

На правах рукописи



**ИСАЕВ Сергей Леонидович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ  
ДЕТАЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ РАКЕТНОЙ И АВИАЦИОННОЙ  
ТЕХНИКИ**

**05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**САМАРА - 2018**

Работа выполнена на кафедре «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и АО «Металлист-Самара».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

**Амосов Александр Петрович**

Официальные оппоненты: **Беленький Владимир Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, декан Механико-технологического факультета ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Крюков Дмитрий Борисович**,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва**

Защита диссертации состоится «10» декабря 2018 г. в 13:00 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.122.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАУО ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Галактионовская 141, ауд. 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАУО ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте [http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/isaev\\_dis.pdf](http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/isaev_dis.pdf).

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

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



Луц Альфия Расимовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Камеры сгорания ракетной и авиационной техники используются в составе двигателя при эксплуатации ракеты и самолета. 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.

Хромоникелевые аустенитные стали и жаропрочные сплавы на никелевой основе известны давно и получили широкое применение в аэрокосмической промышленности. Не все они одинаково хорошо свариваются. Проблема получения качественных сварных швов аустенитных сталей и жаропрочных сплавов - одна из наиболее сложных проблем современного материаловедения в области сварочной науки и техники.

Одним из наиболее эффективных способов получения неразъемных соединений жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов в камерах сгорания ракетных и авиационных 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 сварке материалов, склонных к растрескиванию и, порой, необходимо изготовить сварные соединения конструкций, имеющих сложную форму, сварку которых возможно выполнить только методом ЭЛС. Данный метод сварки способствует, прежде всего, повышению их качества и надежности объектов новой техники. Новые специфические конструктивные решения неразъемных соединений, а также использование перспективных материалов, соединения которых наиболее распространенными методами сварки не дает желаемых результатов, делают ЭЛС единственно возможным способом получения соединений толщиной до 200 мм.

Большой вклад в изучение процессов, протекающих при ЭЛС, внесли советские и российские ученые, как Патон Б.Е., Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Драгунов В.К., Бельский В.Я., Трушников Д.Н., Мурыгин А.В., Лаптенко В.Д., Браверман В.В., а также зарубежный авторы Я. Айрат, Р. Рай, Ванг, Б.С. Юлбас и др.

Несмотря на большое количество исследований процесса формирования сварных швов при ЭЛС, до сих пор однозначных способов, позволяющих получать в условиях производства

гарантированно без дефектов сварные соединения из жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов малой толщины от 1,5 до 9 мм, в том числе тонкостенных паяных конструкций. При выполнении ЭЛС деталей камер сгорания ракетной и авиационной техники нередко встречаются дефекты, такие как трещины, поры и шлаковые включения.

**Цель настоящей работы** является проведение материаловедческого исследования, определение и устранение причин образования дефектов в сварных соединениях жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов узлов камер сгорания авиационных и жидкостных ракетных двигателей в условиях серийного производства. Для достижения этой цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Анализ дефектов в сварных соединениях жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов узлов камер сгорания авиационных и жидкостных ракетных двигателей в условиях серийного производства.
2. Получение сварных соединений методом ЭЛС жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов на образцах-имитаторах натуральных узлов камер сгорания авиационных и жидкостных ракетных двигателей.
3. Проведение лабораторных материаловедческих исследований полученных сварных швов.
4. Анализ причин образования дефектов в сварных швах.
5. Оценка применимости существующих методов контроля сварных соединений.
6. Исследования влияния режимов сварки и выбор оптимального режима сварки для обеспечения качественного сварного соединения.
7. Рекомендации по ЭЛС жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, исследуемых в данной работе

**Методы исследований.** Поставленные задачи решали при помощи теоретических методов исследования и последующим подтверждением проведенными экспериментами. Эксперименты по ЭЛС производили на установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-11. Для оценки качества сварки применялся рентгенографический контроль на установке Экстравольт 225/P3000. Исследование микроструктуры и геометрических параметров сварных швов производили на оптическом микроскопе Axio Vert A1 с анализатором микроструктуры поверхностных твердых тел Thixomet. Исследование химического состава производили на растровом электронном микроскопе JEOL-

6390. Химический состав свариваемых материалов и швов также изучали на атомно-эмиссионном спектрометре ДФС-500.

**Достоверность научных результатов** обусловлена тем, что при экспериментальном исследовании сварных соединений использовались зарекомендовавшие методы контроля: металлографическое исследование на оптическом и растровом электронном микроскопах, замер твердости и рентгенографический контроль, а результаты исследования подтверждены успешным использованием в серийном производстве.

#### **Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Исследованы закономерности формирования сварных швов и образование дефектов в них при электронно-лучевой сваркой в условиях серийного производства из листовых жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов малой толщины от 1,5 до 9 мм.
2. Впервые установлены особенности формирования неразъемных соединений концентрированным источником энергии (ЭЛС) тонкостенных паяных конструкций.

