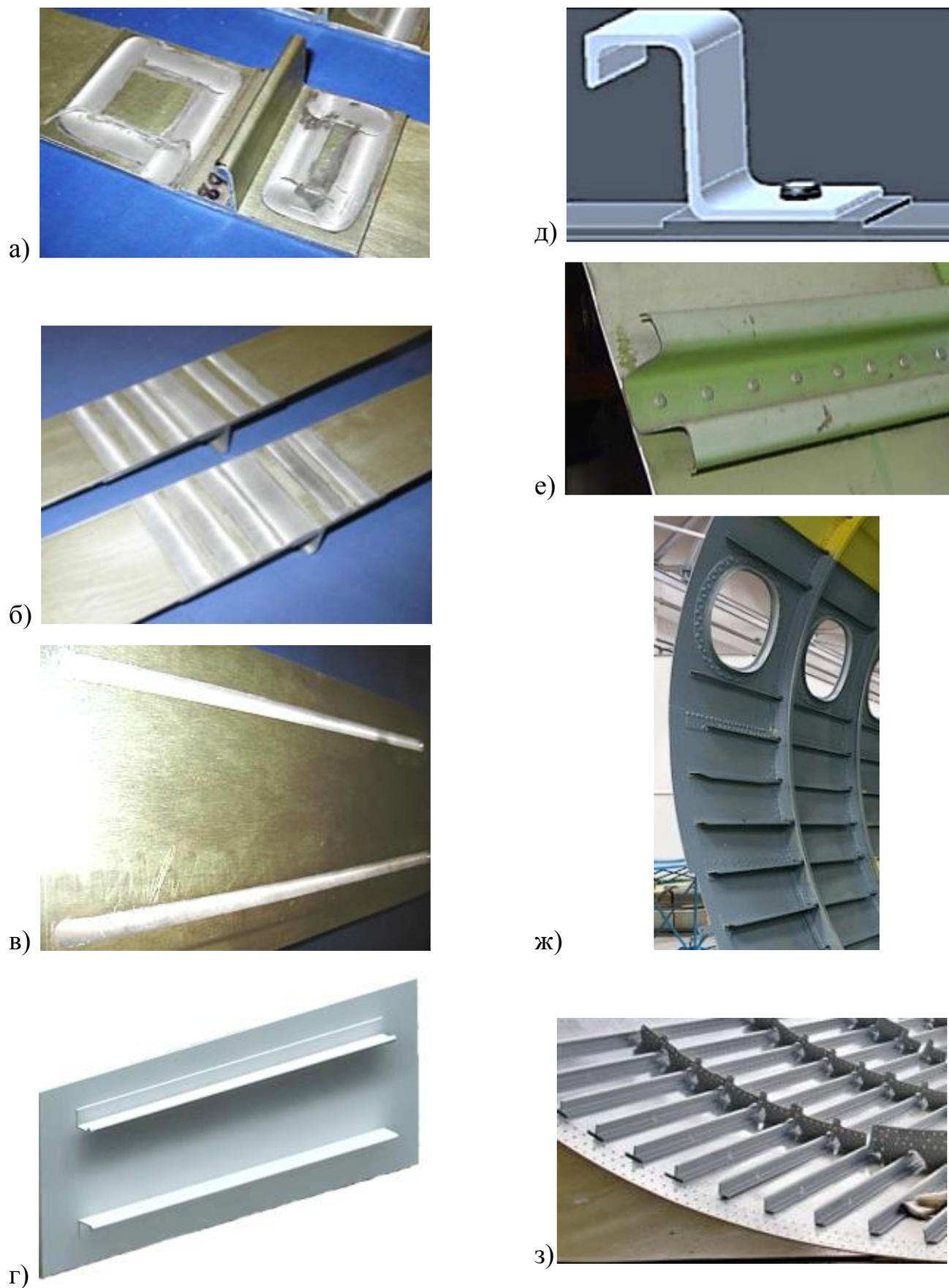


Рисунок 4.22 – Соединения методом ВСП (а-г) конструкций фюзеляжа самолета (сплав 1163 РДТВ), заменяющее аналогичное заклепочное соединение (д-з)

### 4.2.3 Технологические схемы сварки трением кольцевых швов трубчатых заготовок

Благодаря проведенным исследованиям и применению высоких скоростей вращения и подачи специального инструмента удалось в несколько раз снизить, возникающие в процессе сварки силы. Это позволяет использовать перемешивающую сварку трением на традиционном оборудовании для механической обработки конструкций различной формы, в том числе кругового типа (рисунки 4.21 – 4.24.) [17, 18, 41, 46].

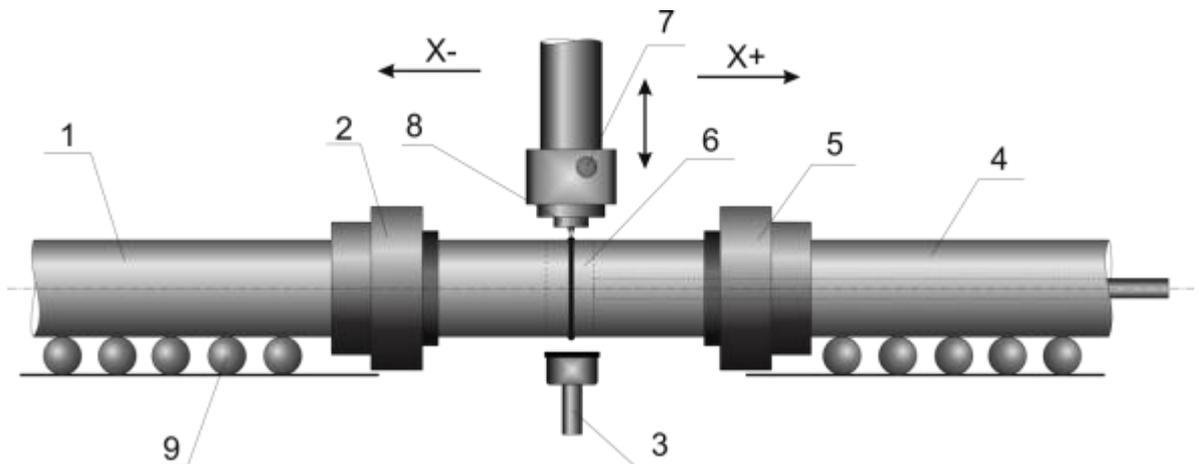


Рисунок 4.21 – Принципиальная схема установки для сварки длинномерных трубчатых конструкций: 1,4 – свариваемые шины; 2,5 – зажимные вращающиеся патроны; 3 – опора (люнет); 6 – зона сварки (сварной шов); 7 – шпиндель; 8 – сварочный инструмент; 9 – подложка

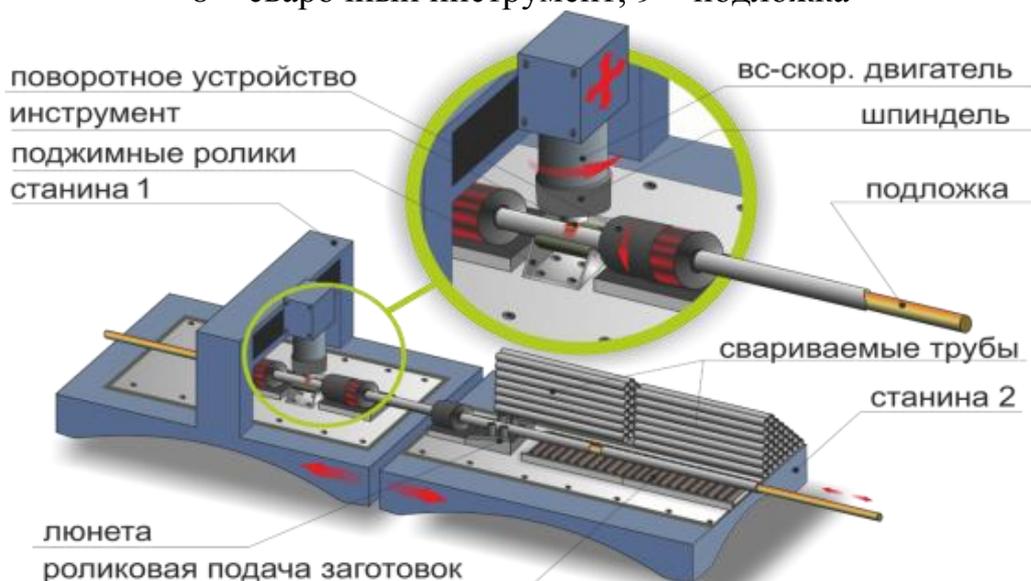


Рисунок 4.22 – Макет установки для сварки трубчатых конструкций на базе продольно-фрезерного станка портального типа

