

ФГБОУ ВО “САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ”

АО “МЕТАЛЛИСТ - САМАРА”

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)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель -

доктор физико -
математических наук,
профессор Амосов А.П.

Самара 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	9
1.1 Описание камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя.....	9
1.2 Описание камеры сгорания авиационного двигателя.....	13
1.3 Материалы и особенности сварных соединений в камере сгорания.....	15
1.4 Особенности сварных соединений в камерах сгорания и их условия эксплуатации.....	19
1.5 Металлургическое качество свариваемых материалов.....	20
1.6 Дефекты сварных соединений.....	25
1.7 Характерные дефекты сварных соединений, полученные ЭЛС.....	29
1.8 Методы контроля сварных соединений.....	31
Задачи для экспериментальных исследований.....	35
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ	37
2.1 Материалы для исследования.....	37
2.2 Материаловедческие методы исследования.....	41
2.3 Технология электронно-лучевой сварки.....	53
Выводы по главе 2.....	58
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАЯНЫХ СЕКЦИЙ ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА 12Х18Н10Т-ВД.....	60
3.1 Анализ свариваемости стали 12Х18Н10Т-ВД.....	61
3.2 Моделирование процесса сварки паяных соединений.....	65
3.3 Исследование влияния параметров сварки на химический состав сварных соединений и металлографическое исследование сварных швов.....	70
Выводы по главе 3.....	91

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА 06X15H6MBФБ-Ш.....	92
4.1 Анализ свариваемости стали 06X15H6MBФБ-Ш.....	94
4.2 Металлографическое исследование сварных швов.....	96
Выводы по главе 4.....	103
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ	104
5.1 Закономерности формирования сварных швов из жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД.....	106
5.2 Исследование свариваемости жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР- ИД и ХН67ВМТЮ-ВД.....	109
5.3 Особенности формирования и металлографическое исследование сварных соединений сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД....	112
Выводы по главе 5.....	121
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ.....	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. 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 [1,2]. 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 промышленности. Не все они одинаково хорошо свариваются [3].

Проблема получения качественных сварных швов аустенитных сталей и жаропрочных сплавов - одна из наиболее сложных проблем современного материаловедения в области сварочной науки и техники. Эта проблема сложна еще и потому, что одну и ту же сталь можно использовать для изготовления конструкций разного назначения, например, хладостойких и жаропрочных. Однако сварочные материалы и технология сварки будут в каждом случае различными в зависимости от условий эксплуатации конструкции, а, значит, и обеспечение качества сварных швов будет различным.

Одним из наиболее распространенных способов сварки 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. Кроме того, в случае необходимости изготовления сварных соединений конструкций, имеющих сложную форму, сварку которых возможно выполнить только методом ЭЛС [4]. 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 единственно возможным способом соединений толщиной до 200 мм.

Использование электронного луча в качестве источника тепла открывает исключительные возможности в управлении тепловыми процессами при сварке. Изменяя в широких пределах мощность луча и плотность энергии можно получить наиболее благоприятный для каждого материала термический цикл сварки. Электронный луч становится в этом отношении универсальным сварочным инструментом.

Получение концентрированных источников тепла за счет фокусирования электронного луча позволяет существенно уменьшить зону термического влияния и тем самым повысить технологические свойства свариваемых материалов.

Большой вклад в изучение процессов, протекающих при ЭЛС, внесли советские и российские ученые, как Патон Б.Е.[5], Назаренко О.К., Кайдалов А.А. [6], Драгунов В.К. [7, 8], Беленький В.Я., Трушников Д.Н. [9, 10], Мурыгин А.В., Лаптенко В.Д. [11], Браверман В.В. [12], а также зарубежные авторы Я. Айрат [13], Р. Рай [14], Ванг [15], Б.С. Юлбас [16] и др.

С целью обеспечения минимального веса изделия и получения заложенных конструкторами прочностных характеристик при изготовлении камер сгорания 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 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. Дефекты приходится дорабатывать, а это усложняет и удорожает производство готовой продукции, а также, увеличивает сроки изготовления, что порой недопустимо.

Основная цель работы:

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.

Объект исследования: образцы-имитаторы сварных швов натуральных узлов камер сгорания авиационных и жидкостных ракетных двигателей.

Предмет исследования: материаловедческое исследование состава, структуры и свойств материала сварных швов; дефекты сварных соединений; влияние режимов сварки на качество полученных соединений.

Научная новизна:

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.

Достоверность научных результатов работы 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.

Практическая значимость:

1. На основе проведения материаловедческих исследований выявлены причины образования дефектов в сварных швах, полученных электронно-лучевой сваркой, и найдены режимы сварки, позволившие получить качественные сварные соединения 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 12X18H10Т-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 работы докладывались и обсуждались на 5-ой Международной научно-практической конференции “Современные материалы, техника и технология” (г. Курск, 2015г.), на Международной научно-практической конференции “Наука и инновации в современных условиях” (г. Магнитогорск 2016г.), на Всероссийской научно-технической интернет-конференции “Высокие технологии в машиностроении” (г. Самара 2016г.), на Международной научно-практической конференции “Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы” (г. Екатеринбург 2016г.), на Второй международной конференции “Электронно-лучевая сварка и смежные технологии” (г. Москва, ФГБОУ ВО НИУ МЭИ, 14 – 17 ноября 2017г.).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 4 работах, рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора в диссертационную работу состоит в постановке целей и задач при проведении исследовательской работы, металлографическом исследовании сварных швов, изучении влияния параметров сварки на механические характеристики, структуру и химический состав сварного шва, выборе оптимальных режимов сварки жаропрочных, коррозионностойких сталей и сплавов на никелевой основе, разработке мероприятий по повышению качества сварных соединений при производстве камер сгорания АД и ЖРД.

В приложении представлен акт внедрения полученных результатов работы на предприятии.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Описание камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя

В современной гражданской и военной авиации, в космической технике широко используются реактивные двигатели. Реактивным называют такой тепловой двигатель, в котором энергия горючего переходит в кинетическую энергию газового потока, вытекающего из двигателя, а возникающая при этом процессе сила реакции применяется как движущая сила [17].

