

На правах рукописи



ИСАЕВ Сергей Леонидович

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ
И ЖАРОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ
РАКЕТНОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

САМАРА 2025

Работа выполнена на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Муратов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Беленький Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов под давлением и родственные процессы», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти Самарской области

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита диссертации состоится «24» декабря 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»: <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Отзывы на автореферат просим выслать в двух экземплярах по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (электронная версия на alya_luts@mail.ru).

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета к.т.н., доцент



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Компрессоры высокого давления, камеры сгорания авиационной и ракетной техники используются в составе двигателя летательных аппаратов. Спецификой данных узлов является работа в условиях как высоких, так и весьма низких температур. Большое значение имеет получение качественных сварных соединений, наличие дефектов в которых может привести к разрушению узлов и сбою в работе двигателя, что может повлечь колоссальные материальные затраты, вплоть до техногенной катастрофы и человеческих жертв.

Одним из наиболее распространенных способов сварки жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов компрессоров высокого давления (КВД), камер сгорания (КС) авиационных (АД) и ракетных (РД) двигателей является электронно-лучевая сварка (ЭЛС). При получении сварных швов методом ЭЛС тепловложение минимально по сравнению с другими способами сварки, что имеет большое значение при получении неразъемных соединений материалов, склонных к растрескиванию. Кроме того, в случае необходимости изготовления сварных соединений конструкций, имеющих сложную форму, сварку возможно выполнить только методом ЭЛС. Данный метод сварки способствует, прежде всего, повышению качества и надежности объектов новой техники. Новые специфические конструктивные решения неразъемных соединений, а также использование перспективных материалов, соединение которых обычными методами сварки не дает желаемых результатов, делают ЭЛС единственным возможным способом для получения неразъемного соединения.

С целью обеспечения минимального веса изделия и получения заложенных конструкторами прочностных характеристик при изготовлении ракетных и авиационных двигателей сварные конструкции ограничивают в основном толщиной от 1,5 мм до 15 мм. Несмотря на большое количество исследований процесса формирования сварных швов при ЭЛС, до сих пор нет однозначных способов, позволяющих получать в условиях производства гарантированно без дефектов сварные соединения из жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов малой толщины, в том числе тонкостенных паяных конструкций. При выполнении ЭЛС деталей КВД, КС АД и РД в сплавах нередко протекают негативные структурные изменения и встречаются дефекты, такие как трещины, поры. Изделия с дефектами приходится дорабатывать, а это усложняет и удорожает производство готовой продукции, а также, увеличивает сроки изготовления, что порой недопустимо.

Целью настоящей работы является обоснование режимов электронно-лучевой сварки жаропрочных и жаростойких сталей и никелевых сплавов, обеспечивающих получение бездефектных сварных соединений с улучшенной структурой и свойствами, для деталей авиационных и ракетных двигателей в условиях серийного производства.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Анализ причин возникновения дефектов в сварных соединениях жаропрочных и жаростойких сталей и никелевых сплавов деталей камер сгорания авиационных и ракетных двигателей в условиях серийного производства.

2. Установление закономерностей влияния режимов электронно-лучевой сварки на структуру и свойства сварных соединений из жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов.

3. Отработка рациональных режимов получения бездефектных сварных соединений методом электронно-лучевой сварки жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов на натурных узлах камер сгорания авиационных и ракетных двигателей.

4. Выработка рекомендаций по электронно-лучевой сварке жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, используемых при изготовлении узлов камер сгорания авиационных и ракетных двигателей.

5. Апробация предлагаемых режимов электронно-лучевой сварки в условиях действующего производства.

Объектом исследования являются сварные соединения жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов деталей компрессора высокого давления и камер сгорания авиационных, а также жидкостных ракетных двигателей, полученные ЭЛС.

Предметом исследования являются особенности формирования состава, структуры и свойств, причины образования дефектов при ЭЛС жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов.

Методы исследований. Поставленные задачи работы решали при помощи теоретического анализа протекающих процессов структурообразования исследуемых сплавов с последующим подтверждением его результатов проведенными экспериментами. Формирование сварных соединений реализовывали на специализированных установках ЭЛС. Для оценки структурного состояния сплавов применялись рентгенографический контроль, методы световой и электронной микроскопии. Химический состав свариваемых материалов и их соединений исследовали на атомно-эмиссионном спектрометре и растровом электронном микроскопе. Оценивался комплекс эксплуатационных механических свойств при испытаниях на растяжение, изгиб, усталость, определении микротвердости.

Достоверность научных результатов обусловлена тем, что при экспериментальных исследованиях использовалось сертифицированное современное исследовательское оборудование, а результаты исследований не противоречат основным положениям материаловедения, подвергались статистической обработке и подтверждены успешным использованием в серийном производстве.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Выявлен механизм образования трещин в сварных соединениях паяных узлов из аустенитной стали 12X18H10T, полученных ЭЛС, заключающийся в оплавлении паяного шва, обогащении элементами его химического состава границ зерен в зоне сварки, их охрупчивании, зарождении и развитии здесь трещин. Установлены режимы ЭЛС, предотвращающие развитие данного механизма.

2. Установлены закономерности влияния токов луча и фокусировки, скорости перемещения луча при ЭЛС на дефектность, микротвердость, микроструктуру и геометрические размеры сварных соединения стали мартенситного класса 06X15H6MBФБ-Ш.

Определены значения параметров ЭЛС, обеспечивающие получение качественных сварных соединений.

3. Для жаропрочных никелевых сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД выявлены особенности формирования бездефектного соединения, геометрических размеров, химического состава, микроструктуры и механических свойств сварных соединений при разных режимах ЭЛС. Обоснованы рациональные режимы ЭЛС указанных сплавов.

4. Установлено явление формирования утолщенных границ зерен в ЗТВ сварных соединений при ЭЛС сплава ХН45МВТЮБР-ИД. Формирующиеся утолщенные границы зерен определяются исходным размером зерна и режимами ЭЛС. Установлено, что утолщенные границы зерен до 4 мкм не снижают предел выносливости образцов сварных соединений сплава и не приводят к образованию трещин, что может быть достигнуто соответствующими режимами ЭЛС.

Практическая значимость работы:

1. На основе проведенных материаловедческих исследований выявлены причины образования дефектов в сварных швах, полученных ЭЛС, и определены режимы сварки, позволившие получить качественные сварные соединения материалов из стали мартенситного класса 06Х15Н6МВФБ-Ш толщиной 9 мм, сплавов на никелевой основе ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм и 13 мм, ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм.

2. Установлены особенности формирования и возможность получения бездефектного сварного шва толщиной 1,5 мм методом ЭЛС паяных тонкостенных оболочек сопла КС РД из стали 12Х18Н10Т-ВД.