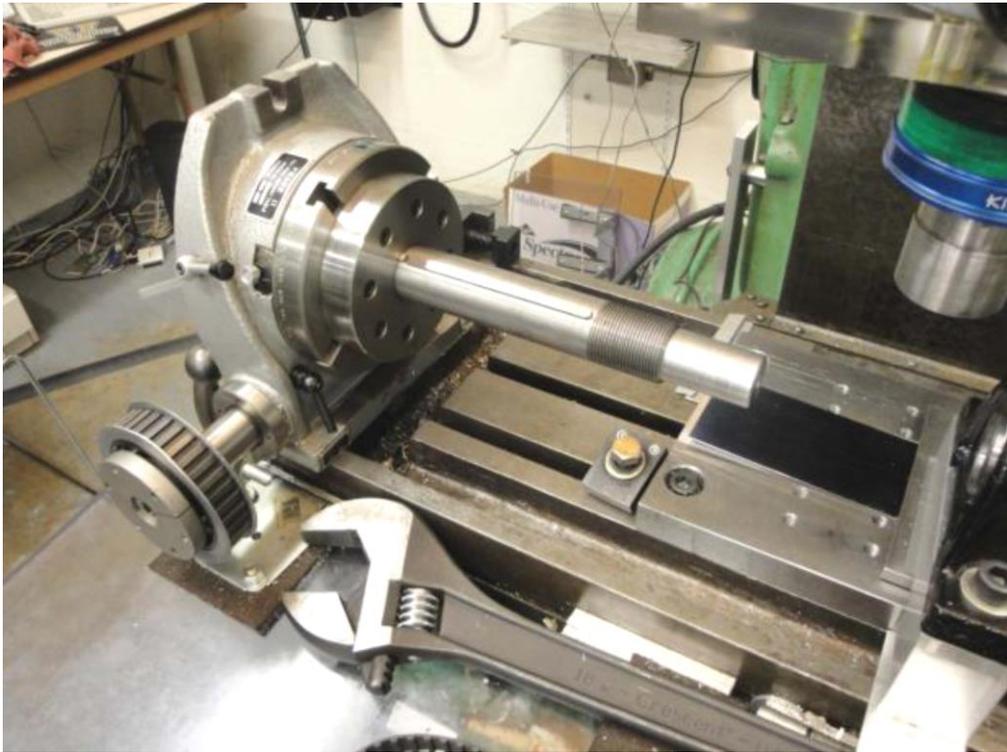


Рисунок 4.23 – Установка для сварки трубчатых конструкций на базе продольно-фрезерного станка портального типа

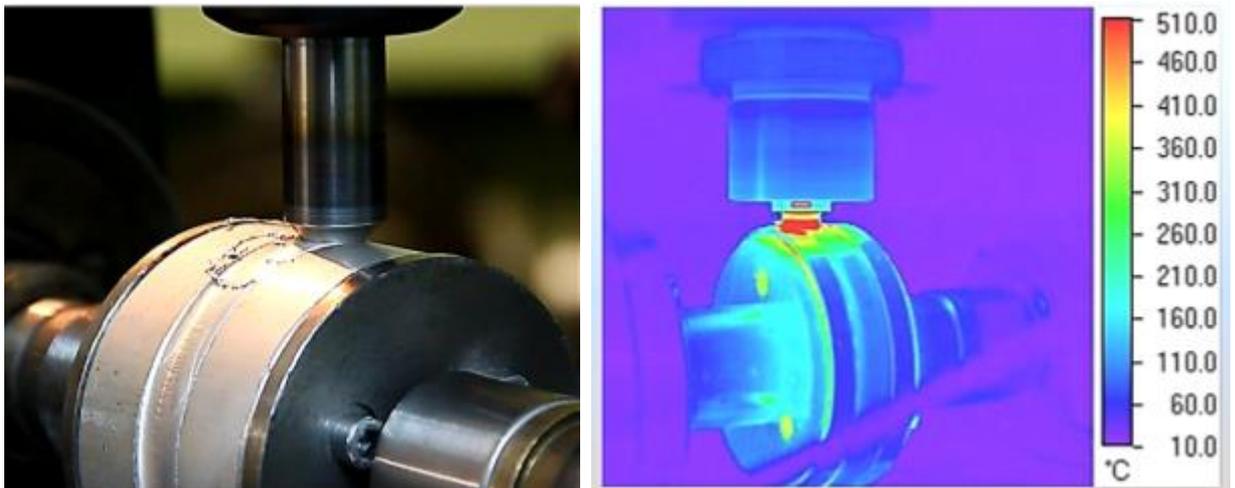


Рисунок 4.24 – Отработка технологии перемешивающей сварки трением круговых швов

Выполненный на электроэрозионном станке срез сваренных деталей, показывает, что метод ВСТП обеспечивает однородность материала шва как основного материал и отсутствие остаточной деформации (рисунок 4.25). Готовые конструкции элементов фланцев редуктора несущего винта вертолета, полученные СТП представлены на рисунке 4.26.

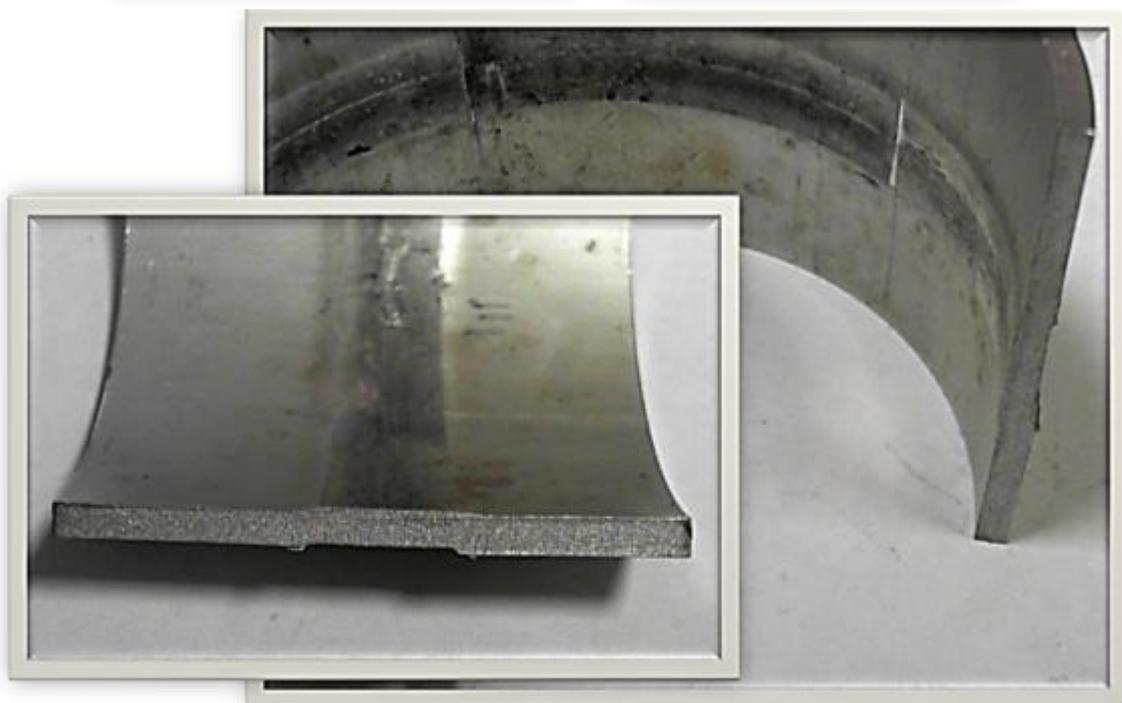


Рисунок 4.25 – Срез сваренных деталей, выполненный на электроэрозионном станке



Рисунок 4.26 – Элементы фланцев редуктора несущего винта вертолета, полученные СТП

### 4.3 Проекты технологического оснащения сварки трением крупногабаритных конструкций ракетно-космической техники

#### 4.3.1 Особенности технологического процесса изготовления топливных резервуаров

В ракетно-космической промышленности с помощью СТП изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов крупные отсеки для спутников, внешних резервуаров и баков топливных отсеков ракетносителей, космических аппаратов, стендовых образцов ракетно-космической техники [51].

Технологический процесс изготовления топливных баков ракет включает изготовление днищ, обечаек. Перспективы применения СТП открываются на этапе как изготовления обечаек и днищ из листовых материалов, так и сборки резервуара целиком из компонентов [46]. На рисунке 4.27 представлены этапы технологического процесса изготовления топливных баков.



Рисунок 4.27 – Этапы технологического процесса изготовления топливных баков

Необходимое оборудование для осуществления процесса: гибочный стан, карусельный станок, станок для фрезерования кромок, станок для сварки трением колец с комплектом оснастки и сменных сварочных головок, станок для сварки трением бака с комплектом оснастки и сменных сварочных головок, станок для сварки трением днища с комплектом оснастки и сменных сварочных головок.

Проект сварочного комплекса включает три базовые установки:

- установка для сварки обечайки из предварительно формованных листов;
- установка для сварки днищ из предварительно формованных листов;
- установка для сварки резервуара из колец (обечаек) и днищ.

#### 4.3.2 Установка для сварки обечайки

Общая компоновка установки для сварки обечайки из предварительно формованных гибкой листов представлена на рисунках 4.28 и 4.29. Конструкция установки допускает сварку как изнутри обечайки, как показано на схеме, так и снаружи. Система зажима заготовок обеспечивает смыкание (сжатие стыка) перед окончательным закреплением. Подача листов для смыкания производится приводными роликами (на схеме не показаны). При необходимости могут быть использованы специальные линейки, обеспечивающие жесткость стыка, шарнирно закрепленные на зажимных узлах. Основные характеристики, обеспечивающие технологические возможности установки приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры установки для сварки обечайки из предварительно формованных гибкой листов

№ п/п	Параметр	Величина
1	Диапазон толщин свариваемых деталей из алюминиевого сплава, мм	5 - 35
2	Максимальная высота кольца, мм	3 000
3	Диаметр свариваемого кольца, мм	55000
4	Максимальная скорость сварки, м/мин	2
5	Типовая скорость сварки деталей толщиной 5 мм, м/мин	0,8 – 1,0
6	Максимальное перемещение шпинделя по оси Z, мм	500
7	Максимальное перемещение шпинделя по оси X, мм	3 500
8	Диапазон скоростей вращения шпинделя, об/мин	200 – 2 500
9	Максимальное усилие по оси Z, кН	150
10	Максимальное усилие сварки по оси X, кН	40
11	Максимальная мощность привода шпинделя, кВт	40
12	Максимальная общая потребляемая мощность, кВт	70