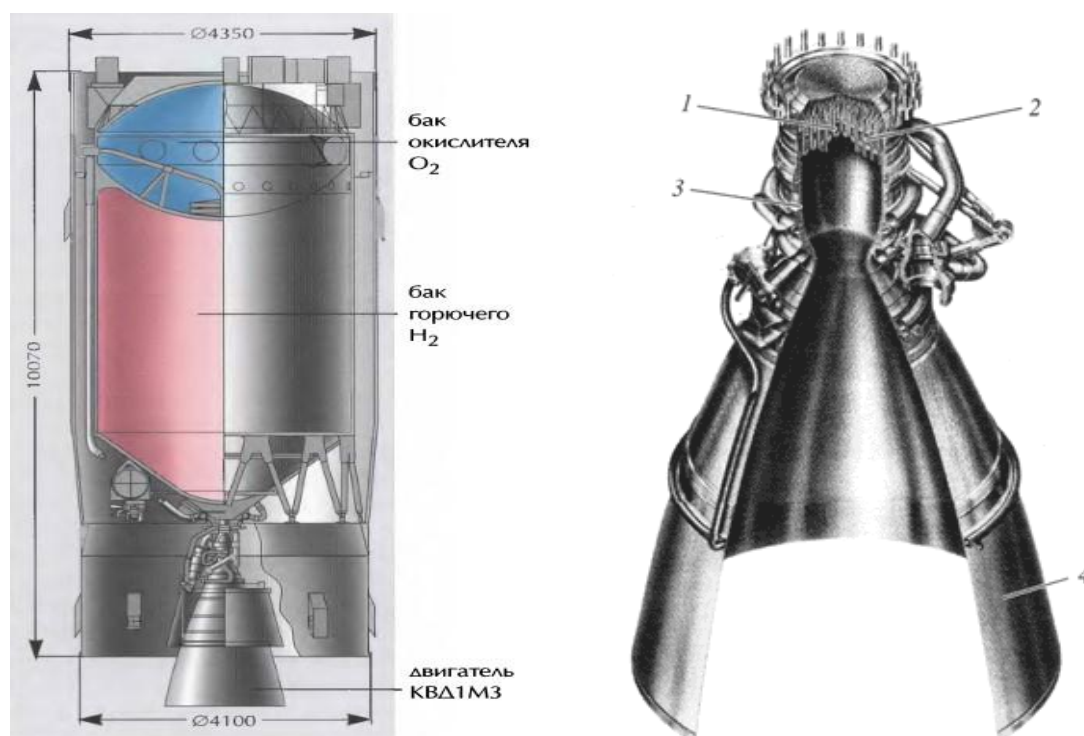
Реактивный двигатель выполняет одновременно две задачи, а именно служит двигателем и движителем. В свою очередь, например поршневой авиационный мотор, выполняет функцию только двигателя, а функцию движителя выполняет воздушный винт.

Химические реактивные двигатели делятся на два вида – ракетные и воздушно-реактивные. Основное различие между этими двигателями заключается в том, что в ракетных двигателях газовый поток возникает из топлива и окислителя, имеющихся на воздушном аппарате, а в воздушно-реактивных двигателях рабочим телом служит воздушное пространство окружающей среды. Кислород из атмосферы применяется в качестве окислителя при сгорании горючего в двигателе [18 - 22].

На рис. 1.1 а представлена хвостовая часть ракеты. В ней размещен блок в виде цилиндра, в верхней части которого размещен бак с окислителем, а в нижней – бак с топливом. К верхнему шпангоуту топливного отсека крепится конический обтекатель, внутри которого размещена аппаратура блока. К нижнему шпангоуту топливного отсека крепится хвостовой отсек и жидкостный ракетный двигатель с дожиганием генераторного газа.

Рассмотрим жидкостно-ракетный двигатель (рис. 1.1 б). Зажигание его при включении производится от какого-либо стороннего источника. В блок камеры сгорания ЖРД через распылители постоянно вводятся жидкие элементы

горючего, где они смешиваются и выгорают. При их сгорании возникает высокое давление (до 25 МПа) и высокая температура (до 2000 К) и продукты сгорания с большой скоростью рассеиваются через закритическую часть камеры сгорания в атмосферу. При этом образуется давление реакции потока газов, воздействующего на космический аппарат в направлении, противоположном курсу перемещения потока сгорания топлива [23, 24].

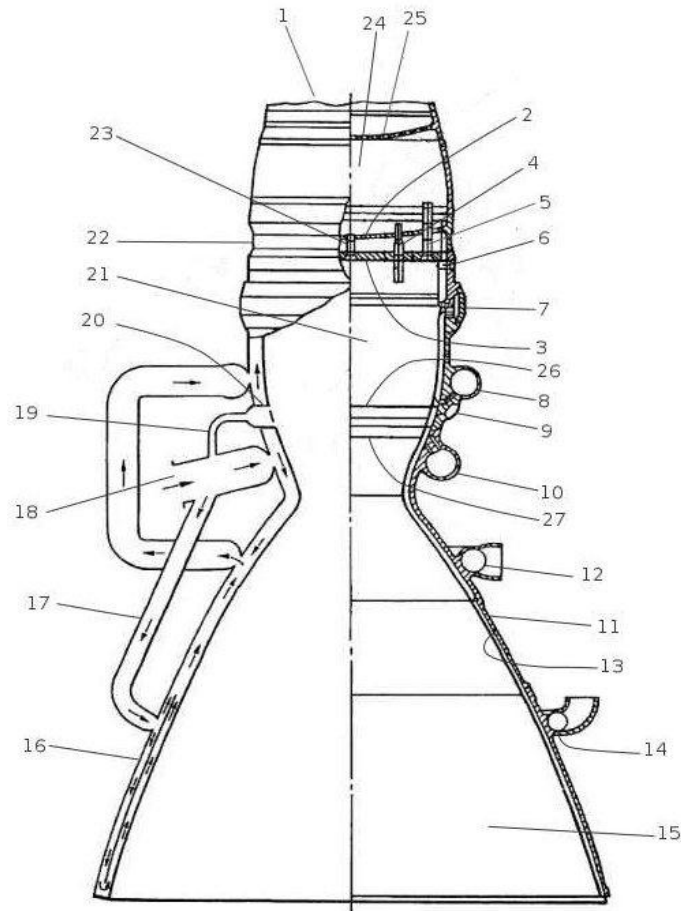


Слева хвостовая часть ракеты, справа - камера сгорания ракетного двигателя, 1-смесительная головка, 2-форсунка, 3-докритическая часть камеры сгорания, 4-закритическая часть камеры сгорания.

Рисунок 1.1 - Принципиальная схема жидкостного ракетного двигателя

Сначала возгорание горючей смеси происходит от фитильного устройства, если элементы горючего не возгорятся самостоятельно. Элементы сгорания горючего увеличиваются в закритической части камеры сгорания и стремительно вылетают в атмосферу с большими скоростями. Образующаяся при этом движущая сила в сопловой части камеры сгорания возрастает до очень больших значений.