#### **Практическая значимость работы.**

1. На основе проведения материаловедческих исследований выявлены причины образования дефектов в сварных швах, полученных электронно-лучевой сваркой, и найдены оптимальные режимы сварки для обеспечения качественных сварных соединений стали мартенситного класса 06X15H6MBФБ-Ш толщиной 9 мм, сплавов на никелевой основе ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм и 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 камеры сгорания ракетного двигателя из стали 12X18H10T-ВД.
3. Полученные результаты по электронно-лучевой сварке коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов внедрены на предприятии-изготовителе камер сгорания авиационной и ракетной техники.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках:

- 5-ой Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (г. Курск, Юго-Западный государственный университет, 29-30 декабря 2015г.).

- Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в современных условиях» (г. Магнитогорск, Международный центр инновационных исследований «ОМЕГА САЙНС», 8 марта 2016г.).

- Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, СамГТУ, 25-28 октября 2016 г.).

- Международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (г. Екатеринбург, Международный центр инновационных исследований «ОМЕГА САЙНС», 18 ноября 2016г.).

- Вторая международная конференция «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Москва, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ, 14 – 17 ноября 2017г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 4 статьи в периодических изданиях по списку ВАК РФ, 4 работы в трудах Всероссийских, с международным участием, научно-технических конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 142 страницы, в том числе 62 рисунков, 32 таблицы и 9 графиков. Библиография содержит 157 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность диссертационной работы и дана характеристика области исследования с выводом основной цели и постановки задач, которые позволят повысить качество сварных соединений.

**В первой главе** проведен литературный обзор, который показал, что при проектировании камер сгорания ЖРД и АД для снижения веса и получения, требуемых прочностных характеристик, используют материалы из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов. Неразъемные соединения получают, в том числе, электронно-лучевой сваркой, толщина соединений в основном составляет от 1,0 мм до 15 мм.

Анализ источников показал, что недостаточное внимание уделено исследованию сварным швам из коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов толщиной от 1,5 мм до 9 мм, полученных электронно-лучевой сваркой.

На основании проведенного литературного обзора сделаны выводы об актуальности цели диссертации и поставлены задачи для исследования.

**Вторая глава** посвящена описанию материалов образцов, методике анализа проведения эксперимента, микроструктуры, а так же их физико-механических свойств. Описаны установки, на которых производили сварку образцов и технологические параметры, влияющие на ЭЛС.

Образцы для исследования представляли собой листовые полуфабрикаты и поковки из сталей и сплавов. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав материалов образцов, %

| Марка материала | Cr      | Ni    | Ti      | Mn  | Si   | C     | S     | P      | W       |
|-----------------|---------|-------|---------|-----|------|-------|-------|--------|---------|
| 12X18H10T-ВД    | 17-19   | 9-11  | 0,8     | 2,0 | 0,8  | 0,12  | 0,02  | 0,035  | -       |
| 06X15H6МВФБ-Ш   | 13,5-15 | 5,5-6 | -       | 0,4 | 0,4  | 0,06  | 0,015 | 0,025  | 1,0     |
| ХН45МВТЮБР-ИД   | 14-16   | 43-47 | 1,9-2,4 | 0,6 | -    | ≤0,1  | 0,01  | 0,015  | 2,5-3,5 |
| ХН67МВТЮ-ВД     | 17-20   | 60-68 | 2,2-2,8 | 0,5 | 0,01 | ≤0,08 | ≤0,01 | ≤0,015 | 4,0-5,0 |

Образцы, для устранения остаточной намагнитченности, подвергали дополнительному размагничиванию, и они поступали на сварку с уровнем намагнитченности не более 300 мкТл.

Электронно-лучевая сварка выполнялась на установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-11, укомплектованных источником питания мощностью 15 кВт и ускоряющим напряжением 60 кВ.

Для оценки качества сварки применялся рентгенографический контроль на установке Экстравольт 225/Р3000 с рентгеновской трубкой ТНХ225. Для металлографического анализа микроструктуры образцов использовалось следующее оборудование: оптический микроскоп Axio Vert A1 с анализатором микроструктуры поверхностных твердых тел Thixomet при различных увеличениях, а также электронный микроскоп JEOL-6390А. Исследование производили с 600 - 1000 -кратным увеличением. На оптическом микроскопе Axio Vert A1 получили оцифрованные изображения микроструктуры поверхности шлифов сварных швов. Для определения концентрации (в массовых %) элементов исследуемых сталей и сплавов использовали спектрометр ДФС-500. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на индентор составляла 50 г.

**В третьей главе** описываются результаты исследования ЭЛС щелевого соединения паяных конструкций рис.1 из стали аустенитного

класса 12X18H10T-ВД, материаловедческое исследование и химический состав сварных швов.