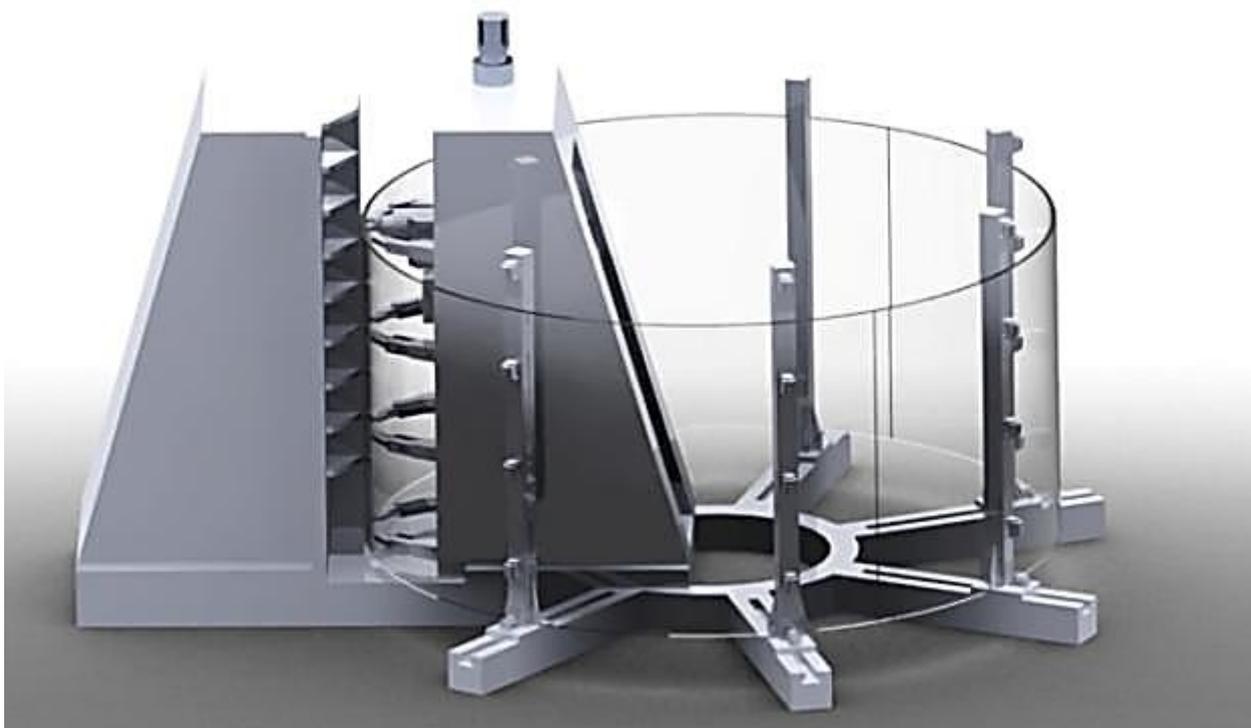


Рисунок 4.28 – Общая компоновка установки

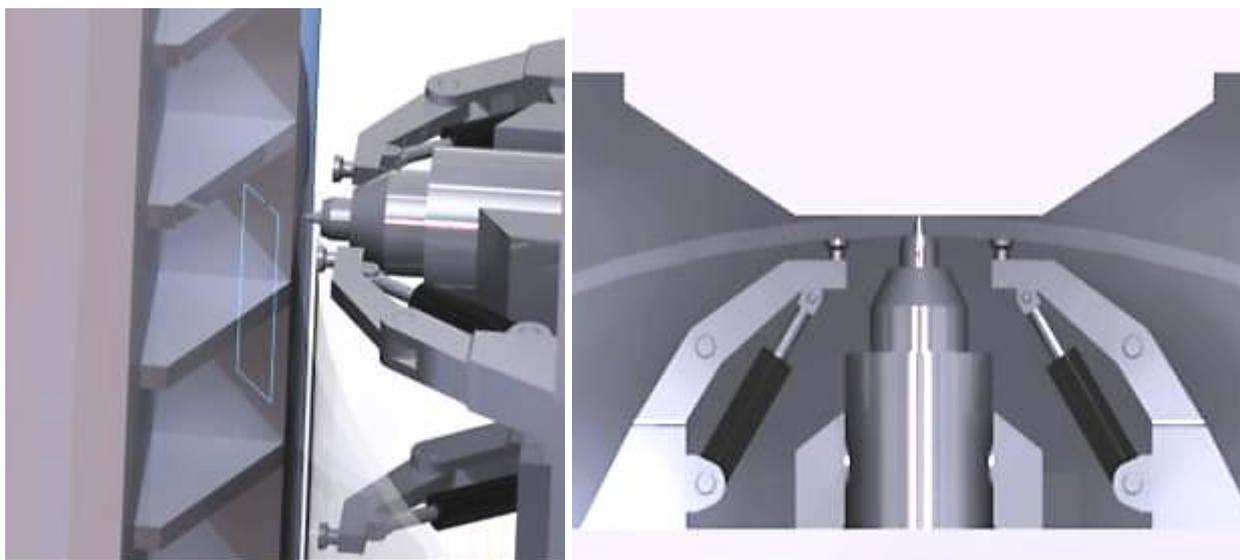


Рисунок 4.29 – Узел закрепления листов и сварочный узел

#### 4.3.3 Установка для сварки днищ из предварительно формованных листов

Общая компоновка установки для сварки днищ из предварительно формованных листов и ее сварочный узел представлены на рисунках 4.30 и 4.31 соответственно.

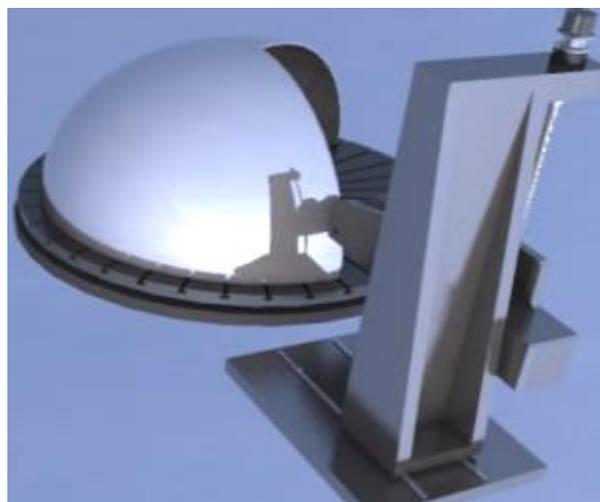
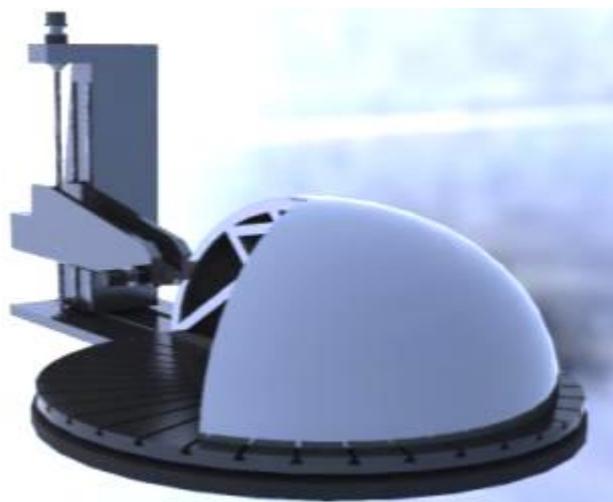
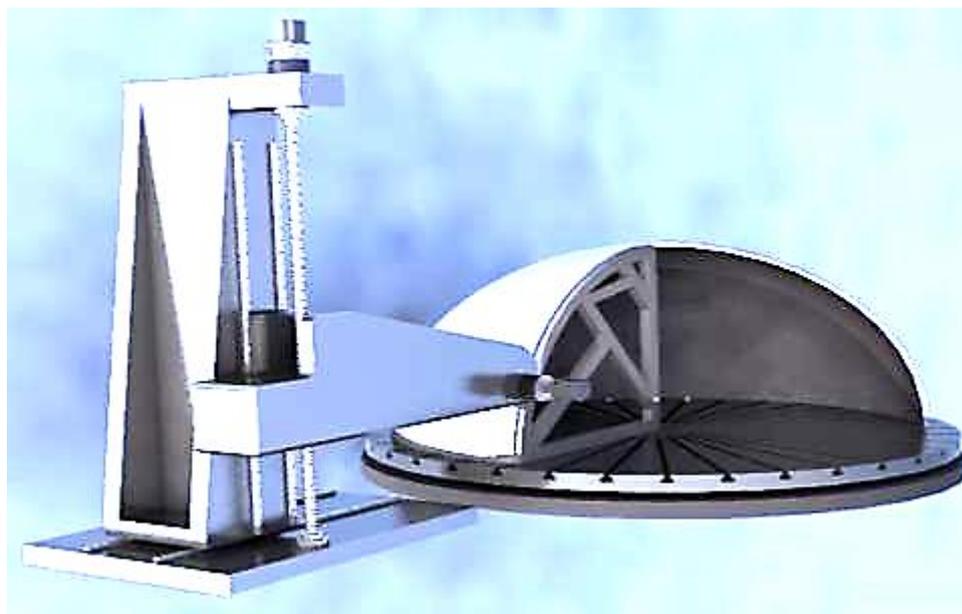