Камера сгорания представляет собой паяно-сварной неразъемный узел и состоит из смесительной головки, камеры сгорания и сопла. Крепление камеры к газовому тракту осуществляется при помощи фланцевого соединения.



1 - газовод, 2 - среднее днище смесительной головки, 3 - переднее (огневое) днище смесительной головки, 4 - форсунки, образующие антипульсационные перегородки, 5 - основные форсунки, 6 - подвод воспламенительной смеси (4 форсунки, питаемые из отдельного коллектора), 7 - коллектор верхнего пояса завесы, 8 - коллектор подвода горючего для охлаждения цилиндрической части КС, 9 - коллектор среднего 26 и нижнего 27 поясов завесы, 10 - главный коллектор подвода горючего к КС, 11 - наружная силовая стенка КС, 12 - коллектор отвода горючего из тракта охлаждения сопла, 13 - внутренняя стенка КС, 14 - коллектор подвода горючего для охлаждения выходной части сопла, 15 – сопло, 16 - горючее движется к срезу сопла по четным (условно) и возвращается по нечетным каналам, 17 - подвод горючего для охлаждения выходной части сопла, 18 - подвод горючего от насоса, 19 - подвод горючего к среднему и нижнему поясам завесы, 20 - перегородка в каналах, 21 - цилиндрическая часть КС, 22 - смесительная головка, 23 - центральная форсунка, 24 - газовая полость смесительной головки, 25 - перфорированное заднее днище смесительной головки, 26 - средний пояс завесы, 27 - нижний пояс завесы.

Рисунок 1.2 - Схема камеры сгорания

Более подробная схема представлена на рис. 1.2. Корпус камеры состоит из камеры сгорания и сопла. Корпус камеры включает в себя наружную силовую оболочку 11 и внутреннюю огневую стенку 13 с фрезерованными каналами, образующими тракт наружного регенеративного охлаждения камеры, имеющий три входа охладителя. Первый вход сообщен с трактом охлаждения критического сечения сопла, второй вход сообщен с трактом охлаждения выходной части сопла, а третий - с трактом охлаждения камеры сгорания. При этом первый выход сообщен с третьим входом, а первый вход, второй вход и подвод к двум нижним поясам щелевых завес объединены общим патрубком, разветвленным и размещенным снаружи камеры.

Внутреннее охлаждение обеспечивается тремя поясами щелевых завес в докритической части камеры сгорания. Через них на стенку подается около 2% горючего в виде пленок, испаряющихся и защищающих ее от тепловых потоков, которые в критическом сечении сопла достигают величин порядка 50 МВт/м^2 .

Средства воспламенения выполнены из четырех равнорасположенных по окружности струйных форсунок 6, установленных за передним (огневым) днищем 3 в силовом корпусе камеры 11. Оси расходных отверстий струйных форсунок расположены под острым углом к выходу из силового корпуса и отклонены по кругу в поперечной плоскости от продольной оси силового корпуса в одинаковом направлении, причем ось расходного отверстия каждой струйной форсунки является скрещивающейся по отношению к осям расходных отверстий соседних с ней форсунок. Форсунки гидравлически объединены общим коллектором [25-28].

Форсуночная головка - узел, в котором смонтированы форсунки, предназначенные для впрыска компонентов топлива в камеру сгорания. Главное требование, предъявляемое к форсункам - максимально быстрое и тщательное перемешивание компонентов при поступлении в камеру, потому что от этого зависит скорость их воспламенения и сгорания.

Через форсуночную головку двигателя в камеру сгорания каждую секунду поступает порядка 1,8 т жидкого кислорода и 0,9 т керосина. И время нахождения каждой порции этого топлива и продуктов его сгорания в камере исчисляется

миллисекундами. Топливо должно сгореть насколько возможно полнее, так как несгоревшее топливо - это потеря тяги и удельного импульса [29, 30].

1.2 Описание камеры сгорания авиационного двигателя

Газотурбинный двигатель - это тепловая машина, предназначенная для преобразования энергии сгорания топлива в кинетическую энергию реактивной струи и (или) в механическую работу на валу двигателя, основными элементами которой являются компрессор, камера сгорания и газовая турбина.

Простейший газотурбинный двигатель включает в себя одну турбину, которая вращает компрессор и в тоже самое время, служит источником полезной мощности.

Также, двигатель может быть изготовлен многовальным, в состав которого входят несколько последовательно стоящих турбин, каждая из которых вращает определенный вал. Турбина высокого давления (первая после камеры сгорания) приводит в движение компрессор газотурбинного двигателя, а последующие служат для внешней нагрузки (винт вертолѐта или корабля, генераторы и т. д.), так и дополнительно установленные компрессоры самого двигателя, расположенные перед основным. Преимущество данного двигателя в том, что каждая турбина работает при оптимальном числе оборотов и нагрузке.

Газотурбинный двигатель включает в себя компрессор, камеру сгорания, турбину и сопло (рис. 1.3).

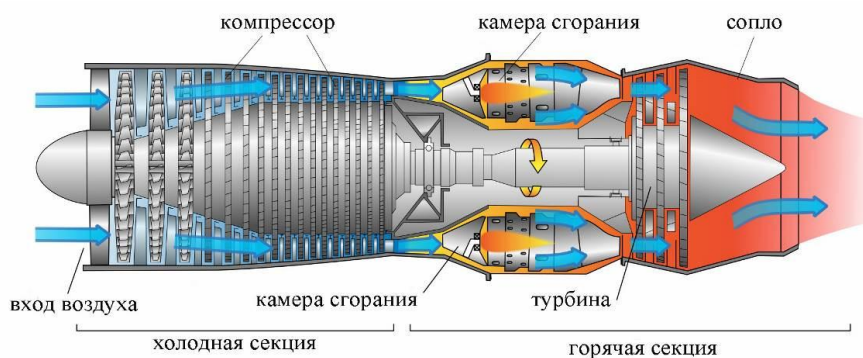


Рисунок 1.3 - Схема газотурбинного двигателя

Камера сгорания (КС) - основной агрегат газотурбинных двигателей (ГТД). Ее функция - сжигание горючего и выработка высоко нагретого газового пламени. Гарантия стабильного запуска и работы блока камеры сгорания, ее экономичность и продолжительный срок эксплуатации определяют аналогичные характеристики всей тепловой машины. Качество работы блока камеры сгорания характеризуется по показателю коэффициента полезного действия, долговечности и высокой экологичности всего узла [31 - 33].