3. Полученные результаты по ЭЛС коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов были внедрены на предприятиях-изготовителях авиационной и ракетной техники (ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Металлист-Самара»), а также использованы в учебном процессе кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные закономерности изменения геометрических параметров, структуры и свойств, химического состава сварных соединений жаростойких и жаропрочных сталей (12Х18Н10Т-ВД, 06Х15Н6МВФБ-Ш) при варьировании параметров ЭЛС (тока луча и тока фокусировки, скорости перемещения луча), в том числе, паяных узлов из стали 12Х18Н10Т-ВД.

2. При ЭЛС паяных узлов параметры сварки должны исключать оплавление паяных швов для предотвращения зернограницного обогащения сварного соединения химическими элементами припоя, что приводит к охрупчиванию границ зерен стали и образованию трещин.

3. Установленные особенности формирования геометрических параметров, структуры и свойств, химического состава сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов (ХН45МВТЮБР-ИД, ХН67ВМТЮ-ВД) при реализации ЭЛС; выявлено образование, при определенных режимах сварки, утолщенных границ зерен (сплав ХН45МВТЮБР-ИД), что

может приводить (при утолщенных границах более 4 мкм) к снижению усталостной прочности сварных соединений.

4. Предлагаемые режимы ЭЛС жаростойких и жаропрочных сталей и никелевых сплавов, обеспечивающие получение бездефектных сварных соединений стабильного качества и уровня свойств.

5. Технологические варианты ЭЛС деталей компрессора высокого давления, камеры сгорания авиационного двигателя, оболочек камер сгорания ракетного двигателя, использованные на предприятиях ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Металлист-Самара».

Работа соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение по пунктам: п. 1, п. 3.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках: 5-ой Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (г. Курск, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Наука и инновации в современных условиях» (г. Магнитогорск, 2016 г.); всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2016 г.); международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (г. Екатеринбург, 2016 г.); второй международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Москва, 2017 г.); всероссийской научно-практической конференции «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении-2023» (г. Самара, 2023 г.); VIII-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2024» (г. Пермь 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из которых 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях, 7 работ в трудах всероссийских и международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников, приложений. Объем диссертации составляет 170 страниц, в том числе 83 рисунка и 52 таблицы. Библиография содержит 151 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность диссертационной работы и дана характеристика области исследования; указаны ее цель и решаемые задачи, которые позволяют обеспечить работоспособность изделий авиационной и ракетной техники со сварными соединениями, получаемыми ЭЛС.

В первой главе выполнен литературный обзор, который показал, что при сварке жаропрочных сталей и сплавов могут протекать нежелательные структурные изменения и часто образуются разнообразные дефекты сварных соединений. Выполнен анализ используемых и перспективных материалов при изготовлении деталей КВД, КС АД и РД;

особенностей их сварки и методов получения неразъемных соединений; определены технологические параметры, влияющие на качественные показатели соединений, в том числе и полученных ЭЛС.

Анализ источников показал, что недостаточное внимание уделено исследованию процессов формирования структуры и свойств бездефектных сварных соединений из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов толщиной от 1,5 мм до 15 мм, получаемых ЭЛС.

На основании проведенного литературного обзора сделаны выводы об актуальности темы диссертации и обоснованы задачи исследований.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых материалов, используемому оборудованию для ЭЛС, методик изучения микроструктуры и определения физико-механических свойств.

ЭЛС образцов и деталей выполнялась на установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-11. В работе использованы методы рентгенографического контроля, оптической и электронной микроскопии, спектрального и микрорентгеноспектрального анализов. Определялось распределение микротвердости по сварному соединению, выполнены испытания на растяжение, изгиб, ударную вязкость и усталость.

В третьей главе описываются результаты исследования щелевого сварного соединения паяных оболочек (рисунок 1) из стали аустенитного класса 12Х18Н10Т, получаемого ЭЛС.

При сварке паяных оболочек возникает целый ряд трудностей, основной из которых явилось образование кристаллизационных трещин длиной 0,25-2,0 мм в сварном шве, полученном по типовому режиму. Наличие трещин выявлено рентгенографическим контролем и последующими металлографическими исследованиями.

Макроанализ шлифов, вырезанных из деталей с трещинами, показал, что ширина сварной ванны достигает 4 мм (рисунок 1, в). Это значительно превышает ширину щелевого соединения 2,4 мм (рисунок 1, а) через которое проходит электронный луч для сварки и в процессе ЭЛС имеет место оплавление галтелей паяного соединения и попадание элементов припоя в сварной шов. Результаты спектрального анализа сварного шва с трещинами, припоя и основного материала (стали 12Х18Н10Т) приведены в таблице 1.

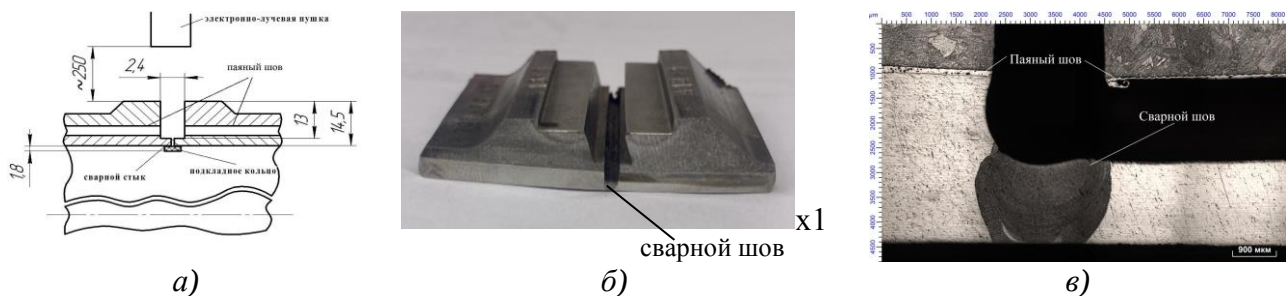


Рисунок 1 – Эскиз образца натурного узла (а), внешний вид сваренного образца натурного узла (б) и сварной шов паяных оболочек с трещиной (в)

Таблица 1 – Химический состав, масс. %

Материал	Ni	Cr	Fe	Mn	Co
12X18H10T	9,0-11,0	17,0-19,0	основа	≤ 2	–
Припой	основа	19,0	отсутствует	35,0	10,0
Сварной шов	36,0-37,0	15,0-17,0	30,0-31,0	12,0-14,0	1,0

Как видно из таблицы 1 содержание никеля и марганца в сварном шве значительно превышает их количество в стали 12X18H10T, что повышает склонность к формированию участков закалочных структур, повышению хрупкости в этих участках и высокой вероятности появления трещин.

Исследовано 64 режима сварки с различными значениями тока луча от 12 до 18 мА (с шагом 2 мА), тока фокусировки от 744 до 763 мА (с шагом 3 мА) и скорости перемещения луча 6 мм/с и 11 мм/с. Сварку выполняли после термической обработки по режиму пайки (температура 1235 °С и выдержка 10-15 минут).