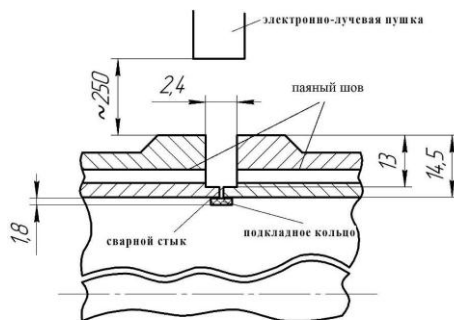


Рисунок 1 - Эскиз сварного соединения

При сварке кольцевых швов паяных конструкций столкнулись с целым рядом трудностей, основными из которых явились кристаллизационные трещины в сварном шве. Сварку производили при скорости 6 мм/с. Наличие дефектов в сварном соединении выявляли рентгенографическим контролем и последующим металлографическим исследованием. Перед выполнением эксперимента был проведен спектральный анализ на содержание химических элементов в сварном шве с трещинами после рентгенографического контроля и сопоставлен с химическим составом припоя и основного материала стали 12X18H10T-ВД (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав, %

| Материал     | Ni       | Cr        | Fe          | Mn         | Co   |
|--------------|----------|-----------|-------------|------------|------|
| 12X18H10T-ВД | 9,0-11,0 | 17,0-19,0 | основа      | Не более 2 | -    |
| Припой       | основа   | 19,0      | отсутствует | 35,0       | 10,0 |
| Сварной шов  | 36,0     | 15,0      | 30,0        | 12,0       | 1,0  |

Как видно из таблицы 2 содержание марганца в сварном шве значительно превышает основной материал, что предположительно и приводит к появлению трещин.

Моделирование процесса формирования сварного шва выполняли на образце-кольце из стали 12X18H10T-ВД шириной 100 мм, толщиной 3 мм и диаметром 1050 мм. Толщина выбиралась с учетом подкладного кольца, диаметр - исходя из величины диаметра сварных кромок паяных оболочек. Образец-кольцо был разбит на 16 равных участков. На кольцо было выполнено четыре прохода электронным лучом с различными значениями тока луча от 12 до 18 мА (с шагом 2 мА), тока фокусирующей линзы от 744 до 763 мА (с

шагом 3 мА) и скорости сварки 6 мм/с и 11 мм/с, для исследования получили 64 образца.

Для получения качественного сварного соединения шов должен быть шириной не более 2,4 мм и глубиной провара не менее 2 мм. При выполнении рентгенографического контроля, дефектов на образцах не выявили. Металлографическое исследование показало, что при остром токе фокусировки 744 мА наблюдается максимальная ширина ванны и минимальная глубина провара. С увеличением тока фокусирующей линзы ширина ванны уменьшается, а глубина возрастает. При скорости сварки 6 мм/с минимальная ширина составила 2,9 мм, что приводит к нагреву паяного шва, попаданию элементов припоя в сварной шов и повышение вероятности появления трещин. При скорости сварки 11 мм/с тепловложение минимально, на всех режимах сварки ширина шва значительно меньше. Наиболее оптимальные параметры сварного шва получены при скорости сварки 11 мм/с, токе луча 16 мА и токе фокусирующей линзы 759 мА.

На данном режиме была сварена серийная сборочная единица и проведено материаловедческое исследование сварного шва. Величина зерна по шкале №3 ГОСТ 5639-82 при оптимальном режиме на образце-кольце и натурном узле приведена в таблице 3.

Таблица 3 - Величина зерна

| Образец            | Сварной шов     | Основной материал |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| ЭЛС образец-кольцо | Литая структура | 9-10 мкм          |
| ЭЛС натурный узел  |                 | 9-10 мкм          |

Микроструктура основного материала представляет собой полиэндрически сдвоенные аустенитные зерна, характерный размер которых не превышает 45 мкм (рис. 2). Структура сварного шва дендритная, вблизи ОШЗ дендриты ориентированы нормально к ней. Ориентировочные дендриты в длину достигают до 300 мкм, неупорядоченные дендриты имеют меньшую длину, но у них лучше развита морфология границ. В зоне термического влияния произошел сильный рост зерен, по структуре не отличается от основного материала. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не обнаружено.

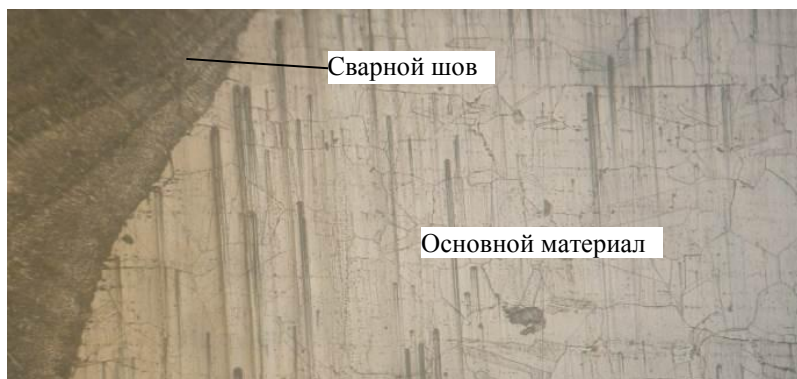


Рисунок 2 - Микроструктура сварного шва и основного материала ( $\times 100$ )