Принципиально КС включает в себя кожуха, жаровую трубу и фронтное устройство с горелочными устройствами или завихрителями (рис. 1.4). Рабочий объем КС разделяется на две зоны – горения и смешения [34, 35].



Рисунок 1.4 - Камера сгорания авиационного двигателя НК – 32

Камера сгорания ГТД включает в себя трубу жаровую, корпус наружный и корпус внутренний. Труба жаровая состоит из фронтного устройства, кожуха внутреннего и кожуха наружного.

Корпусы камер современных ГТД представляют собой оболочки с приваренными к ним фланцами, предназначенными для соединения корпуса с другими силовыми узлами двигателя. Это соединение, как правило, осуществлено так, что без существенной разборки двигателя нельзя снять жаровые трубы для их осмотра или замены [36].

1.3 Материалы и особенности сварных соединений в камерах сгорания

При проектировании камеры сгорания руководствуются определенными требованиями, обусловленными режимами ее эксплуатации.

Камера сгорания эксплуатируется при:

- высоких температурах в ее рабочем пространстве (до 3600 К)
- высоком давлении газового потока (порядка 2 МПа).

Необходимо также учесть, что:

- топливная смесь должна сгорать не более чем за 0,005 с, что требует равномерного распыла элементов топливной системы и более полного их сгорания

- предусмотреть стабильное зажигание при включенном двигателе
- ограничивать по массе применяемые материалы элементов камеры сгорания, ввиду ее эксплуатации на летательных аппаратах, но с обеспечением высокого запаса прочности [37, 38].

Основная задача конструкторов при проектировании камеры сгорания – это совместить минимальный вес изделия, прочность конструкции и высокую тягу. Иногда допускается закладывать при проектировании материалы, имеющие больший вес с традиционно применяемыми, но позволяющие получить большую прочность конструкции и большую тягу [39].

При проектировании камеры авиационного и ракетного двигателя необходимо обеспечить:

- стабильное зажигание топливной смеси при пуске вне зависимости от окружающих условий;
- стабильное горение топливной смеси в рабочем диапазоне двигателя;
- минимальные потери мощности в рабочем диапазоне работы двигателя;
- охлаждение и стабильность работы на протяжении всего срока эксплуатации изделия;
- малый перепад давления рабочего топлива в охлаждающем тракте;

- максимальную простоту, минимальный удельный вес и стоимость изделия [28, 40].

Эффективность камеры сгорания характеризуется величиной развиваемой тяги при простоте, минимальной массе и долговечности изделия. Величина развиваемой тяги является определяющим параметром, который обеспечивает дальность полета [41].

Блок камеры сгорания авиационного двигателя эксплуатируется в очень тяжелых условиях. Процесс сгорания топливной смеси происходит в окислительной среде при высоких температурах до 1550 °С. Наличие больших температурных градиентов, резкие тепловые удары при пуске, остановке и смене режима работы двигателя является источником возникновения больших температурных напряжений в трубе жаровой, а присутствие свободного кислорода при температурах ~ 1550 °С ведет к газовой коррозии и прогару наружного и внутреннего экранов. Показателем стабильной работы на всем периоде эксплуатации камеры сгорания является ресурс жаровых труб.

Поток воздуха, идущий в камеру сгорания имеет температуру до 700 °С и давление до 45 атм. В рабочем пространстве камеры температура может достигать до 2200 °С, а на выходе из нее - 1650 °С. Однако, надо упомянуть, что температура плавления сталей и сплавов из которых изготовлены детали и сборочные единицы (ДСЕ) трубы жаровой составляет порядка 1350 °С. Путем правильного использования методов охлаждения данная температура в изделии не достигается [42].

Камеры сгорания получают путем соединения ДСЕ в том числе при помощи пайки и сварки. ЭЛС изделий, входящих в камеры сгорания может выполняться как на “весу”, так и с технологическим подкладным кольцом, которое после сварки механически убирается. Выполнение ЭЛС с подкладным кольцом позволяет получить более качественное соединение, так как дефекты в виде шлаков и пор остаются в корне шва, расположенного на съемном подкладном кольце.

1.3.1. Материалы, используемые для изготовления камер сгорания

Материалы камеры сгорания двигателя должны иметь не только высокие прочностные, но и высокие пластические свойства. Материалы внутреннего экрана должны обладать высокой теплопроводностью и прочностными характеристиками при рабочих температурах, однако наиболее широко используемые жаропрочные сплавы обладают низкой теплопроводностью. Для внешнего экрана данный параметр не настолько существен. Основным требованием для материалов, используемых при изготовлении внешнего экрана, является высокая прочность. В случаях, когда температура на наружном экране достигает 400 °С, используются материалы с высокой жаропрочностью.

В зависимости от применяемых компонентов и типа конструкции, материалы, используемые при производстве камер сгорания АД и ЖРД, должны хорошо свариваться и быть стойкими к агрессивной (кислотной) среде.

Ниже представлены рекомендации по выбору материалов при производстве камер ЖРД:

- сталь 12Х18Н10Т-ВД используется при изготовлении внутренних обечаек цилиндрической формы закритической части сопла камеры сгорания, где рабочая температура газа достигает 900 °С [43];

- сталь 12Х18Н9Т в настоящее время не применяют из-за повышенной склонности к межкристаллической коррозии;

- при изготовлении второй секции камер сгорания применяют сталь 12Х21Н5Т. Она хорошо сваривается с хромистой бронзой типа БрХ08 и применяется в качестве переходного кольца при сварке внутренних оболочек из стали 12Х18Н10Т-ВД и бронзы БрХ-08 [44]. Сталь 12Х21Н5Т используется также для изготовления наружных оболочек закритической части камер сгорания [45].

Жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ХН67ВМТЮ-ВД и коррозионностойкие жаропрочные стали типа 06Х15Н6МВФБ-Ш применяются при изготовлении головки смесителя и средней части КС [46].

Также, при производстве наружных и внутренних оболочек, эксплуатирующийся в восстановительной среде, применяют титановые сплавы. Для окислительной среды данные сплавы не применяются, так как они могут воспламениться из-за растрескивания окисной пленки [47].

Медные сплавы применяются при производстве внутренних стенок критической части камеры сгорания и смесительной головки в двигателях с рабочим давлением в камере сгорания более 10 МПа [48, 49].