Показано, что для получения качественного сварного соединения шов должен быть шириной не более 2,4 мм (рисунок 1, а) и глубиной провара не менее 2 мм. Металлографическими исследованиями установлено, что при токе фокусировки 744 мА наблюдается максимальная ширина ванны и минимальная глубина провара. С увеличением тока фокусировки ширина ванны уменьшается, а глубина возрастает. При скорости 6 мм/с минимальная ширина составила 2,9 мм, что приводит к нагреву паяного соединения, попаданию элементов припоя в сварной шов и повышению вероятности появления трещин.

С учетом оптимальных размеров сварного шва рациональные параметры ЭЛС получены при скорости перемещения луча 11 мм/с, токе луча 16 мА и токе фокусировки 759 мА. Данный режим позволяет получать бездефектные соединения (рисунок 2). Ширина сварного шва составила 2,3 мм. Обеспечена необходимая глубина проплавления, а минимальная ширина ванны исключает попадание элементов припоя в сварной шов.

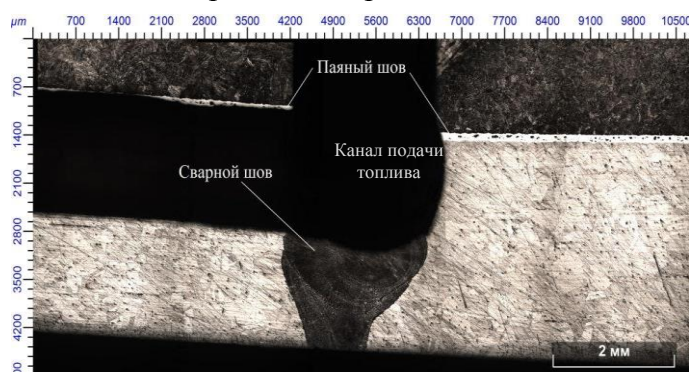


Рисунок 2 – Сварной шов паяных оболочек из стали 12X18H10T при рациональном режиме ЭЛС

Значения величины зерна по шкале №3 ГОСТ при рациональном режиме ЭЛС на образце-кольце и натурном узле приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Величина зерна в сварном соединении, мкм

Деталь	Сварной шов	ЗТВ	Основной материал
Образец / Натурный узел	до 300	35-45	9-10

Микроструктура основного материала представляет собой аустенитные зерна, характерный размер которых не превышает 10 мкм и карбиды. Структура сварного шва дендритная, вблизи ЗТВ дендриты ориентированы нормально к ней. Ориентированные дендриты в длину достигают до 300 мкм, неупорядоченные дендриты имеют меньший размер. ЗТВ по типу структуры не отличается от основного материала. Непровары, поры, трещины и другие дефекты сварки отсутствуют.

Концентрация химических элементов в сварном шве стали 12X18H10T, полученном по рациональному режиму, определена микрорентгеноспектральным анализом (рисунок 3) на растровом электронном микроскопе (РЭМ) и спектрометре (таблица 3).

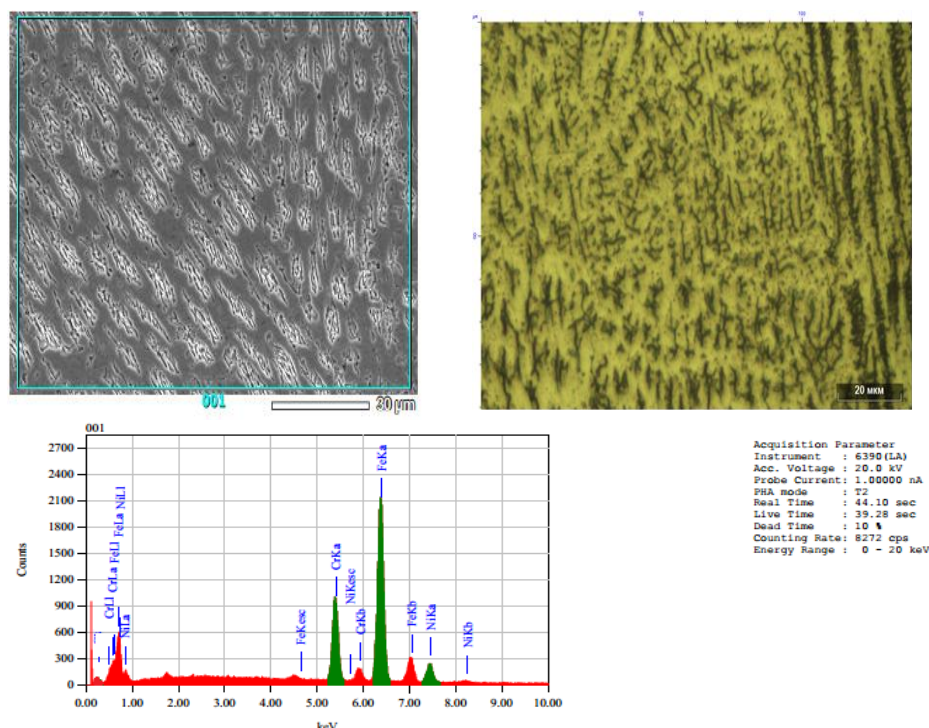


Рисунок 3 – Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения поверхности сварного шва паяных оболочек из материала 12X18H10T-ВД

Таблица 3 – Содержание элементов в сварном шве стали 12X18H10T, масс. %

Метод замера	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Fe
Спектрометр	0,039	17,4	10,1	0,30	0,86	71,3
РЭМ	—	19,97	11,25	-	-	70,74
ГОСТ	≤ 0,12	17-19	9-11	≤ 0,8	≤ 2,0	67,08-71,0

Из таблицы 3 видно, что содержание хрома, никеля, марганца и железа количественно одинаково с основным металлом, что подтверждает исключение попадания элементов припоя в сварной шов. Отсутствие в представленных результатах РЭМ данных по количеству углерода, титана и марганца обусловлено высокой локальностью определения химического состава на РЭМ и неравномерным распределением этих элементов в структуре.

Был проведен замер микротвердости сварного соединения (таблица 4). Из представленных данных следует, что величина микротвердости в сварном шве, ЗТВ и основном материале сопоставимы, что говорит об однородности свойств.

Таблица 4 – Микротвердость HV0,05 сварного соединения стали 12X18H10T

Область замера	Интервал значений	Среднее значение
Сварной шов	134-167	150,5
ЗТВ	143-184	163,5
Основной материал	139-168	153,5

Проведены механические испытания образцов с определением временного сопротивления. Разрыв наблюдается по основному материалу на расстоянии 26 мм от края сварного шва при напряжении 580 МПа (по ТУ не менее 530 МПа). При испытаниях на изгиб образец подвергается загибу на угол до 130°. На сварном шве трещин не обнаружено; по нормативным документам (НД) допускается их наличие с длиной до 4 мм.

В главе четыре исследованы причины образования пор при различных режимах ЭЛС коррозионностойкой жаропрочной стали 06X15H6MBФБ-Ш (ВНС-16) толщиной 9 мм средней части камеры сгорания ракетного двигателя.