Был произведен замер микротвердости на основном материале и в литой зоне сварного шва. Результаты замеров микротвердости (средние значения) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Микротвердость HV 0,05

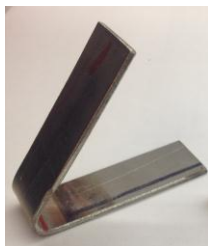
| Материал             | Сварной шов,<br>HV, $\text{кг/мм}^2$ | Основной материал,<br>HV, $\text{кг/мм}^2$ |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| ЭЛС образец          | 163                                  | 150                                        |
| ЭЛС натуральный узел | 158                                  | 151                                        |

Проведены механические испытания с определением временного сопротивления сварного шва. Разрыв произошел не по сварному шву, а по основному материалу (рис. 3) на расстоянии 28 мм от края сварного шва, вне зоны термического влияния при усилии 580 МПа (временное сопротивление основного материала 530 МПа).

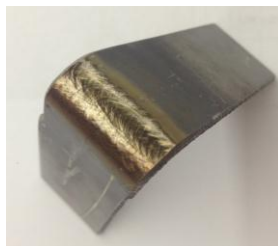


Рисунок 3 – Образец после испытания на растяжение X1,5

При испытание на изгиб образец загнули до  $130^\circ$  (рис. 4а). На сварном шве трещин не обнаружено (рис.4б).



а) угол изгиба



б) сварной шов Х2

Рисунок 4 – Образец после испытания на изгиб

Выполнен химический анализ сварного шва, околошовной зоны (ОШЗ) и основного материала. По результатам электронной микроскопии получили, что содержание углерода во всех исследуемых образцах завышено (до 4,78 % на основном материале) по сравнению с ГОСТ 5632-72 (не более 0,12 %). Содержание железа, хрома и никеля количественно одинаково как по точкам, так и по площадям, что говорит о высоком качестве сварного соединения.

Для подтверждения содержания элементов выявленных на растровом электронном микроскопе, была определена концентрация (в массовых %) химических элементов основного материала 12Х18Н10Т-ВД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Содержание элементов, %

| Метод замера | C     | Cr    | Ni   | Ti   | Mn   | Fe       |
|--------------|-------|-------|------|------|------|----------|
| Спектрометр  | 0,039 | 17,4  | 10,1 | 0,30 | 0,86 | 71,3     |
| РЭМ          | 1,13  | 22,37 | 8,50 | -    | -    | 68,01    |
| ГОСТ 5632-72 | 0,12  | 17-19 | 9-11 | 0,8  | 2,0  | 67,08-71 |

Из таблицы 5 видно, что содержание хрома, никеля и железа подтверждено спектральным анализом и соответствует ГОСТ на основной материал. При анализе на РЭМ содержание углерода завышено и является систематической ошибкой, обусловленной наличием паров масла в вакуумной камере. При проведении анализа пары масла попадают на поверхность образца. Масло относится к углеводородным соединениям, содержащим углерод, который и оказывает существенное завышение результатов, полученных на растровом электронном микроскопе. Завышенное содержание хрома обусловлено суммированием количественного содержания титана и марганца с высокой ошибкой при РЭМ. В дальнейшем, при исследовании шлифов, РЭМ не применялся.

Из полученных результатов оптимальные геометрические параметры сварного шва получены при скорости сварки 11 мм/с, токе луча 15 мА и токе фокусирующей линзы 759 мА (рис. 5.).

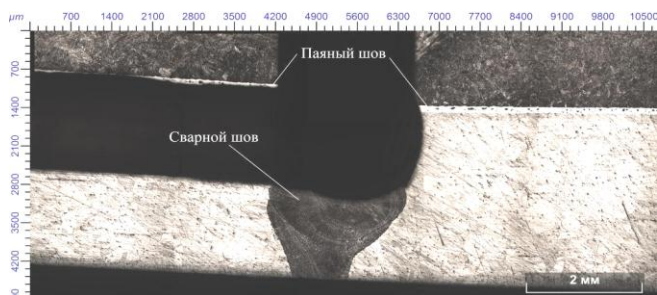


Рисунок 5 - Фото сварного шва паяной оболочки при “новом” режиме

Как видно на рис. 5 ширина сварного шва составила 2,3 мм. Дефектов не выявили. Данные параметры сварки обеспечивают необходимую глубину проплавления для полного провара и минимальную ширину ванны для исключения попадания припоя в сварной шов. Благодаря увеличению скорости сварки уменьшается тепловложение, что снижает деформацию свариваемых деталей.

**В главе четыре** исследовано влияние режимов ЭЛС коррозионностойкой жаропрочной стали 06X15H6MBФБ-Ш толщиной 9 мм без предварительного подогрева на склонность к образованию пор в условиях серийного производства (рис. 6).