Материалы, применяемые для изготовления камер сгорания авиационного двигателя, должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) высокие прочностные свойства при рабочих температурах (жаропрочность);
- 2) устойчивость к газовой коррозии (жаростойкость);
- 3) низкая склонность к растрескиванию при многократном термоциклировании;
- 4) технологичность: достаточная пластичность, обеспечивающая возможность штамповки, волочения, гибки и сварки.

Материалы для изготовления отдельных деталей КС авиационного двигателя выбирают, в зависимости от их теплового состояния, при работе с учетом действующих в них напряжений. У корпусов КС в современных двигателях с высокой степенью сжатия температура стенок достигает 600°C. Для их изготовления применяют стали типа 12X18H10T или ВЖ-102. В случае использования литых корпусов применяют сплав ВЖЛ-14. Стенки трубы жаровой имеют более высокую температуру, достигающую 1000°C.

Для изготовления жаровой трубы чаще всего применяют сплавы на никелевой основе: Х20Н80Т, ХН75МБТЮ, ХН70Ю и др. Наибольшее распространение получил сплав ВХ-4А (ХН50ВМТЮБ), но его надо защищать эмалью или теплозащитным покрытием на основе керамики (для предотвращения образования окалины). В стадии отработки находится материал ПХ- 23Ю5, превосходящий все существующие [50, 51].

Кожух камеры сгорания эксплуатируется при меньшей температуре и давлении рабочей смеси, в отличие от трубы жаровой. Он является несущим узлом блока камеры сгорания и включен в силовую схему двигателя. На него действует значительный перепад давлений между окружающей атмосферой и внутренней полостью камеры. Для его изготовления допускается использовать менее прочные материалы типа сталь 12Х18Н10Т или ХН30ВМТ (ЭП437), так как к ним не предъявляются столь жесткие требования при эксплуатации, как к жаровой трубе.

При изготовлении камер сгорания авиационного двигателя применяют жаропрочные и жаростойкие сплавы на никелевой основе типа ЭИ868, ЭИ703 и другие. Для камер сгорания эксплуатирующийся при температуре порядка 900 °С, применяют сплавы типа ЭИ602, при температуре до 1100 °С – сплав ЭИ868. Данные сплавы обладают высокой прочностью, стойкостью к коррозии, требуемой пластичностью, удовлетворительной штамповкой, волочением и хорошо свариваются [52 - 54].

Большую перспективу для применения в ракетных и авиационных двигателях имеют новые композиционные материалы, изготовленные с использованием высокоэнергетических методов воздействия, в том числе сваркой взрывом [55, 56].

1.4 Особенности сварных соединений в камерах сгорания и условия их эксплуатации

Камера сгорания - важнейший агрегат ракетного и авиационного двигателя, работающий в весьма трудных условиях. Сгорание топлива происходит в малом объеме при высоких значениях температуры и давления.

Внутренние стенки камеры сгорания омываются газами, температура которых значительно превышает температуру плавления материала стенки. Поэтому стенки интенсивно охлаждаются. Кроме того, стенки камеры ЖРД испытывают высокое давление газов.

Большинство узлов камеры ЖРД, состоящих из разнородных материалов, которые соединяются сваркой. Наружная рубашка средней части в большинстве случаев выполняется из коррозионностойкой жаропрочной стали, внутренняя рубашка - из сплавов на медной основе. Данные узлы свариваются между собой как дуговой сваркой в защитных газах, так и электронно-лучевой сваркой.

Рубашка секции камеры сгорания ракетного двигателя изготавливается из листовых материалов типа сталей аустенитного класса. Она может быть изготовлена целой (без сварных швов) по всей высоте стенки или из колец, сваренных между собой по диаметру, что определяется при расчете прочностных характеристик камеры сгорания ЖРД с условием минимального веса изделия [57].

1.5 Металлургическое качество свариваемых материалов

Исходной продукцией для изготовления основных деталей камер сгорания - оболочек, секций, головки - являются стальные поковки, штамповки и листы, а также листы и цельнокатаные кольца из жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Металлургическое качество используемых сталей должно удовлетворять потребностям эксплуатации и технологического процесса сборки камер сгорания в соответствии с предъявляемыми к ним техническими требованиями, а также должно обеспечивать заданные свойств, регламентированные условиями эксплуатации изделия.

По общепринятой классификации сталей и сплавов при определении их качества основным показателем является предельно допустимое количество вредных примесей фосфора и серы (табл. 1) [58].

Таблица 1 - Классификация качества сталей по содержанию примесей (не более)

Категория качества	P, %	S, %
Обыкновенного качества	0,040	0,050
Качественная	0,035	0,035
Высококачественная	0,025	0,025
Особовысококачественная	0,025	0,015

На качество сварных швов большое влияние оказывает содержание серы и фосфора, так как при их испарении в процессе сварки образуются поры, минимальное их количество при суммарном содержании составляет не более 0,040%.

Под качеством сталей и сплавов определяют свойства, характеризующиеся металлургическим процессом при ее изготовлении [59].

Определение понятия металлургического качества материала менялось на протяжении XX в. вместе с областями использования сталей и сплавов.

1.5.1 Природа образования примесей и их влияние на качество сталей и сплавов

Основным параметром, определяющим качество сталей и сплавов является содержание вредных примесей (фосфор, сера) [60, 63]. Влияние этих примесей на свойства и характеристики материала зависит от количества, их размера и формы и распределения по материалу. Вредные примеси формируются в процессе выплавки, кристаллизации и последующей термической обработки. По химическому составу вредные примеси делятся на оксиды, сульфиды и нитриды. Чаще всего в сталях встречаются оксиды. Большая часть оксидов является продуктами реакции снижения содержания кислорода в стали, так же они могут быть образованы в процессе выплавки.

Вредные примеси более хрупкие чем металлические элементы и имеют меньшую когезию с материалом, поэтому эти примеси являются источниками образования дефектов (трещин и т.д.) [62, 63]. Характер разрушения зависит от величины и месторасположения примесей.

Примеси величиной до 100 мкм являются основными источниками развития дефекта. Примеси величиной в несколько мкм являются источником образования вязкого излома. Примеси типа нитридов и карбидов расположены по границам

зерен, которые определяют предрасположенность сталей и сплавов к хрупкому межзеренному разрушению.

1.5.2 Влияние примесей на качество материала

Качество стали и сплава характеризуется величиной и количеством вредных примесей. Повышение качества материала путем снижения вредных примесей уменьшает вероятность образования трещин.

Согласно теории Н.Т. Гудцова примеси делят на три типа: постоянные, случайные, вредные [57].