В условиях серийного изготовления при скорости перемещения луча 3 мм/с часто встречаются дефекты в виде пор в корневой части сварного шва.

Исследование структуры и свойств сварного соединения проводили на натурном узле средней части КС РД, который был выполнен в виде кольца с толщиной сварных кромок 9 мм и толщиной технологического подкладного кольца 5 мм. Выбор параметров ЭЛС проводили при скорости 3 мм/с, варьируя ток луча и ток фокусировки. Перед выполнением сварки проведен отжиг при температуре 620^{+15} °С в течении 2-2,5 часов; после сварки отпуск при температуре 580^{+15} °С в течении 2-2,5 часов в вакууме.

Режимы при токе луча 35-40 мА обеспечивают глубину провара менее 9 мм, имеются дефекты в виде непроваров (недостаточное тепловложение по длине сварного шва) и пор в нижней области сварного шва (чрезмерное тепловложение по длине сварного шва, неблагоприятная гидродинамика течения расплава), а ширина сварного шва увеличивается с 5,6 мм до 7,5 мм; при завышенном токе луча 52 мА формируются прожоги. Необходимая глубина провара обеспечена при токе луча 45 мА и 48 мА и токе фокусировки 728-740 мА.

Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва (ширина шва 6,0 мм, глубина провара 9,0 мм) и бездефектное соединение получены при токе луча 48 мА, токе фокусировки 728 мА и скорости 3 мм/с.

Однородность свойств сварного соединения при данном режиме оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, сварного шва и ЗТВ (таблица 5).

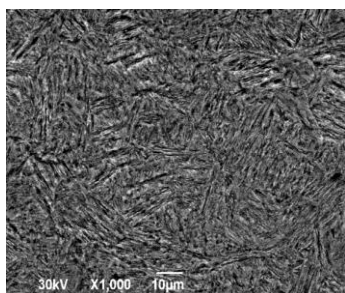
Таблица 5 – Микротвердость HV0,05 сварного соединения стали 06X15H6BMФБ

Область замера	Интервал значений	Среднее значение
Сварной шов	312-340	326
ЗТВ	351-371	361
Основной материал	290-312	302

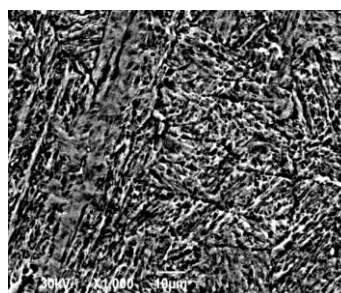
Из таблицы 5 следует, что распределение значений микротвердости в сварном шве, ЗТВ и основном материале стали 06X15H6MBФБ-Ш неоднородно, но находится в допустимых

пределах. Микротвердость HV0,05 основного металла имеет минимальные значения, а максимальная микротвердость выявлена в ЗТВ, что обусловлено образованием структур закалочного характера.

Микроструктура образца при рациональном режиме представлена на рисунке 4.



а) структура основного металла



б) структура сварного шва

Рисунок 4 – Микроструктура образца после ЭЛС стали 06X15H6BMФБ

Как видно из рисунка 4 структура сварного шва представляет собой крупноигльчатый мартенсит отпуска. Структура основного материала соответствует мелкоигльчатому мартенситу отпуска. Установлено, что концентрация химических элементов (углерода, железа, хрома, никеля) в сварном шве стали 06X15H6BMФБ-Ш находится в пределах ТУ на основной материал, что говорит о высоком качестве сварного соединения.

В главе пять исследованы пути обеспечения стабильности формирования бездефектных сварных соединений жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм корпуса КС АД и реализован выбор рационального режима ЭЛС сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм головки смесительной РД, исключающего образование трещин.

На натурном узле корпуса КС АД проведены экспериментальные исследования сварных соединений сплава ХН45МВТЮБР-ИД при варьировании различных технологических параметров ЭЛС (тока луча, тока фокусировки, скорости перемещения луча). После выполнения сварки проведены закалка с температуры $1050^{\pm 10}$ °С (время выдержки 20-30 мин) с охлаждением в среде аргона и старение при температуре $650^{\pm 10}$ °С в течение 16 ч ± 10 мин с охлаждением на воздухе. Выполнены металлографические исследования структуры полученных сварных соединений, изучены их дефектность, геометрические параметры, механические свойства и однородность химического состава.

Установлено, что при токе луча 28 мА и токе фокусировки 765-780 мА со скоростью перемещения луча 7 мм/с (режимы сварки 1-3) имеет место непровар шва из-за заниженного тока луча. При токе луча 32-34 мА и токе фокусировки 776-783 мА со скоростью 11 мм/с (режимы сварки 5-7) установлено наличие прожогов. При токе луча 30 мА, токе фокусировки 783 мА и скорости 7 мм/с (режим сварки 4) дефекты сварного соединения отсутствуют, что позволяет его рекомендовать для использования.

Оценку физико-механической однородности сварного соединения проводили путем анализа микротвердости HV0,05 его составляющих: основного материала – 276-306, сварного шва – 290-314 и ЗТВ 334-364 (интервалы микротвердости приведены для 7 режимов ЭЛС). Микротвердость ЗТВ имеет максимальные значения для всех режимов, поскольку как

переходная зона от сварного шва к основному металлу подвергается нагреву материала при ЭЛС и интенсивному охлаждению (рисунок 5).

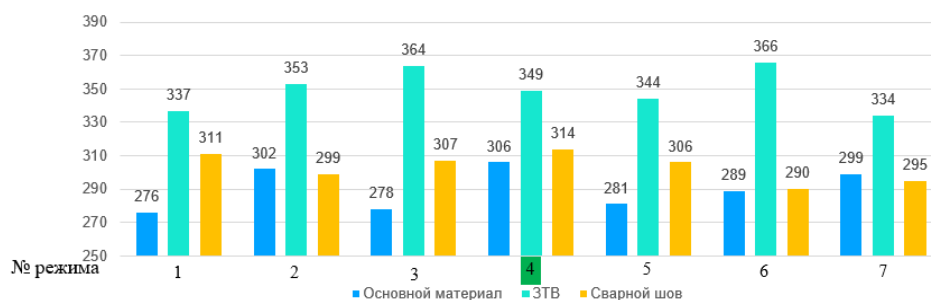


Рисунок 5 – Микротвердость HV0,05 сварного соединения сплава ЭП-718.

4 – рациональный режим сварки

Микроструктура сварного соединения представлена на рисунке 6.