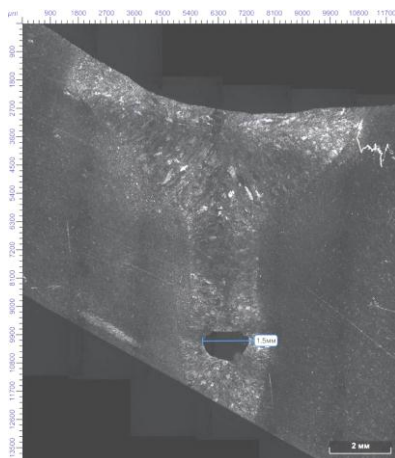


Рисунок 6 - Пора в корне сварного шва

В условиях серийного изготовления при скорости сварки 5 мм/с достаточно часто встречались дефекты в виде пор в корневой части сварного шва. Отработку режима сварки для получения бездефектного соединения производили на образце-имитаторе натурального узла. Имитатор был выполнен в виде кольца с толщиной сварных кромок 9 мм и толщиной технологического подкладного кольца 5 мм. Образец-имитатор был разбит на 17 равных участков. Выбор режима сварки производили при скорости 3 мм/с путем изменения тока луча и тока фокусирующей линзы.

На образцах с №1 по №8 получили шлаковые включения, на образцах с №9 по №15 дефекты отсутствуют. На образцах №16 и №17 получили прожог, что обусловлено повышенным током луча, в дальнейшей работе их не рассматривали. Ширина сварного шва увеличивается с 5,6 мм до 7,5 мм. Минимальную ширину сварного шва получили на всех токах луча при токе фокусирующей линзы 732 мА. На необходимую глубину проварили образцы при токе луча 45 мА и 48 мА и токе фокусирующей линзы до 736 мА. Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва и бездефектное соединение получено на образце №15 (таблица 6).

Таблица 6 - Оптимальные параметры для сварки

| Ток сварки, мА | Ток фокусировки, мА | Параметры сварного шва |                     |
|----------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|                |                     | Ширина ванны, мм       | Глубина провара, мм |
| 48±1           | 728                 | 6,0                    | 9,0                 |

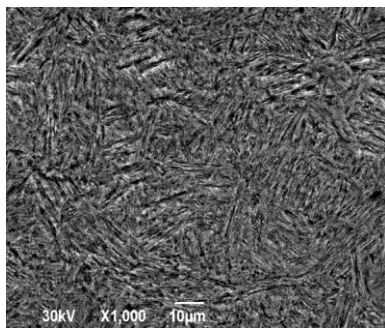
Исследование физико-механической однородности сварного соединения на образце с оптимальными параметрами сварки в целом оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, сварного шва и околошовной зоны (ОШЗ). Результаты замера представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Микротвердость HV 0,05

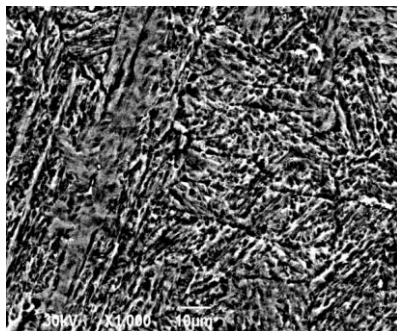
| № образца | Сварной шов, HV, кг/мм <sup>2</sup> | ОШЗ, HV, кг/мм <sup>2</sup> | Основной материал, HV, кг/мм <sup>2</sup> |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| 15        | 326                                 | 361                         | 302                                       |

Из таблицы 7 следует, что микротвердость основного металла имеет минимальные значения, максимальная микротвердость обнаружена в ОШЗ, что обусловлено образованием структур закалочного характера.

Микроструктура сварного шва на участке №15 представлена рисунке 7.



а) структура основного металла



б) структура сварного шва

Рисунок 7 - Микроструктура образца после сварки

Как видно из рис. 7а, структура основного материала соответствует стали мартенситного класса, а на рис. 7б в ОШЗ заметны крупные зерна, характерные для высоколегированных сталей. Структура сварного шва представлена двумя фазами: аустенит (гранецентрированная кубическая решетка) и  $\alpha$  - Fe (объемно-центрированная кубическая решетка). Отсутствие ярко выраженной, характерной зоны термического влияния (ЗТВ) на исследуемом образце свидетельствует о достаточно высокой структурной и физико-механической однородности сварного соединения.

Определена концентрация (в массовых %) химических элементов сварного шва стали 06X15H6MBФБ-Ш на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Содержание элементов, %

| Метод замера   | C     | Cr      | Ni    | Mo       | Fe          |
|----------------|-------|---------|-------|----------|-------------|
| Спектрометр    | 0,067 | 14,3    | 5,34  | 0,8      | 79,49       |
| ТУ 14-1-2903-8 | 0,06  | 13,5-15 | 5,5-6 | 0,35-0,6 | 78,34-80,59 |

Из таблицы 8 видно, что содержание хрома, никеля и железа соответствует ТУ на основной материал, что говорит о высоком качестве сварного соединения.