Случайные примеси, это примеси попавшие в сталь или сплав из исходных материалов. К этим примесям относятся хром, никель, медь, молибден, вольфрам, алюминий, титан, если они принудительно не вводятся в материал при выплавке.

К вредным примесям относится сера, фосфор, мышьяк, сурьма, а также азот, водород и кислород. Они находятся в материале в разных фазах, из-за чего влияние на свойства материала этих примесей неоднозначно.

Сера нерастворима в железе. Из-за чего данная примесь в материале находится в виде сульфидов марганца и железа.

Сульфиды марганца относятся к пластичным неметаллическим включениям. При горячей прокатке сульфиды марганца вытягиваются в линию протяженной длины до 100 мкм. Сульфиды являются источником возникновения анизотропии, существенно уменьшают пластичность, предел прочности и вязкость материала.

Фосфор в сталях и сплавах находится в виде твердого раствора феррита и упрочняет его. При содержании фосфора до 0,0004% снижается прочность материала. Так же, его завышенное содержание влияет на хладноломкость и хрупкость материала. Повышение содержания фосфора на 0,01% увеличивает температуру хладноломкости до 40 %. На хладноломкость материала большее влияние имеет количественное содержание фосфора, а не серы. Влияние фосфора

на качество материала увеличивается по мере возрастания величины зерна и количества содержания углерода. При постоянном количестве фосфора в материале относительное содержание его на межзеренной границе возрастает с увеличением величины зерна, что ведет к усилению охрупчивающего эффекта фосфора. Для снижения действия фосфора в материал добавляют молибден и церий. Молибден с фосфором образует слабоподвижные пары ионов, которые препятствуют разделению зерен. При взаимодействии фосфора с церием образуется нерастворимый фосфид.

Со снижением вредных примесей (сера, фосфор и др.) у стали повышается предел прочности: при пределе прочности ~ 1700 МПа суммарное содержание вредных примесей не превышает 0,015%, при пределе прочности до 2300 МПа - не более 0,005% [66].

1.5.3 Зависимость качества материала от содержания газов

В сталях и сплавах после выплавки постоянно присутствуют вредные примеси в виде газов (азот, водород, кислород) [61, 64]. Эти примеси в материале находятся как в твердом растворе, так и в виде нитридов, оксидов и т.д. Азот, кислород и водород образуют с α -железом твердый раствор с различной растворимостью в зависимости от температуры. В действительности содержание газов в материале в большинстве случаев меньше максимального. При выполнении старения газовые примеси скапливаются в пограничных слоях. При завершении вторичных превращений по границам зерна выделяются нитриды и оксиды. Эти процессы ведут к разрушению по границам зерен, охрупчиванию материала, снижают ударную вязкость и повышают температуру хладноломкости. Охрупчивание материала линейно зависит от количества кислорода, водорода и азота в твердом растворе.

Если содержание азота выше допустимой предельной растворимости он образует твердые частицы нитридов алюминия, ниобия или карбонитридов. Чаше

всего повышение вязкости, при возникновении нитридов и карбидов, связано с уменьшением балла зерна [66].

Водород, растворенный в материале, не оказывает влияния на предел прочности, ударную вязкость, предел текучести, но снижает пластические свойства. Влияние водорода на пластические свойства является временным процессом и по истечении определенного периода происходит выделение водорода и пластические свойства в материале восстанавливаются.

Содержание водорода проявляется при всех разрушениях. Водород увеличивает разрушение по границам зерен, которое вызвано частицами сульфида марганца или распадом фосфора. Сульфид марганца является источником процесса нейтрализации зарядов водорода $2H \rightarrow H_2$. По границам частиц сульфида марганца из скоплений атомов водорода появляются заполненные им поры. Давление атомов водорода способствует разрушению по границам зерен [66].

В материал водород попадает при плавке, легировании и раскислении. Для снижения количества водорода в материале применяют следующие методы плавки:

- электрошлаковый переплав,
- вакуумно-дуговой переплав,
- электронно-лучевая плавка,
- вакуумирование и продувка аргоном.

Водород также может попасть в материал при последующей термообработке:

- цементация в водородосодержащей среде,
- травление в кислоте,
- гальваническая обработка,
- замочка после нагрева (до 200 °С) в воде.

Кислород является активным элементом при плавке сталей и сплавов. В материале кислород содержится в виде газа, растворенного в материале и в виде

неметаллических частиц. Для снижения отрицательного влияния используют методы плавки в вакууме и обработку синтетическим шлаком.

1.5.4 Зависимость качества материала от величины зерна

Самый распространённый и широко используемый способ контроля качества сталей и сплавов является измерение величины зерна [65, 66]. Данный способ эффективный как при контроле металлов, так и при любом состоянии структуры. Распространённость способа в том, что уменьшение величины зерна позволит повысить прочностные свойства (предел прочности, ударная вязкость) и энергетические свойства. Механические свойства и величина зерна зависит от состава материала, его структуры, так и способа выплавки и термической обработки.

Для получения мелкозернистой стали в нее добавляют карбидообразующие элементы (титан, ванадий, цирконий, ниобий, вольфрам, молибден) и элементы, образующие в стали мелкодисперсные частицы сульфидов и оксидов. Алюминий хорошо измельчает зерно при содержании его в материале до 0,03%.

В случае, если содержание алюминия более 0,03%, это приведет к росту зерна [60]. Алюминий уменьшает балл зерна в большем случае у сталей, в которых завышено содержание азота и возможно образование дисперсных нитридов. Вводят алюминий в материал при минимальном содержании кислорода, в случае завышенного его содержания алюминий образует оксиды.

1.6 Дефекты сварных соединений

Надежность сварных соединений в процессе эксплуатации изделия зависит от соответствия их нормативно - технической документации, в которой

регламентируются форма и конструктивные размеры сварных соединений, показатели предела прочности, пластичности, коррозионной стойкости.

Дефекты в сварных соединениях можно разделить на четыре группы: по их местонахождению, форме, размеру, количеству и концентрации [67].

По местонахождению дефекты делятся на поверхностные, внутренние и сквозные. По форме дефекты бывают локальные и вытянутые, плоские и объемные, острые (с надрезом) и округлые (без надреза). По размеру подразделяются на маленькие, средней величины и укрупненные. По количественному содержанию – единичного характера и групповые (скопление, цепочка).

К поверхностным дефектам относится нарушение формы, размера и внешнего вида сварного шва: неравномерность по ширине шва, неравномерная высота лицевого валика сварного шва, подрез, наплыв, прожог с корневой части шва, не заваренные кратеры и свищи.