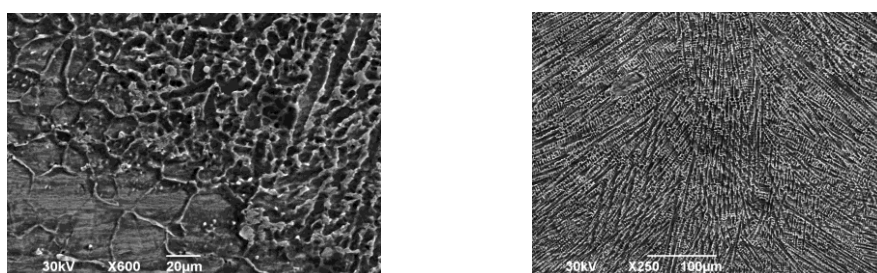


Рисунок 6 – Микроструктура образца сплава ХН45МВТЮБР-ИД в ЗТВ (слева) и сварного шва (справа)

Зеренная структура шва характеризуется четко выраженным дендритным строением. Граница перехода от основного металла к зоне шва резкая, ЗТВ имеет ограниченную протяженность. Основной материал имеет однородное крупнозернистое строение. В структуре наблюдаются карбонитриды и карбиды, а также мелкодисперсная интерметаллидная γ' -фаза. В ЗТВ наблюдается увеличенное зерно до 3-5 балла по сравнению с основным материалом, где величина зерна соответствует 7-8 баллу шкалы № 3 ГОСТ. По границам зерен ЗТВ в процессе термического цикла сварки могут располагаться ликвационные составляющие, отличающиеся высокой хрупкостью и легкой травимостью. Кроме этого, большое количество карбонитридов и хрупкой ликвационной фазы по границам зерен при определенном уровне внутренних напряжений может привести в процессе сварки к образованию микротрещин. Однако, дефектов макроструктуры в виде пор, трещин обнаружено не было.

Определена концентрация химических элементов сварного шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД на спектрометре. Содержание хрома, никеля и железа в сварном шве соответствует по химическому составу требованиям ТУ на основной материал, что свидетельствует о достаточном уровне качества сварного соединения и по данному показателю. Рекомендованный режим ЭЛС обеспечивает получение бездефектного соединения и необходимую глубину проплавления 4,0 мм с шириной сварного шва 4,8 мм.

Склонность сплава ХН67ВМТЮ-ВД к образованию дефектов при ЭЛС исследовали на натурном узле головки смесительной РД при скоростях перемещения луча 3 и 5 мм/с. Исследование режимов сварки проводили на образце-имитаторе натурного узла. При

визуальном осмотре сварных швов, полученных при токе луча 46 мА, токе фокусировки 754-757 мА и скорости перемещения луча 5 мм/с выявлены прожоги, обусловленные завышенным током луча. Рентгенографическим контролем установлено, что при токе луча 35 мА, токе фокусировки 757-767 мА и скорости 3 мм/с в сварном шве имеются поры. При режимах сварки – ток луча 35 мА, ток фокусировки 752 мА, скорость перемещения луча 3 мм/с и ток луча 41-42 мА, ток фокусировки 757-760 мА, скорость перемещения 5 мм/с дефектов не обнаружено. После выполнения сварки проведена закалка с температуры $1100^{\pm 15}$ °С (время выдержки 1-1,5 часа) с охлаждением в среде аргона.

Конфигурация сварного шва с уменьшением тока фокусировки меняется: ширина шва уменьшается, поперечное сечение из конической формы переходит в более цилиндрическую. Ширина сварного шва при разных режимах ЭЛС составила 6,7-11,8 мм. При токах фокусировки 754 мА и 757 мА ширина шва минимальная и составляет 6,7-6,9 мм. Глубина сварного шва на всех исследуемых режимах одинакова и составляет 6 мм. Рациональный режим сварки, обеспечивающий оптимальное сочетание геометрических размеров шва (ширина ванны 6,7 мм, глубина провара 6,0 мм) имеет параметры – ток луча 42 мА, ток фокусировки 757 мА и скорость перемещения луча 5 мм/с.

Замер микротвердости сварного соединения, полученного при рациональном режиме ЭЛС, проводили на основном материале (HV0,05 291-297), в ЗТВ (HV0,05 287-298) и в литой зоне сварного шва (HV0,05 291-298). Значения микротвердости на всех участках количественно близки, что говорит об однородности свойств и высоком качестве сварного соединения.

На рисунке 7 представлена микроструктура сварного соединения сплава ХН67ВМТЮ-ВД после сварки при рациональном режиме.

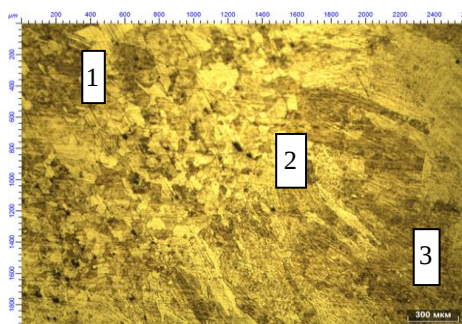


Рисунок 7 – Микроструктура сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД:
1 – основной материал; 2 – ЗТВ; 3 – сварной шов

Сварной шов имеет столбчатую крупнокристаллическую структуру литого сплава. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не выявлено. ЗТВ по структуре отличается от основного материала по величине зерна и соответствует № 5-6 шкалы ГОСТ, что соответствует требованиям НД.

Определена концентрация химических элементов сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД на спектрометре. Содержание хрома, никеля, титана, вольфрама и железа в сварном шве по

химическому составу соответствуют требованиям ГОСТ на основной материал. Это говорит о высоком качестве сварного соединения по этому критерию оценки.

В главе шесть проведены исследования особенностей формирования структуры и свойств сварных соединений компрессора высокого давления авиационного двигателя из сплава ХН45МВТЮБР-ИД (ЭП718) толщиной 13 мм при изменении параметров ЭЛС.

В условиях производства после ЭЛС на лицевой поверхности по границе сварного шва при капиллярном контроле выявлены продольные строчечно-точечные свечения, что указывает предположительно на наличие дефектов в виде трещин. Дальнейшие макро- и микроисследования структуры проводились в 4-х диаметрально противоположных поперечных сечениях сварного соединения. В ЗТВ на расстоянии 0,5 мм от сварного шва обнаружены трещины с выходом на поверхность границы сварного шва протяженностью до 0,6 мм (рисунок 8, а), а на расстоянии 0,1-0,5 мм от сварного шва – трещины без выхода на поверхность протяженностью 0,1-2,0 мм (рисунок 8, б).

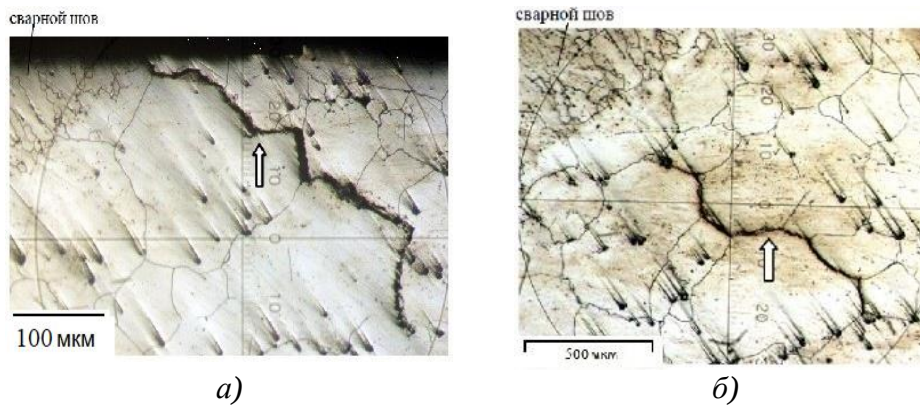


Рисунок 8 – Трещина в ЗТВ, выходящая на поверхность (а) и без выхода на поверхность сплава ЭП718 (б)

В ЗТВ под «грибком» наблюдается значительное количество утолщенных границ зерен, по которым существует наибольшая вероятность образования, в последствии, дефектов (микротрещин) из-за действия максимальных растягивающих температурных деформаций, возникших при ЭЛС и последующей термообработке.