Рисунок 4.30 – Общая компоновка установки

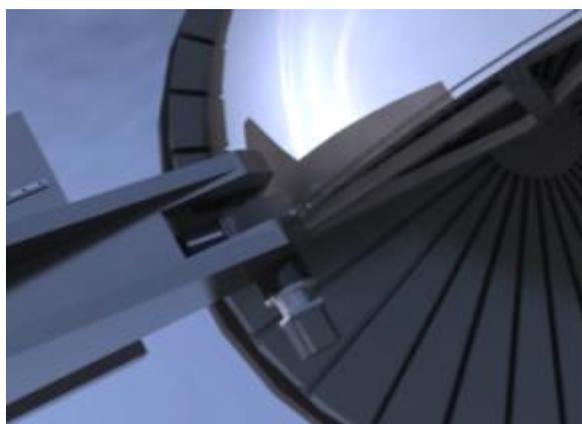


Рисунок 4.31 – Сварной узел установки

Конструкция предусматривает возможность установки на сварочный узел прижимных роликов для прижатия листов к подложке (оснастке). Основные характеристики, обеспечивающие технологические возможности установки, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры установки для сварки днищ из предварительно формованных листов

№ п/п	Параметр	Величина
1	Диапазон толщин свариваемых деталей из алюминиевого сплава, мм	5 - 35
2	Максимальная высота днища, мм	2 500
3	Максимальный диаметр днища, мм	5 500
4	Максимальная скорость сварки, м/мин	2
5	Типовая скорость сварки деталей толщиной 5 мм, м/мин	0,8 – 1,0
6	Максимальное перемещение установки по оси Z, мм	3 000
7	Максимальное перемещение установки по оси X, мм	3 000
	Максимальное перемещение шпинделя по оси R, мм	200
	Угол поворота шпинделя по координате B, град.	0 - 90
8	Диапазон скоростей вращения шпинделя, об/мин	200 – 2 500
9	Максимальное усилие по оси R, кН	150
10	Максимальное усилие сварки по оси X, кН	40
11	Максимальное усилие сварки по касательной в плоскости кольцевого шва, кН	40
12	Максимальная мощность привода шпинделя, кВт	40
13	Максимальная общая потребляемая мощность, кВт	70

#### 4.3.4 Установка для сварки резервуара из колец (обечаек) и днищ

Общая компоновка установки для сварки резервуара из колец (обечаек) и днищ, ее рабочая зона и сварочный узел представлены соответственно на рисунках 4.32 и 4.33. Установка оснащается специальным складным разжимным кольцом, которое на заключительном этапе сварки (сварка фланцевого дна с кольцом) легко удаляется через отверстие во фланце дна (рисунок 4.34).

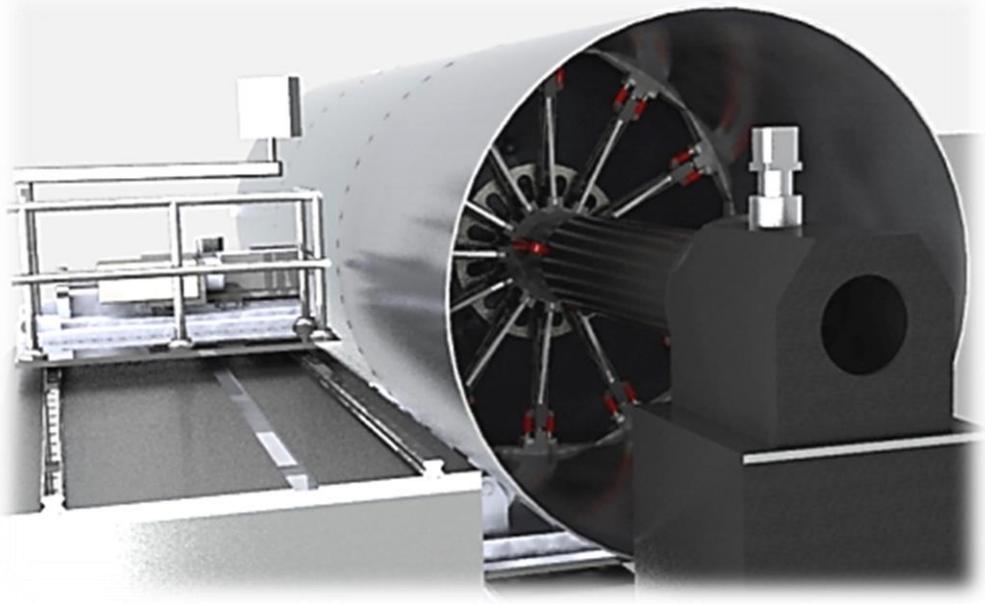


Рисунок 4.32 – Общая компоновка и рабочая зона сварочного узла установки

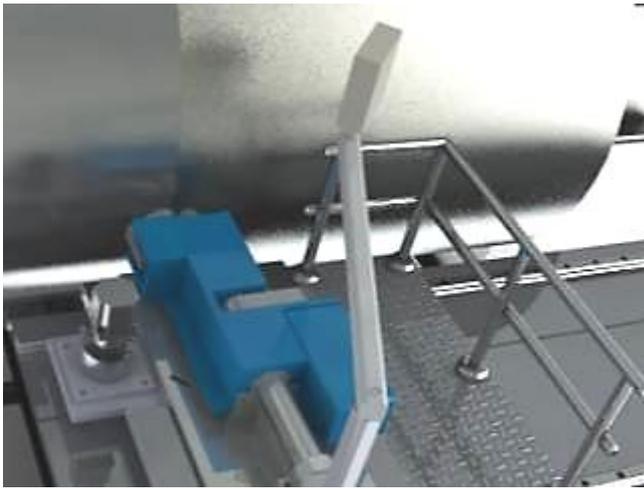


Рисунок 4.33 – Рабочая зона сварочного узла установки

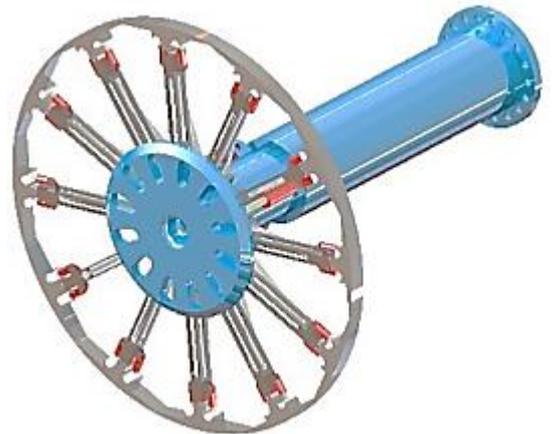


Рисунок 4.34 – Складное разжимное опорное кольцо

Для обеспечения жесткости с обратной стороны бака предусмотрены опорные ролики (рисунок 4.35). Перемещение заготовки бака при переходе к сварке следующего кольца производится системой роликов, обеспечивающих как возможность вращения бака при сварке, так и осевое его перемещение при настройке на сварку следующего кольца. Предусмотрена также система стягивания бака с очередным кольцом необходимая для устранения раскрытия стыка при сваривании. Вариант 3D модели установки представлен на рисунке 4.36.

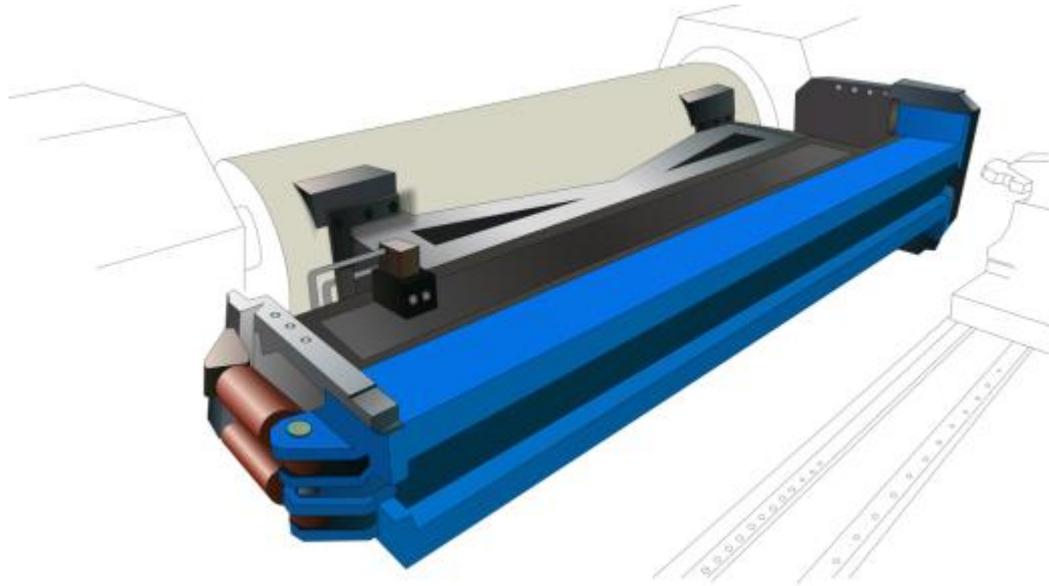


Рисунок 4.35 – Опоры для обеспечения жесткости с обратной стороны бака

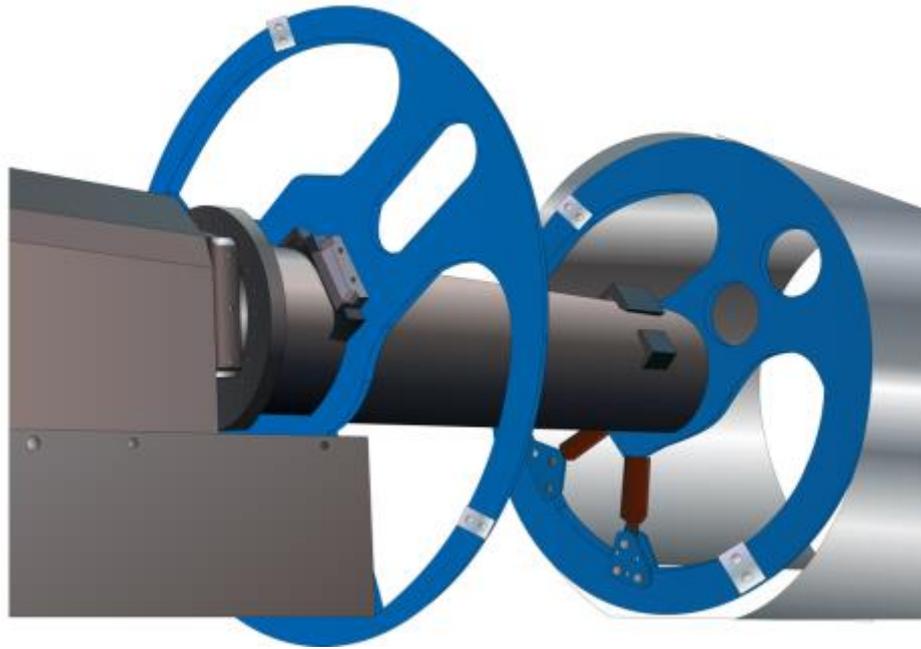


Рисунок 4.36 – Модели оборудования для перемешивающей сварки трением изделий РКТ

Основные характеристики, обеспечивающие технологические возможности установки представлены в таблице 4.4. Каждая установка оснащается сменными шпинделями для обычного инструмента, инструмента с регулируемым профильным наконечником и катушечного инструмента. Во всех установках предусматривается система контроля основных технологических параметров процесса и

может быть использована система комплексного ультразвукового и вихретокового контроля качества шва.