Внутренние дефекты при сварке образуются в связи с металлургическими, термическими и гидродинамическими особенностями, протекающими при кристаллизации жидкого металла сварного шва. К ним относятся горячие и холодные трещины, несплавления шва, поры и шлаковые включения.

Непроваром является участок сварного шва, в котором отсутствует сплавление между кромками свариваемого изделия. Непровар сокращает площадь сварного соединения, что приводит к значительному понижению прочности сварного шва. Он является концентратор напряжений и может привести к появлению трещин, снизить коррозионную стойкость шва, что приведет к коррозионному растрескиванию. Непровар относится к наиболее опасным дефектам.

Причина появления непровара это заниженный параметр тока сварки, высокая скорость перемещения электронного луча, смещение свариваемых кромок от оси пучка электронов и перекосы свариваемых кромок.

К пористости относятся пустоты в сварном шве. Чаще всего пора имеет округлую (сферическую) или близкую к ней форму. Пористость образуется в

расплавленном металле шва за счет интенсивного газообразования. При сварке часть газовых пустот всплывает на поверхность шва, а часть – остается в закристаллизовавшейся ванне. Величина данных пор в диаметре составляет от десятка микронов до 3 мм. Помимо одиночных пор, в сварном шве могут образовываться цепочки пор или отдельные скопления, которые равномерно распределены по длине сварного шва. Наиболее опасными по расположению являются поры, которые находятся в околошовной зоне.

Причины образования пор:

1. наличие газа в металле после выплавки, которые не успевают полностью всплыть на поверхность при кристаллизации металла;
2. вступление в реакцию углерода с закисью железа, в результате чего выделяется окись углерода и углекислый газ;
3. присутствие влаги на свариваемых кромках;
4. наличие “грязи” на свариваемых кромках.

К трещинам относятся дефекты, которые представляют собой разрушения по границам кристаллам, образующие полости с малым раскрытием. В процессе эксплуатации изделия, под действием остаточных и рабочих напряжений, трещины могут прогрессировать с высокой скоростью. Вызванное ими хрупкое разрушение происходит почти мгновенно и очень опасно.

Причины образования трещин:

1. усадочные напряжения после сварки, превышающие предел прочности металла;
2. некачественная сборка под сварку;
3. напряжения в структуре материала, например, образование мартенсита;
4. завышенное содержание углерода, серы и фосфора в металле;
5. дефекты в шве (пора, шлаковое включение и т.д.), вызывающие концентрацию напряжений в сварном шве;
6. большое количество швов сосредоточенных на малом участке изделия, вызывающие повышенные местные напряжения (концентрация напряжений).

К шлаковым включениям относятся газовые полости в сечении сварного шва, которые не успевают выйти на наружную поверхность шва. В большинстве случаев причиной образования шлаковых включений является высокая скорость ведения сварки, некачественная подготовка кромок под сварку. Шлаковые включения могут быть различной формы, в том числе с острыми кромками, из-за чего их наличие является наиболее опасным, чем наличие пор.

К прожогу относятся дефекты сварного шва, характеризующие вытеканием жидкого металла со стороны внутренних кромок и образованию сквозной полости.

Причины образования прожога:

1. завышенная сила тока луча;
2. малая скорость сварки;
3. большой зазор между свариваемыми кромками.

К подрезу относятся дефекты сварного шва, в виде уменьшенной толщины на границе перехода сварного валика сварного соединения к основному материалу и имеющей вид канавок. Подрез является наиболее часто встречающимся поверхностным дефектом и образуется из-за неправильно подобранного тока фокусирующей линзы и завышенной скорости сварки.

Качество исходного материала (наличие вредных примесей) и вспомогательного материала (сварочная проволока), используемой на прихватки, имеют непосредственное влияние на качество сварного шва [68, 69].

Наиболее частая причина появления дефектов, в том числе и на сварных соединениях, в камере сгорания это локальный перегрев, который приводит к короблению, прогару изделия и образованию трещин. Также, трещины часто выявляются в районе технологических отверстий в зоне сварного шва и в местах других концентраторов напряжений.

Трещины могут проявиться в месте большого коробления стенок, вызванных завышенными температурами. Термоусталость также может послужить причиной образования трещин. Концентраторы напряжений,

возникающие по причине отступления от технологии изготовления узла, способствуют появлению трещин. Например, на острых кромках в отверстиях и на кромках изделий, имеющих нахлесточные сварные соединения. Распространенной причиной перегрева является местное обогащение топливной смеси вследствие нарушений смесеобразования. Катализатором появления трещины в этом случае является понижение предела выносливости материала при повышенных температурах эксплуатации изделия [70, 71].

Труба жаровая, детали фронтального устройства, газосборник и форсунки подачи топливной смеси омывают газы, которые имеют высокую температуру и содержат углекислый газ, пары воды, соединения ванадия, сернистый ангидрид и другие элементы, агрессивно действующие на материал. Это тоже может послужить причиной образования дефектов, например разрушения стенок. Данные дефекты предупреждаются на стадии проектирования изделия путем выбора жаростойкого материала с требуемыми свойствами для каждого узла изделия.

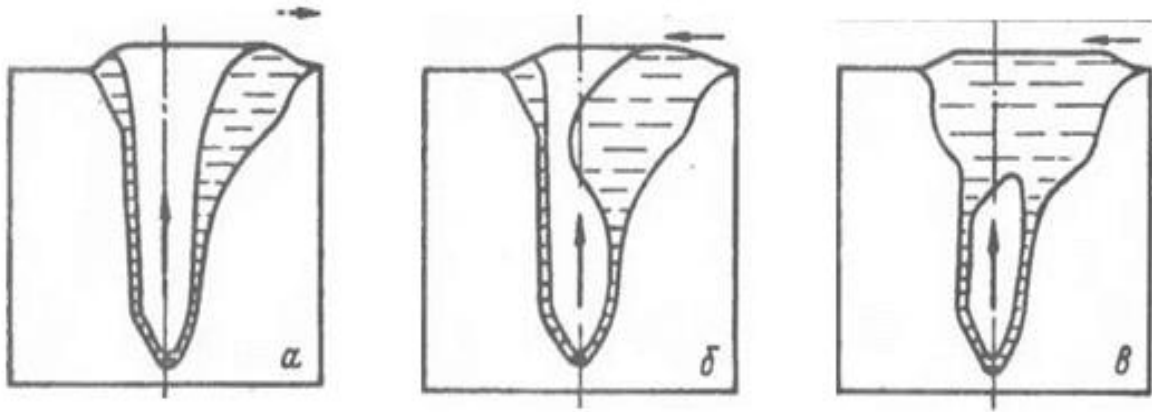
1.7 Характерные дефекты в сварных соединениях, полученные ЭЛС

При выполнении сварки с несквозным проплавлением могут возникать дефекты, такие как: пустота шириной до 1 мм и длиной до 5 мм, непровар корня шва. Давление пара в канале определяется по формуле (1), оно прямо пропорционально удельной мощности луча. В зависимости от заданной удельной мощности можно получить различную глубину провара: чем ниже скорость сварки, тем больше величина проплава. При правильно выбранной удельной мощности и скорости сварки давление в паровом канале отвечает требованию

$$P > (P_G + P_\sigma) = \rho gH + \sigma/r, \quad (1)$$

где P - давление пара в канале; P_G - давление, обусловленное массой жидкого металла; P_σ - давление, обусловленное поверхностным натяжением жидкого металла; ρ - плотность; g - ускорение силы тяжести; H - глубина канала.