Микроструктура с геометрическими параметрами сварного шва на режимах таблицы 6 представлены на рис. 8.

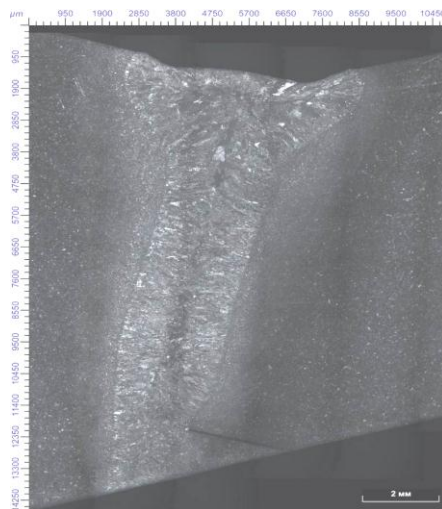


Рисунок 8 - Сварной шов

Данные параметры сварки обеспечивают необходимую глубину проплавления для полного провара с минимальной шириной ванны и исключают образование дефектов, такие как поры и шлаковые включения.

**В главе пять** рассмотрено повышение стабильности формирования сварных соединений жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм и выбора оптимального режима электронно-лучевой сварки жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм наклонность к образованию трещин.

В работе приведены экспериментальные данные исследований по электронно-лучевой сварке сплава ХН45МВТЮБР-ИД за счет изменения различных энергетических и технологических параметров (тока луча, тока фокусировки, скорости сварки). Проведено металлографическое исследование полученных сварных соединений, изучены механические характеристики сварных соединений в зависимости от режимов сварки, структура и химический состав.

При металлографическом исследовании замерялись геометрические параметры шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД, полученного при различных значениях тока луча, тока фокусирующей линзы и скорости сварки 7 мм/с и 11 мм/с.

На образцах с №1 по №3 при скорости сварки 7 мм/с получили непровар из-за заниженного тока луча. На образцах с №5 по №7 при скорости сварки 11 мм/с получили прожоги из-за завышенного тока

луча. На образце №4 дефекты отсутствуют. Ширина сварного шва изменяется от 4,8 мм до 5,95 мм, при токе фокусирующей линзы 780 мА ширина шва максимальная. При токе фокусирующей линзы 783 мА ширина шва минимальная и составила 4,8 мм. На необходимую нам глубину проварили образцы при токах более 30 мА и при токе фокусирующей линзы больше 760 мА.

Исследование физико-механической однородности сварного соединения на образцах в целом оценивали методом измерения микротвердости HV0,05 основных его составляющих: основного металла (304-366 HV, кГ/мм<sup>2</sup>), сварного шва (262-322 HV, кГ/мм<sup>2</sup>) в трех уровнях (на поверхности, в середине и в корне шва) и околошовной зоны (ОШЗ 276-306 HV, кГ/мм<sup>2</sup>). Микротвердость ОШЗ имеет минимальные значения ввиду образования переходной зоны от сварного шва к основному металлу. Это обусловлено переходом карбидов и интерметаллидов из твердого раствора на границах зерен в результате изменения структуры от действия температуры.

Микроструктура сварного шва на образце №4 представлена на рис. 9.

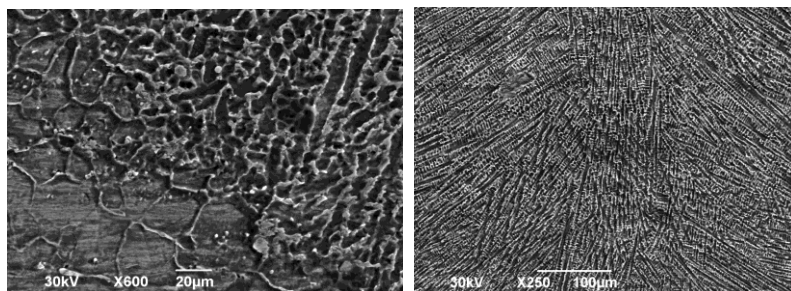


Рисунок 9 - Микроструктура образца после сварки основного металла в районе околошовной зоны (слева) и сварного шва (справа)

Металл шва во всех случаях характеризуется четко выраженным дендритным строением. Граница перехода от основного металла к зоне шва резкая, ЗТВ практически не выявлена. Основной металл имеет однородное крупнозернистое строение. В структуре наблюдаются карбонитриды и карбиды, а также мелкодисперсная интерметаллидная  $\gamma'$  - фаза. По центру сварного шва видна столбчатая дендритная структура литого сплава. Основной металл сварного соединения из сплава ХН45МВТЮБР-ИД отличается ярко выраженной неоднородностью, полосчатостью структуры. Указанная неоднородность структуры сохраняется в ОШЗ, где наблюдается рост

зерна. По границам зерен, близко расположенным к металлу шва, в процессе термического цикла сварки могут располагаться ликвационные составляющие, отличающиеся высокой хрупкостью и легкой травимостью. Однако, дефектов макроструктуры в виде пор, трещин обнаружено не было.