Таблица 4.4 – Параметры установки для сварки резервуара из колец (обечаек) и днищ

№ п/п	Параметр	Величина
1	Диапазон толщин свариваемых деталей из алюминиевого сплава, мм	5 - 35
2	Суммарная длина резервуара, мм	18 000
3	Диаметр резервуара, мм	5 500
4	Максимальная скорость сварки, м/мин	2
6	Максимальное перемещение шпинделя по оси Z, мм	500
7	Максимальное перемещение шпинделя по оси X, мм	3 000
8	Диапазон скоростей вращения шпинделя, об/мин	200 – 2 500
9	Максимальное усилие по оси Z, кН	150
10	Максимальное усилие сварки по оси X, кН	40
11	Максимальное усилие сварки по касательной в плоскости кольцевого шва, кН	40
12	Максимальная мощность привода шпинделя, кВт	40
13	Максимальная общая потребляемая мощность, кВт	70

#### 4.4 Технологическая экспертиза производственной целесообразности применения сварки трением с перемешиванием в специальных задачах аэрокосмического производства

На стадиях жизненного цикла сложной наукоемкой продукции специального машиностроения, включающих разработку, производство, эксплуатацию, часто необходимо принимать решения в условиях недостаточной информации, при неясных алгоритмах решения проблемы, в условиях риска [36, 37, 39, 48].

Сложные технические и технологические системы обладают огромным количеством как тактико-технических параметров, так и параметров, отражающих совершенство технологий изготовления, экономические аспекты производства, эксплуатации. При этом оценка многих параметров носит субъективный характер. Соотношение между высокими технологиями и себестоимостью в производстве наукоемкой продукции также является предметом неоднозначной оценки. Тем не

менее, в таких условиях необходимо принимать научно-обоснованные решения, от которых зависит стратегия развития предприятий. Технологические решения служат основой для разработки конструкторско-технологических мероприятий и соответствующей документации, направляемых для исполнения и внедрения в производство [72, 94, 95]. Технологический аудит служит основой для разработки конструкторско-технологических мероприятий и соответствующей документации, направляемых для исполнения и внедрения в производство [5, 9, 47-50, 60, 72].

В условиях ограниченного ресурса времени и средств на принятие технологических решений эффективным средством является применение автоматизированных систем сопровождения принятия технических решений, основанных на алгоритмах многомерной и многокритериальной оптимизации, математической статистики, обработки экспертных мнений специалистов.

Для реализации метода экспертного оценивания технологических решений было разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно произвести сбор и обработку экспертных мнений в области инновационных технологий сложного формообразования деталей и конструкций. Укрупненный алгоритм функционирования программного комплекса (рисунок 4.37) отражает взаимосвязей отдельных модулей системы и процесс итерационного приближения к результатам научно-технической экспертизы, то есть с достаточными показателями точности, достоверности и согласованности.

В данном случае оценивалась производственная целесообразность метода сварки трением с перемешиванием в качестве технологии соединения компонентов конструкции спец. изделий авиакосмической техники. Сравнительному анализу подвергались пять технологических альтернатив – методов сварки, характеризующихся различными технологическими, эксплуатационными и экономическими характеристиками: сварка трением с перемешиванием, электродуговая сварка, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка, газовая сварка.



Рисунок 4.37 – Алгоритм экспертной оценки при коллективной экспертизе

Альтернативные технологические методы обладают как достоинствами, так и недостатками. Поэтому не всегда очевидно, какой метод оптимален в применении в конкретном технологическом процессе соединения различных конструкций из различных материалов. Сравнение сварки перемешиванием с другими процессами осуществляется в контексте целесообразности использования данного процесса в условиях авиационного производства. При анализе технологических возможностей методов рассматривался физический принцип формирования соединения, область применения, эксплуатационные характеристики сварного шва. Также внимание уделялось выявлению специфических достоинств и недостатков метода.

При формировании массива критериев в подсистеме организации экспертизы учитываются такие группы, как:

1) *Функциональные показатели* качества объекта, т.е. сварного соединения, отражающие степень совершенства работоспособности соединения (прочность, герметичность, остаточные деформации, структура и т.п.);

2) *Технологические показатели* процесса сварки, отражающие степень совершенства технологии выполнения сварного шва (скорость выполнения, возможность автоматизации, энергоёмкость, необходимая квалификация исполнителя, универсальность и т.п.);

3) *Экономические и эргономические показатели* (трудоемкость, ресурсоемкость, стоимость, удобство выполнения, безопасность и т.п.);

Принимая во внимание цели и задачи технологической экспертизы, можно отметить, что весомость оценки технологических объектов по различным критериям не одинакова. Известны различные методы расстановки приоритетов, основанных на математических процедурах разной сложности (статистика, векторная алгебра, анализ), отличающиеся точностью, быстродействием, трудоемкостью, разрешающей способностью и другими показателями алгоритмической эффективности: экстремальный анализ целевых функций, анализ иерархий, применение фундаментальной шкалы предпочтений [83], ранжирование [61]. Возможны промежуточные и комбинированные решения [27, 35-37, 72]. В практике экспертной деятельности выбор метода расстановки приоритетов часто ограничивается скоростью принятия решения в нечетких условиях и в условиях нехватки информации. Результатом обработки экспертного мнения по оценке приоритета критериев в автоматизированной системе является диаграмма (рисунок 4.38) с определением атрибутов согласованности мнений.



Рисунок 4.38 – Номенклатура критериев и оценка их значимости

Разработанная автоматизированная система сопровождения принятия решений использует алгоритм многомерной и многокритериальной оптимизации, математической статистики. Инфологическая модель данных при реализации информационных процессов обработки экспертных оценок представляет многомерную матричную структуру. Программная реализация автоматизированной системы органично ложится на комбинацию методов реляционного представления данных в MS Excel и информационного представления иерархических сетей в MatLAB [47-50, 52, 62, 113].

Интегральная оценка технологических альтернатив по критериям включает установление для каждого  $m$ -го варианта решения экспертной оценки степени удовлетворения (выполнения, качества) требований по каждому  $j$ -му критерию ( $F_{jm}$ , в баллах); расчет взвешенного показателя качества сравниваемых вариантов по каждому критерию ( $f'_{jm} = F_{jm} \cdot q'_j$ ) с учетом значимости (важности) критерия; расчет комплексного (интегрального) показателя качества каждого варианта как суммы локальных оценок с учетом весового вклада значимости критериев ( $Q_m = \sum_j f'_{jm}$ ); обобщение мнений, полученных от каждого эксперта с учетом коэффициентов квалификации и значимости членов экспертной группы.

Степень согласованности мнений экспертов в теории ранговой корреляции выражается через коэффициент конкордации  $W = 12S(n^2(M^3 - M))$ , где  $S$  – сумма квадратов отклонений оценок рангов каждого объекта экспертизы от среднего значения;  $n$  – число экспертов;  $M$  – число объектов экспертизы. Расчет коэффициента конкордации использует процедуру ранжирования объектов анализа экспертами и оценку коррелированности мнений экспертов в определении приоритетов. Результаты экспертизы отражаются в табличном и графическом виде (рисунок 4.39). Диаграмма отражает коллективное мнение с учетом квалификации и весомости мнений экспертов. Заключение технологической экспертизы формируется с расчетом и указанием качества по параметрам согласованности, точности и достоверности.