Реализацию режимов сварки, исследование микроструктуры и механических свойств сварных швов проводили на натурном узле, изготовленном из кольца цельнокатаного (рисунок 9, а, поз. 1) и листового материала (рисунок 9, а, поз. 2) сплава ЭП718.

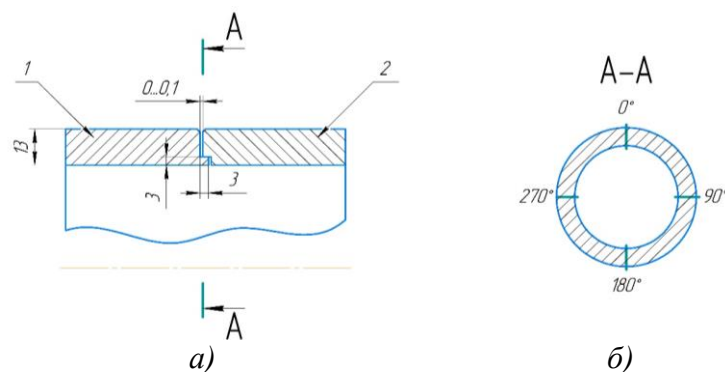


Рисунок 9 – Эскиз образца – имитатора: 1 – кольцо цельнокатаное; 2 – листовой материал

Для выполнения исследований получена партия образцов на режимах сварки со скоростью перемещения луча 5-9 мм/с, током луча 60-80 мА и током фокусировки 480-507 мА. Режимы сварки выбирались для обеспечения полного провара образцов толщиной 13 мм, исходя из рекомендаций нормативной документации.

После выполнения сварки проведены закалка при температуре $1100^{\pm 10}$ °С (время выдержки 1 час) с охлаждением в среде аргона и двухступенчатое старение при температурах $780^{\pm 10}$ °С в течение 5 часов и $650^{\pm 10}$ °С в течение 16 ч ± 10 мин с охлаждением на воздухе.

Установлено, что соответствие ТУ по значениям временного сопротивления (≥ 1080 МПа) и предела текучести образцов (≥ 790 МПа) после ЭЛС и термической обработки (закалка и двухступенчатое старение) обеспечивают режимы сварки с токами луча 60-65 мА и фокусировки 504 мА, и скоростью перемещения луча 6 мм/с. Результаты определения относительного удлинения (13,0-23,0 %) и сужения (16,9-27,5 %), ударной вязкости (0,35-0,71 МДж/м²) соответствуют ТУ на всех режимах сварки.

В материале образцов при токах луча 62-65 мА, токе фокусировки 504 мА и скорости 6 м/с в ЗТВ наблюдаются утолщенные границы зерен шириной 3-7 мкм (рисунок 10). Это предположительно обусловлено выделением карбидных фаз при нагреве во время сварки и последующем охлаждении, ускоренной диффузией по границам зерен, что может привести впоследствии к образованию трещин.

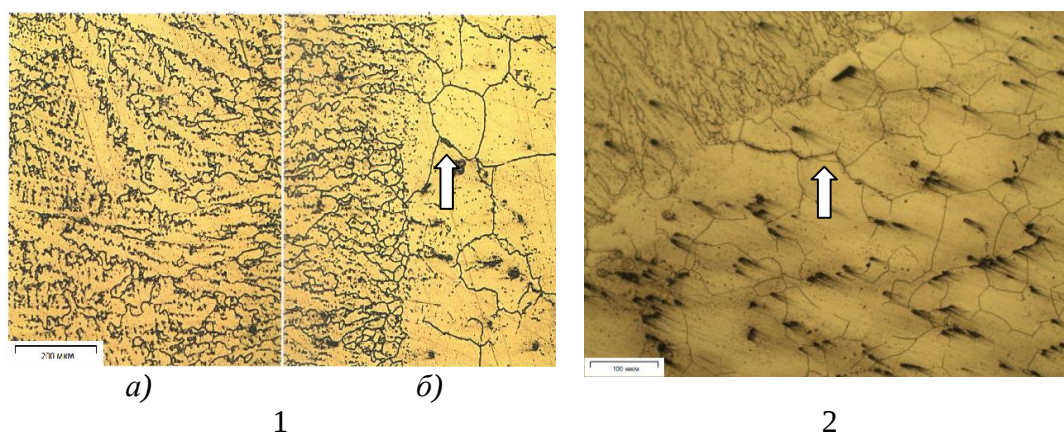


Рисунок 10 – Микроструктура сплава ЭП718 при токе луча 65 мА (1): а) сварной шов; б) ЗТВ; 2 – микроструктура сплава ЭП718 в ЗТВ с утолщенными границами зерен до 7 мкм при токе луча 60 мА

Следует отметить, что при токе луча 65 мА утолщенные границы зерен имеют ширину не более 3-4 мкм и присутствуют не на всех сваренных образцах. В то же время, при других режимах ширина утолщенных границ может достигать 7 мкм.

Исследования показали, что при токе луча 65 мА сварной шов имеет столбчатую структуру литого сплава (рисунок 11). В ЗТВ по краю сварного шва формируется мелкодендритная структура. Основной металл имеет однородное строение с размером зерна 3-4 балла, в ЗТВ величина зерна 3 балла шкалы ГОСТа. В структуре присутствуют карбонитриды и карбиды, а также мелкодисперсная интерметаллидная γ' -фаза. В микроструктуре ЗТВ наблюдаются зерна увеличенного размера относительно основного материала.