Определена концентрация (в массовых %) химических элементов сварного шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Содержание элементов, %

| Метод замера    | C     | Cr    | Ti      | Al      | Fe        | W       | Mo   | Ni    |
|-----------------|-------|-------|---------|---------|-----------|---------|------|-------|
| Спектрометр     | 0,049 | 16,0  | 2,15    | 1,08    | 29,5      | 2,68    | 4,21 | 44,3  |
| ТУ 14-1-3905-85 | 0,01  | 14-16 | 1,9-2,4 | 0,9-1,4 | 24,7-33,7 | 2,5-3,5 | 4-5  | 43-47 |

Из таблицы 9 видно, что содержание хрома, никеля и железа количественно одинаково и однородно.

Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД и бездефектное соединение получено при скорости сварки 7 мм/с на образце №4 (таблица 10).

Таблица 10 - Оптимальные параметры для сварки

| Ток сварки, мА | Ток фокусировки, мА | Параметры сварного шва |                     |
|----------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|                |                     | Ширина ванны, мм       | Глубина провара, мм |
| 30±1           | 783                 | 4,8                    | 4,0                 |

Данные параметры сварки обеспечивают необходимую глубину проплавления для полного провара с минимальной шириной ванны и исключают образование дефектов.

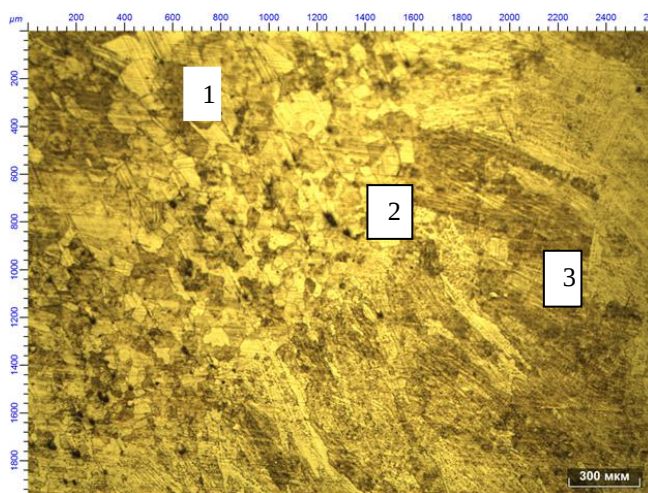
Склонность сплава ХН67ВМТЮ-ВД к образованию трещин при ЭЛС исследовали на скоростях сварки 3 и 5 мм/с. Значение тока луча, тока фокусировки и скорости сварки подбирали таким образом, чтобы в процессе сварки на технологической подкладке получались отдельные точечные проплавления.

Отработку режима сварки производили на образце-имитаторе натурального узла. Образец был разбит на семь участков. При сварке с технологической подкладкой, лицевой валик на исследуемых сварных швах сформирован на всех образцах без занижений и подрезов кроме образцов №6 и №7, на которых обнаружены подрезы сварного шва, что обусловлено завышенным током луча. Рентгенографическим контролем установлено, что на образцах №2 и №3 имеются поры. На образцах №1, №4 и №5 дефектов не обнаружено.

Для оценки качества сварки каждый из образцов подвергался разрезке и металлографическому исследованию с определением параметров сварных швов, микротвердости и наличия дефектов. Конфигурация сварного шва меняется: ширина шва уменьшается, поперечное сечение из конического переходит в более цилиндрическое. Ширина сварного шва составила 6,7- 11,8 мм. При токе фокусирующей линзы 754 мА и 757 мА ширина шва минимальная и составила 6,7-6,9 мм. Глубина сварного шва на всех образцах одинакова и составила 6 мм. Выбор наиболее оптимального режима сварки произвели, исходя из минимального значения тока фокусирующей линзы (757 мА) и тока луча 42 мА.

Замер микротвердости HV0,05 производили на основном материале (291-296 HV, кГ/мм<sup>2</sup>), в околошовной зоне (ОШЗ 287-298 HV, кГ/мм<sup>2</sup>) и в литой зоне сварного шва (291-298 HV, кГ/мм<sup>2</sup>). Значения микротвердости на всех участках количественно одинаковы, что говорит о высоком качестве сварного соединения.

На рис. 10 представлена микроструктура сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД на образце №5 при увеличении 85X.



1- основного материала, 2- ОШЗ, 3- сварной шов

Рисунок 10 - Микроструктура сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД.

Сварной шов имеет столбчатую крупнокристаллическую структуру литого сплава. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не выявлено. Структура основного материала – твёрдый хромоникелевый раствор + упрочняющая фаза, величина зерна

соответствует № 1-2 шкалы ГОСТ 5639. Зона термического влияния по структуре отличается от основного материала по величине зерна и соответствует № 5-6 шкалы ГОСТ 5639.