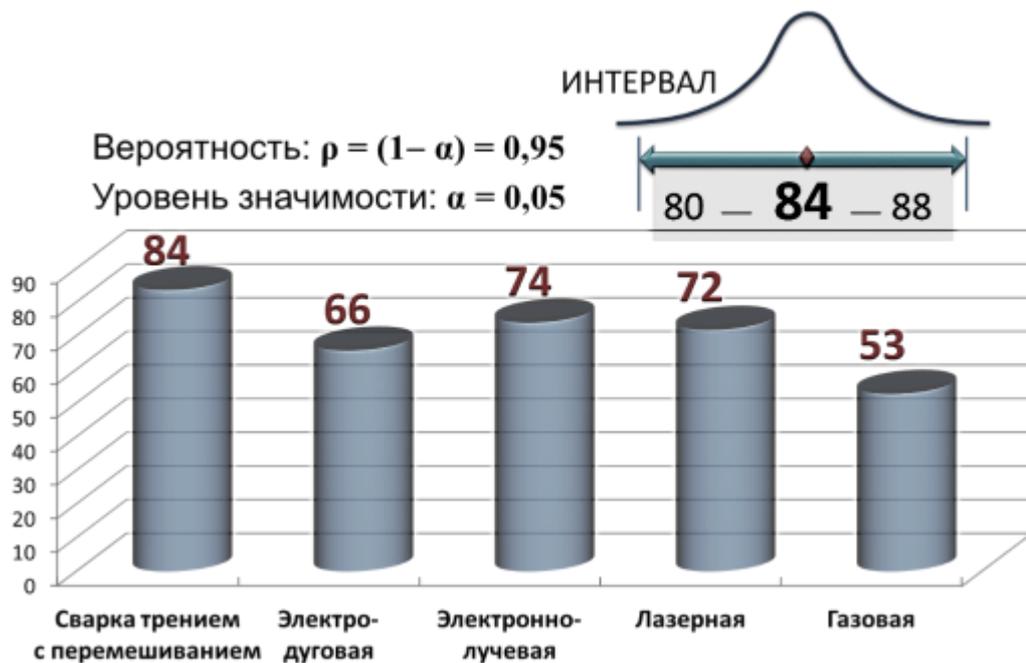


Рисунок 4.39 – Диаграмма сравнения технологических вариантов сварки по интегральной оценке

В ходе технологической экспертизы были получены высокие оценки производственной целесообразности технологий получения неразъемных соединений в базовых конструкциях авиакосмической техники из легких сплавов.

Гибкость, чувствительность и динамика реагирования автоматизированной системы технологической экспертизы под влиянием изменчивости технического задания, целей и точки зрения на объект оценки ярким образом отразилась в случае другой постановки задачи. Так, формулировка задания в виде оценки эффективности применения сварки трением для монтажа электрических коммуникаций из многожильных проводов цветных металлов (алюминиевых, медных) показала значительное возрастание интегрального показателя конструкторско-технологической, экономической и эргономической привлекательности данного метода по сравнению с такими традиционными способами, как пайка, обжатие, клеммирование и сварка электродом [38].

Опытная эксплуатация программно-информационного комплекса сопровождения технологической экспертизы с высокой степенью согласованности показала преимущество сварки трением по сравнению с электронно-лучевой и существенное опережение других технологических альтернатив сварки примени-

тельно к неразъемным соединениям в базовых конструкциях авиакосмической техники.

Сравнение процессов сварки трением и сварки плавлением материала по параметрам качества соединения и производственной эффективности приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнение перемешивающей сварки трением со сваркой плавлением

Показатель	Перемешивающая сварка трением	Сварка плавлением
Тип процесса	В твердой фазе	С плавлением материала
Скорость процесса сварки	150...450 мм/мин вне зависимости от толщины материала	150...250 мм/мин в зависимости от толщины материала
Наличие деформаций	Отсутствуют деформации	Очень сильные деформации тонких материалов
Прочность шва	Выше 90% от базового материала	Около 80% от базового материала
Предварительная подготовка, обработка после сварки	Нет необходимости в предварительной подготовке и обработке после сварки. Необходимо удаление отверстия от сварочного инструмента	Необходима предварительная очистка и подготовка кромок, зачистка после сварки
Свариваемые материалы	В основном легкие сплавы, возможна сварка сталей и других сплавов, сварка разнородных материалов	В основном стали. Сложность сварки сплавов на других основах и разнородных материалов
Технологические возможности	Возможна сварка деталей сложной формы, всех типов соединений. Невозможна ручная сварка	Возможна сварка деталей сложной формы, всех типов соединений. Возможна ручная сварка
Стоимость процесса сварки	Низкая стоимость, нет затрат на вспомогательные материалы и операции	Высокая

По мнению ведущих экспертов, данный процесс является весьма перспективным в области сварки листовых материалов из легких сплавов (алюминиевых и магниевых). Данную технологию считают ключевой для создания авиационной техники пятого и шестого поколений.

## Выводы по главе 4

В четвертой главе, посвященной разработке специального оборудования и средств технологического оснащения перемешивающей сварки трением, получены следующие результаты:

1. Разработаны опытные установки высокоскоростной перемешивающей сварки трением (ВСПСТ-1, ВСПСТ-М, УСТ ВСПСТ-Р1).

2. Спроектированы специальная оснастка и инструмент для получения швов различной конфигурации: круговых, трубчатых, коробчатых, сложной формы.

3. Выполнены образцы конструкций элементов авиационной техники – корпусов, обечаек, узлов двигателей летательных аппаратов.

4. Организована и проведена технологическая экспертиза производственной целесообразности применения 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.

## 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 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий Российской Федерации».
2. Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы. Утв. постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 301.
3. Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы». Утв. постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 303.
4. Государственная программа Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013 – 2020 годы» /Основные положения государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013 - 2020 годы» для открытого опубликования на сайте Роскосмоса: <http://www.federalspace.ru/115/> Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 306.
5. ГОСТ 23554.1-79. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции.
6. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 1981-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2005.
7. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 1960-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007.
8. ГОСТ Р ИСО 857-1-2009. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Процессы сварки металлов. Термины и определения.
9. СТП 11313707 - 03.001 - 93. Типовой технологический процесс экспертизы (ТТПЭ). Основные положения. Стандарты предприятия (РИНКЦЭ), зарегистрированные в Госстандарте России.

10. А. С. 195846 СССР. Кл. МПК В 23 К. Способ сварки металлов трением / Ю.В. Клименко; опубл. 01.01.1967, Бюл. № 10. (приоритет от 09.11.1965 г.).
11. Атрощенко В.В., Неразрушающий контроль сварных соединений блисков, полученных линейной сваркой трением / Атрощенко В.В., Бычков В.М., Медведев А.Ю., Савичев М.П., Кривалёв И.В. // Сварка и диагностика. 2014. №4. С.43-46.
12. Бакшаев В. А., Васильев П. А., Гордон Л. К., Тодин Ю. А., Васильев С. В. Технология сварки трением с перемешиванием в производстве алюминиевых полуприцепов // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 12. С. 13–17.
13. Бакшаев В.А., Васильев П.А., Трифонов В.П., Христофоров О.В., Кайбышев Р.О., Тагиров Д.В., Малофеев С.С. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов при производстве автомобильных полуприцепов // Сварщик. 2012. № 3. С. 12–15.
14. Бакшаев В.А., Васильев П.А., Васильев С.В. и др. Сварка трением с перемешиванием. Контроль параметров и управление процессом / Сварщик в России. № 1, 2014, с.24- 27.
15. Бакшаев В. А., Васильев П. А. Сварка трением с перемешиванием в производстве крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. – 2014. – № 1. – С. 75-79.
16. 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.
17. Бойцов А.Г., Качко В.В., Курицын Д.Н. Сварка трением перемешиванием / РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 10 (88). С. 38-46.
18. 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. DOI: 10.14489/hb.2014.08.pp.009-017.
19. 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.

20. 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. / под ред. Н.В. Бекренева и У.В. Боровских. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2014. – Т.2. – С.146-154.

21. 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.

22. Бойцов А.Г., Люшинский А.В., Баранов А.А. Сварка трением перемешиванием корпусных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов / Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 7. С. 3-11.

23. Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю., Супов В.А., Большаков Б.О., Гринь Р.Р., Мусин Ф.Ф. / Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП-742 методом линейной сварки трением. Вестник УГАТУ – 2012, Т. 16, №7 (52). С.112–116.

24. Газизов, Р.К. Анализ эффективности распараллеливания решателей пакета ANSYS Multiphysics при моделировании процесса линейной сварки трением / А.Т. Бикмеев, Р.К. Газизов, В. Ю. Иванов, А.А. Касаткин, В.В. Латыш, С. Ю. Лукашук, И.Ш. Насибуллаев, К.Р. Юлмухаметов, А.М. Ямилева /Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование, 2011, № 9, 64–75.

25. Денисов Л.В., Курицын Д.Н. Оптимизация конструкции сложнопрофильного инструмента для сварки трением перемешиванием: XI Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 7-11 апреля 2014 г. – М.: МАТИ, 2014. Т.2. С.59-60.

26. Денисов Л.В., Грачев М.В., Пискарев А.С. Программа генерирования управляющего кода для FANUC 3M ЧПУ систем на основе двумерного чертежа формата DXF. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ А.с. № 2010614432. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 июля 2010 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам РФ, 2010.

27. Егоров И.Н. Разработка методики сравнительной экспертной оценки технологических проектов. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 32 с.
28. Изготовление и исследование экспериментальных образцов фюзеляжа самолёта МС-21, изготовленных с применением СТИР технологии / Отчет по ОКР по договору № МС-21/21-10/04 от 29 марта 2010 г. – М.: ОАО ВНИИАЛМАЗ. 2010. 60 с.
29. Ищенко А.Я., Подбельников С.В., Покляцкий А.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. 2007. №11. С.32-38. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины).
30. Качко В.В., Курицын Д.Н. Исследование влияния технологических факторов высокоскоростной перемешивающей сварки трением на качество получаемых соединений: XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 10-14 апреля 2012 г. – М.: МАТИ, 2012. Т.2. С.52-53.
31. Качко В.В., Курицын Д.Н., Бойцов А.Г. Технологические возможности и области применения высокоскоростной перемешивающей сварки трением: Новые материалы и технологии – НТМ-2012. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 20-22 ноября 2012 г. – М.: МАТИ, 2012. – 410 с. С. 143-144.
32. 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.
33. Карманов В.В., Каменева А.Л., Карманов В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: Сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – No 32. – С. 67-80.
34. Котлышев Р.Р. Шучев К.Г., Крамской А.В. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10, No5. – С. 648-654.
35. Круглов В.И., Ершов В.И., Чумадин А.С., Курицына В.В. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении: Учебное пособие. – М.: Логос, 2011. – 432 с.