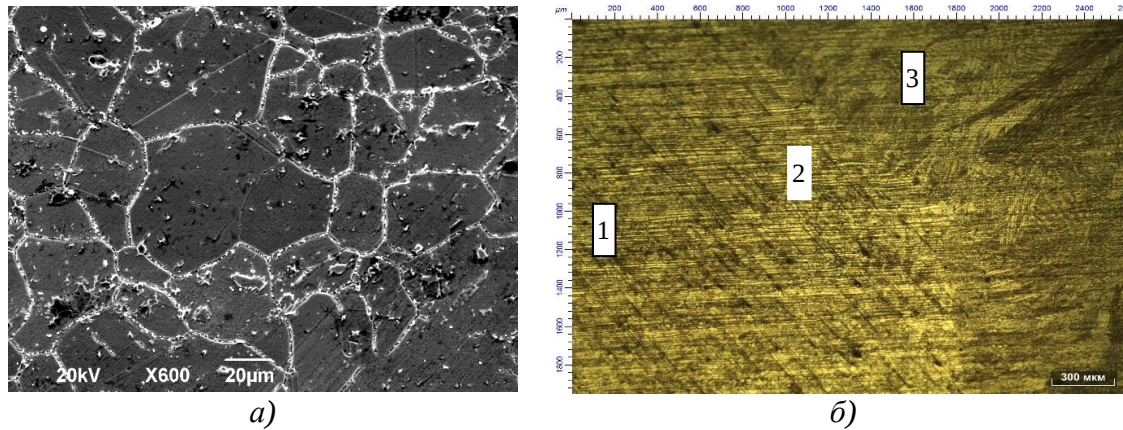


Рисунок 11 – Микроструктура сплава ЭП718 после ЭЛС в ЗТВ (а) и сварного соединения (б) при токе луча 65 мА и скорости 6 мм/с. 1 – основного материала; 2 – ЗТВ; 3 – сварной шов

Для испытания на усталость были отобраны образцы (режим ЭЛС при токах луча 62-65 мА, токе фокусировки 504 мА и скорости 6 мм/с) с утолщенными границами зерен в ЗТВ и образцы (режим ЭЛС при токе луча 65 мА, токе фокусировки 504 мА и скорости 6 мм/с) без утолщенных границ зерен в ЗТВ.

Предел выносливости образцов, полученных при токе луча 65 мА как с утолщенными границами зерен в ЗТВ, так и без них, составил $\sigma_a = 280$ МПа (разрушение отсутствовало на базе 10×10^6 циклов). Предел выносливости образцов, полученных при токах луча 60-62 мА с утолщенными границами зерен составил $\sigma_a = 235$ МПа, разрушение произошло по ЗТВ.

Таким образом, наличие утолщенных границ зерен в ЗТВ величиной более 4 мкм снижают предел выносливости сварных соединений. Наличие же утолщенных границ зерен в ЗТВ величиной до 4 мкм негативного влияния не оказывает. Результаты испытаний на усталость образцов, полученных при рекомендованном режиме ЭЛС представлены на рисунке 12.

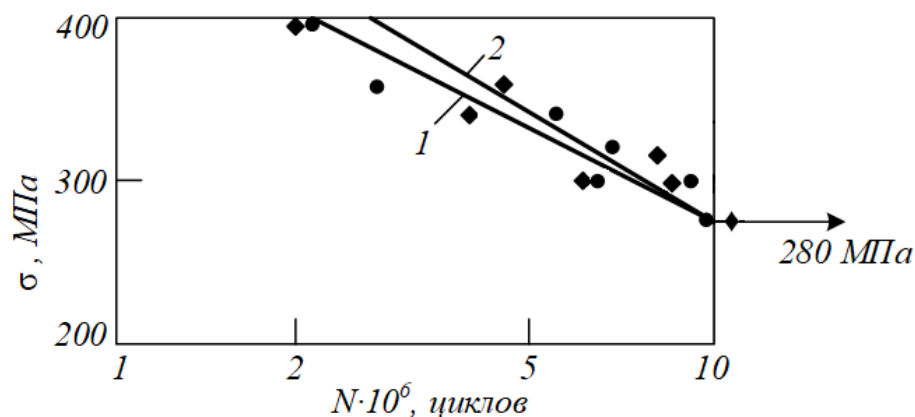


Рисунок 12 – Кривые усталости образцов сплава ЭП718 после рекомендованного режима ЭЛС: 1, ● – с утолщенными границами зерен в ЗТВ; 2, ◆ – без утолщенных границ зерен

При анализе изломов усталостных образцов установлено, что зона развития усталостной трещины в образцах без утолщенных границ зерен имеет существенно большую протяженность, чем в образцах с утолщенными границами шириной 5-7 мкм. Это

свидетельствует о более длительном периоде развития усталостных трещин до наступления долома в образцах первого типа.

С учетом полученных результатов по механическим свойствам и влияния утолщенных границ зерен на выносливость сварного соединения рациональным режимом сварки является: ток луча – 65 мА, ток фокусировки – 504 мА, скорость перемещения луча – 6 мм/с. Данный режим ЭЛС обеспечивает оптимальные геометрические параметры шва и может быть рекомендован к применению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены исследования особенностей формирования дефектности, геометрических параметров, химического состава, структуры и свойств, получаемых электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) сварных соединений изделий авиационной и космической техники малой толщины (1,5-13 мм) из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов, в том числе тонкостенных паяных оболочек.

2. Установлены особенности формирования сварного шва толщиной 1,5 мм паяных тонкостенных оболочек сопла камеры сгорания ракетного двигателя из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T-ВД. Показано, что дефекты образуются при попадании элементов припоя в сварной шов при ЭЛС. Определены технологические параметры ЭЛС, при которых ширина сварного шва меньше целевого зазора, паяное соединение не расплавляется и элементы припоя не попадают в сварной шов. Рациональный режим ЭЛС получен при токе луча 16 мА, токе фокусировки 759 мА и скорости перемещения луча 11 мм/с. При данном режиме ширина сварного шва составляет 2,3 мм с глубиной провара более 2,3 мм. Сварной шов имеет дендритную структуру (с размером дендрита до 300 мкм), однородные химический состав и микротвердость, высокую стойкость к образованию трещин. Режим обеспечивает предел прочности сварных образцов 580 МПа (по ТУ не менее 530 МПа) и отсутствие трещин при угле изгиба 130°.

3. При исследовании формирования сварного шва коррозионностойкой жаропрочной стали мартенситного класса 06X15H6МВФБ-Ш толщиной 9 мм установлено, что поры в корневой части шва образуются при токе фокусировки 740 мА. Параметрами рационального режима электронно-лучевой сварки стали 06X15H6МВФБ толщиной 9 мм являются скорость перемещения луча 3 мм/с, ток луча 48 мА и ток фокусировки 728 мА. При данном режиме ширина сварного шва составляет 6,0 мм с глубиной провара более 9,0 мм. Сварной шов имеет структуру крупноигльчатого мартенсита отпуска, для соединения характерны однородные химический состав и микротвердость, дефекты не выявлены.

4. Изучены особенности получения сварного шва склонного к трещинообразованию жаропрочного сплава на никелевой основе ХН45МВТЮБР-ИД из листового материала толщиной 4 мм, полученного на весу без технологической подкладки. Показана связь режимов ЭЛС с образованием таких дефектов как непровар, поры, избыточный проплав с занижением лицевого валика сварного шва. Определены рациональные параметры ЭЛС для получения

бездефектного сварного соединения с шириной сварного шва 4,8 мм и глубиной провара 4,0 мм: скорость перемещения луча 7 мм/с, ток луча 28 мА и ток фокусировки 780 мА. По центру сварного шва выявлена столбчатая дендритная структура литого сплава, в сварном шве сформировано зерно 7-8 балла (в основном материале величина зерна соответствует 9 баллу). Обеспечены однородность химического состава и микротвердости сварного соединения (306-349 HV0,05).