Определена концентрация (в массовых %) химических элементов сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Содержание элементов, %

| Метод замера | C    | Cr    | Ti      | Al    | Fe   | W    | Mo   | Ni          |
|--------------|------|-------|---------|-------|------|------|------|-------------|
| Спектрометр  | 0,04 | 17,7  | 2,57    | 1,49  | 1,18 | 4,50 | 4,71 | 67,81       |
| ГОСТ 5632-72 | 0,08 | 17-20 | 2,2-2,8 | 1-1,5 | ≤4   | 4-5  | 4-5  | 61,62-67,72 |

Из таблицы 11 видно, что содержание хрома и железа количественно одинаково.

По результатам экспериментальных работ бездефектное соединение с наиболее оптимальными геометрическими параметрами сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД получили на образце №4 при скорости сварки 5 мм/с (таблица 12).

Таблица 12 - Оптимальные параметры для сварки

| Ток сварки, мА | Ток фокусировки, мА | Ширина ванны, мм | Глубина провара, мм |
|----------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 42±1           | 757                 | 6,7              | 6,0                 |

Данные параметры сварки обеспечивают необходимую глубину проплавления для полного провара с минимальной шириной ванны и исключают образование трещин.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать выводы и рекомендации:

1. Проведено исследование состава, структуры и свойств полученных электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) сварных швов малой толщины 1,5 – 9 мм коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов, в том числе тонкостенных паяных конструкций. На основании материаловедческого анализа результатов экспериментов изучены и подтверждены основные закономерности механизма формирования соединений и образования дефектов в них при электронно-лучевой сварке.

2. Установлены особенности формирования сварного шва толщиной 1,5 мм паяных тонкостенных оболочек сопла камеры сгорания ракетного двигателя из нержавеющей стали аустенитного класса 12Х18Н10Т-ВД. Показано, что дефекты образуются при

попадании элементов припоя в сварной шов при ЭЛС. Определены технологические параметры ЭЛС, при которых ширина сварного шва меньше щелевого зазора, паяное соединение не расплавляется и элементы припоя не попадают в сварной шов.

3. При исследовании формирования сварного шва коррозионностойкой жаропрочной стали мартенситного класса 06X15H6MBФБ-Ш толщиной 9 мм установлено, что поры в корневой части шва образуются при токе фокусирующей линзы, близком к острому току. При варьировании тока луча и тока фокусирующей линзы найдены режимы ЭЛС для получения беспористого соединения.

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 появлением таких дефектов как непровар, поры, избыточный проплав с занижением лицевого валика сварного шва. Определены параметры ЭЛС для получения бездефектного сварного соединения с минимальным проплавом и требуемым проваром.

5. Исследованы закономерности формирования на технологическом подкладном кольце сварного шва также склонного к трещинообразованию жаропрочного сплава на никелевой основе ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм. Выявлена зависимость режимов ЭЛС с появлением таких дефектов как поры и прожоги. Сварное соединение без дефектов получили при скорости сварки 5 мм/с, которая является минимально рекомендуемой для сплавов на никелевой основе.

6. Выполненные материаловедческие исследования позволили за счет найденных оптимальных параметров электронно-лучевой сварки получить качественные сварные соединения малой толщины 1,5 – 9 мм сталей 12Х18Н10Т-ВД и 06Х15Н6МВФБ-Ш, сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД в условиях производства камер сгорания двигателей авиационной и ракетной техники.

7. Полученные результаты по электронно-лучевой сварке коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов внедрены на предприятии-изготовителе камер сгорания авиационной и ракетной техники АО «Металлист-Самара», г. Самара.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ**

1. Исаев, С.Л. Формирование сварного шва при электронно-лучевой сварке жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм

[Текст] / С.Л. Исаев // Вестник СамГТУ. Технические науки. - 2014. - № 3. - С.81-84.

2. Исаев, С.Л. Особенности сварки тонкостенных паяных оболочек из стали 12Х18Н10Т [Текст] / С.Л. Исаев // Научные технологии в машиностроении. – 2015. - № 2. – С. 9-14.

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

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

#### **Публикации в изданиях, входящих в базу elibrary.ru и наукометрическую базу РИНЦ**

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

6. Исаев, С.Л. Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ-ВД [Текст] / С.Л. Исаев // Международной научно-практической конференции с докладом «Наука и инновации в современных условиях». – Магнитогорск, - 2016. - С. 23-25.

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

#### **Публикации в других изданиях**

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

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

*Научное издание*

**ИСАЕВ Сергей Леонидович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ  
ДЕТАЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ РАКЕТНОЙ И АВИАЦИОННОЙ  
ТЕХНИКИ**

Редактор

Технический редактор

Компьютерная верстка

Подписано в печать «12» сентября 2018 г.

Усл. печ. л. 1. Заказ № 525. Тираж 100 шт.

---

Опечатано в типографии

Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8.