36. Курицын Д.Н. Экспертные системы, их возможности, перспективы развития в области программ испытаний летательных аппаратов: XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 1-5 апреля 2008 г. – М.: МАТИ, 2008. Т. 2 - С. 95-96.

37. Курицын Д.Н. Возможности экспертных методов в системе аттестации студентов по специальным дисциплинам: XXXV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конф. в 8 томах. Москва, 7-10 апреля 2009 г. – М.: МАТИ, 2009. Т. 4. С.233-235.

38. Курицын Д.Н. Проект малогабаритного мобильного устройства для сварки трением медных и алюминиевых проводов: XXXVII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 5-8 апреля 2011 г. – М.: МАТИ, 2011. Т. 2. С.38-40.

39. Курицын Д.Н., Качко В.В. Применение метода экспертных оценок в принятии технологических решений: XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. Москва, 10-14 апреля 2012 г. – М.: МАТИ, 2012. Т.2. С.53-54.

40. 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)

41. Курицын Д.Н., Качко В.В. Исследование конструктивно-технологических схем сварки трением перемешиванием соединений сложной формы: XXXIX Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 9-13 апреля 2013 г. – М.: МАТИ, 2013. Т.2. С.53-54.

42. 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.

43. Курицын Д.Н. Технологические возможности высокоскоростной перемешивающей сварки трением / Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ. 26 – 27 ноября, Всероссийский выставочный центр – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2013. С.107-110.

44. Курицын Д.Н., Денисов Л.В., Пискарев А.С., Бойцов А.Г. Технологии и специальное оснащение высокоскоростной сварки трением с перемешиванием металлоконструкций: Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин // Программа XI Международной научно-практической конференции, 15-16 декабря 2015 г. Москва, ГОСНИТИ. – М.: ГОСНИТИ, 2015. С.21.

45. 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.

46. 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.

47. Курицын Д.Н. Информационное сопровождение технологического аудита наукоемких производств / Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сб. тезисов докладов: В 4 т. Т. 3: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С.293-294.

48. Курицына В.В., Косов Д.Е., Курицын Д.Н. Экспертное оценивание, как инструмент технологического менеджмента производственных подразделений авиастроительных предприятий: Новые материалы и технологии – НТМ-2012. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 20-22 ноября 2012 г. – М.: МАТИ, 2012. – 410 с. С.145-146.

49. Курицына В.В., Косов Д.Е., Курицын Д.Н. Автоматизация задач экспертного оценивания в процедурах технологического менеджмента авиационного производ-

ства: Научные труды (Вестник МАТИ), 2012 г. Вып. 19 (91). – М.: МАТИ, 2012. С. 162-173.

50. 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. Т.8. № 4. С.44-55.

51. 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).

52. 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.

53. Лукин В.И., Ерасов В.С., Пантелеев М.Д., Автаев В.В., Саморуков М.Л., Кулик В.И. Освоение сварки трением с перемешиванием применительно к конструкции крыла самолета // Сварочное производство. 2017. № 6. С. 44-48.

54. Лукин, В.И. Сварка трением с перемешиванием прессованной панели из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 / Лукин В.И., Иода Е.Н., Саморуков М.Л., Пантелеев М.Д. В сборнике: Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года Сборник докладов III Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «ВИАМ». 2016. С. 30

55. Лукин, В.И. Метод линейной сварки трением сочетания жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР С ЭП975-ИД / Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Ковальчук В.Г., Даутов С.Х., Супов А.В., Саморуков М.Л. / Научно-технологические технологии в машиностроении. 2016. № 3 (57). С. 28-34.

56. Лукин, В.И. Сварка трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 И В-1469 / Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А., Овчинников В.В. / Сварочное производство. 2015. № 7. С. 21-25.

57. Макаров Э.Л., Королев С.А., Штрикман М.М., Кащук Н.М. Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке / Сварка и диагностика. 2010. № 3. С. 21-25.
58. Медведев А.Ю., Бычков В.М., Селиванов А.С., Павлинич С.П., Даутов С.Х., Супов А.В. / Применение линейной сварки трением для соединения сплавов ВТ6 и ВТ8-1. Вестник УГАТУ – 2012. Т. 16, № 7 (52). С.68–71.
59. Медведев А.Ю., Применение линейной сварки трением для соединения сплавов ВТ6 и ВТ8-1 / Медведев А.Ю., Бычков В.М., Селиванов А.С., Павлинич С.П., Даутов С.Х., Супов А.В. // Сварочное производство. 2014. №1. С.17-20.
60. Модельный закон «О научной и научно-технической экспертизе» – М.: ФГУ НИИ РИНКЦЭ, 2003. (Принят на двадцатом пленарном заседании Межпарламентской Ассамблеи государств – участников СНГ (постановление №22-17 от 15 ноября 2003 г.)
61. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: учебник: в 3 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009. Ч. 2: Экспертные оценки. – 2011. – 486 с.
62. Отчет о технологическом аудите инструментального цеха ОАО «Краснозаводский химический завод» / Научно-технический отчет по теме № 003-СП/ТА/ДТП от 21.05.2015. Научн. руководитель Бойцов А.Г. Отв. исп. Курицын Д.Н., исполнители Грачев М.В., Чумадин А.С., Денисов Л.В. – М.: АО «ВНИИАЛМАЗ». 2015. 91 с.
63. Патент на изобретение RUS 2173619 22.11.2000. Способ сварки трением / Штрикман М.М. Заявка: 22.11.2000. Публикация патента: 20.09.2001.
64. Патент на изобретение RU (11) 2 277 465(13) С1, Кл. МПК В 23 К 20/12 (2006.01). Способ сварки трением и инструмент для его осуществления / Сироткин О.С., Штрикман М.М., Шилло Г.В., Плихунов В.В., Половцев В.А, Сабанцев А.Н. Патентообладатель: Открытое акционерное общество "Национальный институт авиационных технологий" (ОАО "НИАТ"). Заявка № 2004128737/02, 29.09.2004. Опубликовано: 10.06.2006 Бюл. №16.
65. Патент на изобретение RU (11) 2289496 МПК В23К20/12 (2006.01). Способ фрикционной сварки с перемешиванием материала заготовок (варианты) / Половцев В.А., Шилло Г.В., Макаров Н.В., Главочевский Д.Ф. Патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический науч-

но-производственный центр им. М.В. Хруничева». Заявка: 2005117497/02, 08.06.2005. Опубликовано: 20.12.2006.

66. Патент на изобретение RUS 2418664 10.09.2009 Способ сварки трением с перемешиванием тавровых соединений и инструмент для его осуществления // Штрикман М.М., Пинский А.В. 2009.

67. Патент на изобретение №2350443. Способ сварки трением алюминиевых сплавов. // Алексеев В.В., Овчинников В.В., Рязанцев В.И., Манаков И.Н., Гуреева М.А. Заявка №2006124672 с приоритетом от 10.07.2006г. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27.03.2009.

68. Патент на изобретение RU № 2393070. Способ сварки трением с перемешиванием. / Крысанов О.Н., Качко В.В., Клиппенштейн А.Д. Заявка № 2008148775. 2010.

69. Патент на изобретение RU № 2393071. Способ сварки трением с перемешиванием и инструмент для сварки трением с перемешиванием /Бойцов А.Г., Качко В.В./ Заявка № 2008148777. 2010.

70. Патент на изобретение RU № 2476298. Устройство для сварки трением длиннономерных деталей / Бойцов А.Г., Горбовской В.Е., Качко В.В., Плешаков А.С. / Заявка № 2011116900/02, 28.04.2011. 2013.

71. Патент на изобретение 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. Патентообладатель: Акционерное общество «Раменское приборостроительное конструкторское бюро». Заявка № 2015150496, 25.11.2015. Опубликовано: 06.06.2017 Бюл. № 16.

72. Патраков Н.Н., Курицына В.В. Основы технологического менеджмента качества прецизионных деталей авиакосмической техники. – М.: Издательский центр МАТИ, 2003. – 325 с.

73. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Подбельников С.В. Сварка трением с перемешиванием – эффективный способ получения неразъемных соединений в твердой фазе (обзор). // Журнал «Сварщик». 2007. №3.

74. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Чайка А.А., Лабура Т.М. Сварка трением с перемешиванием – эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик

конструкций // Автоматическая сварка. 2010. №4. С.45-50. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

75. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Подбельников С.В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм // Автоматическая сварка. 2008. №10. С.27-30. (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины).

76. Половцев В. А., Макаров Н. В., Шилло Г. В., Сабанцев А. В., Смирнова Т. Н., Штрикман М. М. Фрикционная сварка алюминиевых лайнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 24–27.

77. Предко П.Ю., Фролов В.А., Никитина Е.В. Перспективы применения в авиакосмической области сварки трением с перемешиванием сплавов системы AL-MG-SC / Авиационная промышленность. 2012. № 3. С. 11.

78. Разработка КД, технологии изготовления сварочного инструмента, изготовление образцов сварочного инструмента, апробация и испытание их при фрикционной сварке сочетаний сплавов на основе алюминия, титана и железа / Научно-технический отчет по теме № 05ОКР/2013-1146/0702-13 от 06.05.2013. ОАО «Композит». Научн. руководитель Бойцов А.Г., Исполнители: Качко В.В., Плешаков А.С., Курицын Д.Н., Денисов Л.В. – М.: ОАО ВНИИАЛМАЗ. 2013. 30 с.

79. Разработка КД, технологии изготовления сварочного инструмента, изготовление образцов сварочного инструмента, апробация и испытание их при фрикционной сварке сочетаний сплавов на основе алюминия, титана и железа / Отчет о патентных исследованиях по ОКР № 1/КБ Договор от 06.05.2013 № 05ОКР/2013-1146/0702-13 Научн. руководитель Бойцов А.Г., Исполнители: Качко В.В., Плешаков А.С., Курицын Д.Н., Булгакова В.А., Балашова Н.В. – М.: ОАО ВНИИАЛМАЗ. 2013. 77 с.