5. Исследованы закономерности формирования на технологическом подкладном кольце сварного шва, склонного к трещинообразованию жаропрочного сплава на никелевой основе ХН67ВМТЮ-ВД. Выявлены особенности влияния режимов ЭЛС на образование дефектов типа пор и прожогов. Сварное соединение без дефектов получено при скорости перемещения луча 5 мм/с, которая является минимально рекомендуемой для сплавов на никелевой основе. Рациональным режимом сварки сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм являются режим при токе луча 42 мА, токе фокусировки 757 мА и скорости перемещения луча 5 мм/с; режим обеспечивает однородные микротвердость (290-295 HV0,05) и химический состав сварного соединения. Сварной шов имеет столбчатую структуру литого сплава, представленную твердым раствором с выделениями упрочняющей фазы по границам зерен.

6. Анализ особенностей формирования сварного соединения при ЭЛС цельнокатаного листа жаропрочного сплава ЭП718 (ХН45МВТЮБР-ИД) позволил выявить образование утолщенных границ зерен в ЗТВ. Установлено, что утолщенные границы зерен до 4 мкм, не оказывают влияния на усталостную прочность сварных швов. Наличие утолщенных границ зерен более 4 мкм снижает усталостную прочность, поскольку они являются концентраторами напряжений и могут привести к появлению трещин в условиях реального нагружения. На основе материаловедческого исследования и результатов механических свойств определено, что рациональным для сплава ЭП718 является режим ЭЛС с током луча 65 мА, током фокусировки 504 мА и скоростью перемещения луча 6 мм/с. Сварной шов имеет минимальную ширину 5,7 мм с глубиной провара 13,0 мм, разнотекстурную микроструктуру с 3-4 баллом зерна и утолщенными границами зерен не более 4 мкм. Обеспечен уровень свойств соединения: временное сопротивление $\sigma_b = 1240-1247$ МПа (по ТУ не менее 1080 МПа), предел текучести $\sigma_t = 819-843$ МПа (по ТУ не менее 790 МПа), относительное удлинение $\delta = 17,3-18,2$ % (по ТУ не менее 13 %), относительное сужение $\psi = 25,7-26,4$ % (по ТУ не менее 14 %), ударная вязкость при изгибе КСЧ = 0,55-0,57 МДж/м² (по ТУ не менее 0,35 МДж/м²). Предел выносливости составляет 280 МПа.

7. Выполненные исследования позволили разработать рациональные параметры ЭЛС, обеспечивающие получение качественных сварных соединений малой толщины (1,5-13 мм) сталей 12Х18Н10Т-ВД и 06Х15Н6МВФБ-Ш, сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД в условиях производства деталей двигателей авиационной и ракетной техники.

Полученные результаты работы и разработанные режимы ЭЛС коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов были внедрены на предприятиях-изготовителях данной техники – ПАО «ОДК-Кузнецов» и АО «Металлист-Самара», г. Самара.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в рецензируемых журналах**

1. Исаев, С.Л. Формирование сварного шва при электронно-лучевой сварке жаропрочного сплава ХН67МВТЮ-ВД толщиной 6 мм / С.Л. Исаев // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2014. – № 3. – С.81-84.

2. Исаев, С.Л. Особенности сварки тонкостенных паяных оболочек из стали 12Х18Н10Т / С.Л. Исаев // Научно-технический журнал «Научно-технические проблемы машиностроения», 2015. – № 2. – С. 9-14.

3. Исаев, С.Л. Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке коррозионностойкой жаропрочной стали 06Х15Н6МВФБ-Ш толщиной 9 мм / С.Л. Исаев // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2015. – № 3. – С. 201-207.

4. Исаев, С.Л. Исследование сварного соединения жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД / С.Л. Исаев // Вестник СамГТУ. Технические науки, 2016. – № 4. – С. 123-129.

5. Исаев, С.Л. Структура и свойства сварных швов при электронно-лучевой сварке железохромоникелевого сплава ЭП718 / С.Л. Исаев, Д.А. Баранов, Е.Ю. Щедрин, В.С. Муратов, К.В. Никитин, С.С. Жаткин // Известия вузов. Цветная металлургия, 2023. – Т. 9. – № 6. – С. 44-53.

6. Исаев, С.Л. Механические свойства и структура сварного шва паяных оболочек из стали 12Х18Н10Т / С.Л. Исаев, В.С. Муратов // Научно-технический и производственный журнал по сварке, контролю и диагностике Сварка и диагностика, 2024. – № 6. – С. 52-55.

7. Исаев, С.Л. Механические свойства и структура сварного шва сплава ЭП-718, полученного электронно-лучевой сваркой / С.Л. Исаев, Д.А. Баранов, В.С. Муратов // Научный журнал Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2025. – № 1 (51). – С. 51-62.

Публикации в других изданиях

8. Исаев, С.Л. Повышение качества сварного шва тонкостенных паяных оболочек из коррозионностойкой стали / С.Л. Исаев // 5-я Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технология». – Курск, 2015. – С. 61-65.

9. Исаев, С.Л. Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочного сплава ХН67МВТЮ-ВД / С.Л. Исаев // Международной научно-практической конференции с докладом «Наука и инновации в современных условиях». – Магнитогорск, 2016. – С. 23-25.

10. Исаев, С.Л. Изучение особенности формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке сплава ХН45МВТЮБР-ИД / С.Л. Исаев // Международная научно-практическая конференция «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы». – Екатеринбург, 2016. – С. 93-96.

11. Исаев, С.Л. Особенности формирования сварных соединений стали 06Х15Н6МВФБ-Ш при электронно-лучевой сварке / С.Л. Исаев // Научно-технической интернет-конференция. Высокие технологии в машиностроении. – Самара, 2016. – С. 190-191.

12. Исаев, С.Л. Электронно-лучевая сварка жаропрочных сталей и сплавов малой толщины от 1,5 до 9 мм в производстве камер сгорания / С.Л. Исаев // Вторая международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии». – М., 2017. – С. 427-444.

13. Исаев, С.Л. Формирование структуры и свойств материала при электронно-лучевой сварке сплава ХН45МВТЮБР-ИД / С.Л. Исаев, В.С. Муратов, С.С. Жаткин // Всероссийская научная-техническая конференция «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении-2023». – Самара, 2023. – С. 406-411.

14. Исаев, С.Л., Исследование структуры и сопротивления усталости сварного соединения из сплава ЭП-718 / С.Л. Исаев, В.С. Муратов // VIII-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2024». - Пермь, 2024. – С. 88-92.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02
на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева»
(протокол № 15 от «20» октября 2025 г.)

Заказ № _____ Тираж 100 экз. Форм. лист. 60×84/16. Отпечатано на ризографе.