80. Разработка КД, технологии сварочного инструмента, изготовление образцов сварочного инструмента, апробирование и испытание их при фрикционной сварке сочетаний сплавов на основе титана и железа / Технический отчет по ОКР № 4/КБ шифр ОКР «Фрисква»-А. Научн. руководитель Бойцов А.Г. Исполнители: Плешаков А.С., Курицын Д.Н., Денисов Л.В., Булгакова В.А.–М.:ОАО ВНИИАЛМАЗ.2014. 33 с.

81. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Анализ инородных включений при сварке трением с перемешиванием / Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 260

82. Рубцов В.Е., Тепловизионный мониторинг качества сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием / Рубцов В.Е., Руденский Г.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф., Васильев П.А., Бакшаев В.А. // Сварка и диагностика. 2015. № 1. С. 15-19.

83. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Пер. с англ. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 360 с.

84. Селиверстов А.Г., Ткаченко Ю.М., Куликовский Р.А., Брагинец В.И., Зяхор И.В. Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава ВТЗ-1 // Автоматическая сварка. – 2013. – № 1. – С. 29-34.

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

86. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. Пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. М.: Машиностроение, 2003. 512 с.

87. Фролов В.А., Иванюхин А.Н., Сабанцев А.Н., Диденко С.А., Конкевич В.Ю., Белоцерковец В. В. Сварка трением с перемешиванием – плюсы и минусы // Сварочное производство. 2008. № 10. С.12-19.

88. Фролов В.А., Конкевич В.Ю., Предко П.Ю., Белоцерковец В.В. Сварка трением с перемешиванием термически упрочняемого сплава В95 системы AL-ZN-MG-CU / Сварочное производство. 2013. № 3. С. 21-26.

89. Штрикман М.М., Половцев В.А., Шилло Г.В., Макаров Н.В., Сабанцев А.Н. Фрикционная сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМГ6 // Заготовительные производства в машиностроении. 2004. №04.

90. Штрикман М.М. Сварка линейным трением /Технология машиностроения. 2009. № 4. С. 26-31.
91. Штрикман М.М., Пинский А.В., Кащук Н.М. Фрикционная сварка тавровых соединений листовых конструкций из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2010. № 12. С. 3-7.
92. Штрикман М.М., Кащук Н.М. Определение тепловых напряжений и деформаций при фрикционной сварке трехслойных панелей из алюминиевых сплавов // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 29.
93. Штрикман М.М., Егоров В.Н., Кащук Н.М. Технология комбинированной фрикционной сварки конструкций авиационной техники // Авиационная промышленность. 2012. № 4. С. 7.
94. Юрин В.Н. Анализ альтернативных решений. / Методические указания – М.: МАТИ, Кафедра ТПДЛА, 2009. – 12 с.
95. ISO 9000:2005. «Quality management system – Fundamentals and vocabulary»
96. Arbegast W.J. Friction stir welding. After a decade of development// Welding J. – 2006. – 85, №3. – P. 28 – 35.
97. Buffa G., Fratini L., Micari F. Settineri L. On the Choice of Tool Material in Friction Stir Welding of Titanium Alloys. Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 40, 2012, p.10.
98. Cho J.H., Boyce D.E., and Dawson P.R. Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel. Materials Science and Engineering A, 398:146–163, 2005.
99. Dalle Donne C., Lima E., Wegener J. et al. Investigation on residual stresses in friction stir welds// Proc. of the 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27 – 28 September, 2001.
100. Dawes C.J. and Thomas W.M. Friction stir process welds aluminum alloys. Welding Journal, 75(3):41 – 45, 1996.
101. Ding J., Carter R., Lawless K. et al. Friction Stir Welding Flies High at NASA // Welding Journal – 2006. – March. – No3. – P. 54-59.

102.Feng Zhili, Wang Xun-Li, David Stan A., and Sklad Phil. Modeling of residual stresses and property distribution in friction stir welds of aluminum alloy 6061-T6. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 37831.

103.Ferrasse S., Verrier P. and Meesemeacker F. Resistance spot weldability of high-strength steels for use in car industry. *Welding in the World*, 41(2), 1998. p.177-195.

104.FSW Technical Handbook, ESAB AB, Welding Automation, SE-695 81 LAXÅ, Sweden. 2012. P.52. Phone: +46 584-81000, www.esab.com.

105.Gu X., Li G., Chai P., Dong Ch., Luan K. FSW of Hydrogenated Titanium Alloy // 7<sup>th</sup> FSW Symposium, Awaji, May 20-22, 2008. P.25.

106.Hancock R. Friction welding of Aluminum Cuts Energy Cost by 99% / *Welding Journal*, vol. 83. 2004. pp. 40.

107.Imuta M., Kamimuki K. Development and Application of Friction Stir Welding for Aerospace Industry// Proc. of the IIW International Conference on Technical Trends and Future Perspectives of Welding Technology for Transportation, Land, Sea, Air and Space, Osaka, Japan, 15 – 16 July, 2004. – P. 53 – 64.

108.Iwashita T. Method and Apparatus for Joining. US Patent 6601751 B2, Aug. 5, 2003.

109.Jata K.V., Reynolds A.P. Microstructure and Mechanical Behavior of Friction Stir Welded Titanium Alloys / O.N. Senkov et al. (eds.), *Metallic Materials with High Structural Efficiency*, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 2004. p.391–400.

110.Khaled Terry. An outsider look at friction stir welding /Report #: ANM-112N-05-06 july 2005.

111.Kumagai M. Application of FSW for aircraft// *Welding Technology*. – 2003. – 51, №5. – P. 74 – 78.

112.Kuriyama, T. Advantages of Aluminum Alloy Rolling Stocks and Transition of Carbody Structures / T. Kuriyama // *Journal of Light Metal Welding and Construction*. – 2008. – No9. – P. 418–421.

113.Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N. Automation Expert Assessment in the Procedure of Technological Audit of Industrial Enterprises // *European Science and Technology [Text]: 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

114.Mishra R. S. Friction stir welding and processing / ed. by Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney – ASM International. 2007. 360 p.

115.Mishra R.S., Maba Z.Y. Friction stir welding and processing / Materials Science and Engineering R 50 (2005), page 1–78.

116.Okamura, H. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2000. – No4. – P. 166–172.

117.Prime M. B., Gnäupel-Herold T., Baumann J.A., Lederich R.J., Bowden D.M., Sebring R.J. Residual Stress Measurements in a Thick, Dissimilar Aluminum Alloy Friction Stir Weld / Acta Materialia, 54(15), 4013-4021, 2006.

118.Research, pages 203–211, Materials Park, Ohio, USA, 2003. ASM International.

119.Shinoda T., Kawai M. and Takegami H. International Institute of Welding Pre-Assembly Meeting on Friction Stir Welding, Nagoya University, Nagoya, Japan, 9 July 2004.

120.Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C. et al. Friction stir butt welding / US Pat. No 5 460 317. 1991. Опубл. 1995.

121.Thomas W.M., Dawes C.J. et al., Friction Stir Butt Welding, International Patent Application PCT/GB92/02203 and G.B. Patent Application 9125978.8, Dec 1991

122.Thomas W.M. and Dolby R.E. Friction stir welding developments. In S.A. David, T. DebRoy, J.C. Lippold, H.B. Smartt, and J. M. Vitek, editors, 6th Int. Trends in Welding.

123.Volpone M., Mueller S.M. Friction stir welding (FSW): le ragioni di un successo// Rivista Italiana della Saldatura. – 2005. – №1. – P. 23 – 30.

124.Вебсварка – все о сварке. Сварка цветных металлов. 2015. [Электронный ресурс] [http://websvarka.ru/weld\\_15.html](http://websvarka.ru/weld_15.html) .

125.ГОСТы по сварке. Основные сварочные термины [Электронный ресурс] <http://www.gost-svarka.ru/nomerGost.htm>

126. Информационный технический портал. Сварка металлов [Электронный ресурс] <http://www.tehnoarticles.ru/svarkametalla/index.html>

127. Классификация способов сварки / Хренов К.К. Сварка, резка и пайка металлов [Электронный ресурс] [http://www.autowelding.ru/publ/1/1/klassifikacija\\_sposobov\\_svarki/3-1-0-6](http://www.autowelding.ru/publ/1/1/klassifikacija_sposobov_svarki/3-1-0-6) .

128. Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента «ВНИИАЛМАЗ»: [Электронный ресурс] [www.vniialmaz.ru](http://www.vniialmaz.ru)

129. Сварка трением. Термины и определения [Электронный ресурс] [http://www.gost-svarka.ru/svarka\\_termini\\_opredeleniya/vidy\\_svarki/svarka\\_treniem.htm](http://www.gost-svarka.ru/svarka_termini_opredeleniya/vidy_svarki/svarka_treniem.htm)

130. Friction Stir Welding. Benefits of Friction Stir Welding (FSW) [Электронный ресурс] <http://www.fswelding.com/>

131. FSRL. Friction Stir Welding. 2004. Brigham Young University. All Rights Reserved. [Электронный ресурс] <http://fsrl.byu.edu/index.html>

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Патент на изобретение

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2621514

**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С  
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Раменское приборостроительное конструкторское бюро" (RU)*

Авторы: *Люшинский Анатолий Владимирович (RU), Баранов Андрей Александрович (RU), Бойцов Алексей Георгиевич (RU), Плешаков Андрей Сергеевич (RU), Качко Владимир Владимирович (RU), Курицын Денис Николаевич (RU)*

Заявка № 2015150496

Приоритет изобретения 25 ноября 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 06 июня 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 25 ноября 2035 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