При уменьшении скорости сварки и постоянной мощности q глубина канала увеличивается. На выходе из парового канала требование (1) может не выполняться, что приводит к захлопыванию канала расплавленным металлом и образуются газовые полости (рис. 1.5) [72].



а - канал свободен от жидкости; б - отражение волны жидкого металла от хвостовой части ванны; в - захлопывание канала.
Стрелками указано направление движения жидкого металла.

Рисунок 1.5 - Схема поведения канала при ЭЛС

Появление корневых дефектов - периодических несплавлений корня шва, амплитуда которых, например, при сварке нержавеющей стали на глубину 20 - 22 мм при мощности электронного луча $q = 5$ кВт и $U = 20 \div 24$ кВ, достигает 3 - 4 мм, объясняют периодическими колебаниями жидкого металла в сварочной ванне и связанным с этими колебаниями периодическим перемыканием (захлопыванием) канала [73].

К специфическим дефектам ЭЛС следует также отнести смещение оси луча от свариваемых кромок из-за воздействия магнитных полей при сварке стали с наличием остаточной намагниченности. Для устранения данного дефекта выполняют размагничивание свариваемого изделия. В большом количестве работ описаны методы устранения дефектов и сводятся они чаще всего к снижению их количества в сварном шве и обеспечивают отсутствие дефектов в широких диапазонах режимов сварки [74, 75].

В зависимости от требований конструкторской документации сварные соединения необходимо выполнять как с технологическим подкладным кольцом,

так и на весу (без подкладного кольца). Для предупреждения образования дефектов в корне шва при ЭЛС применяют съемное подкладное кольцо, что позволяет удалять дефекты механическим способом. Но данная технология увеличивает трудоемкость и время изготовления, к тому же, не во всех случаях конструктивно возможно применять подкладные кольца. При свободном формировании корня шва исключается вероятность образования корневых дефектов, но в этом случае появляется опасность вытекания расплавленного металла со стороны корня шва и образуется вогнутость с лицевой стороны.

Решить проблему вытекания расплавленного материала со стороны корня шва можно за счет повышения скорости сварки или при помощи уменьшения ширины шва за счет круговой или линейной развертки луча. Продольная развертка не всегда может быть применена на электронно-лучевых установках, особенно когда необходимо сварить кольцевые швы, из-за чего повышение стабильности формирования корня шва за счет подбора скорости сварки более технологично. Но, повышение скорости не всегда приемлемо, так как при этом возрастают напряжения после сварки и требуются более мощные источники питания электронно-лучевой пушки [76, 77].

1.8 Методы контроля сварных соединений

По завершении сварочных работ, швы подвергаются контролю с целью выявления и устранения дефектов, если таковые имеются. Визуально при помощи увеличительной лупы 4X контролируются поверхностные дефекты, такие как наружные трещины и поры, непровары корня шва, подрезы, превышающие допустимую величину и т.д. Большая часть дефектов скрыта в глубине сварного шва и может иметь настолько маленькие размеры, что выявить их можно только с использованием специальных приборов и методов.

Под контролем качества сварки подразумевают проверку условий и порядок выполнения сварочных работ, а также определение качества полученных сварных соединений в соответствии с техническими требованиями [78, 79].

На практике применяется множество методов контроля сварных соединений, которые отличаются по принципу действия, способности к выявлению различных видов дефектов и техническому оснащению.

При серийном сварочном производстве ракетной и авиационной техники применяются следующие виды контроля:

1. входной контроль материала перед запуском в производство (предупредительный);
2. межоперационный;
3. окончательный контроль узла и готового изделия (выходной).

Основная задача входного контроля – уменьшить вероятность возникновения дефектов после выполнения сварочных работ из-за некачественного материала (завышенное количество вредных примесей, несоответствие по механическим свойствам), а также контроль документации, качество вспомогательных материалов, квалификации сварщиков и т. д.

Межоперационный контроль производится в процессе сборочно-сварочных работ. Он включает в себя контроль сопроводительной документации, визуальный контроль узла перед сваркой, последующий визуальный и неразрушающий контроль после сварки для выявления поверхностных и внутренних дефектов.

Окончательный контроль узла выполняется на конечной операции изготовления изделия и включает в себя визуальный, контроль на герметичность, рентгенографический контроль и испытание на прочность (пневмо- или гидроиспытание). На данном этапе осуществляется контроль для выявления поверхностных и внутренних дефектов сварки.

Методы контроля качества сварных соединений, в зависимости от характера воздействия на исследуемый материал, могут быть разделены на две основные группы: неразрушающий метод контроля, который заключается в исследовании

без разрушения образцов и разрушающие методы контроля, при проведении которых происходит разрушение образцов путем механического воздействия [80].

Методы контроля, объединенные общими физическими характеристиками, составляют вид контроля. Виды неразрушающего контроля систематизируются по следующим основным признакам:

1. по характеру физического поля или излучения, которые взаимодействуют с исследуемым объектом;
2. по характеру взаимодействия физического поля или вещества с исследуемым объектом;
3. по первичным информативным параметрам, используемых методов контроля;
4. по способу индикации первичной информации;
5. по способу описания итоговой информации.

Согласно стандарту неразрушающие методы контроля подразделяются на десять типов: оптический, акустический, магнитный, капиллярный, тепловой, радиационный (рентгенографический контроль), радиоволновый, проверка на герметичность течеисканием, электрический и электромагнитный метод контроля вихревыми токами. Широко на практике применяются следующие методы контроля: акустический, капиллярный, магнитный, рентгенографический контроль и течеискание.

К неразрушающим методам контроля относится контроль внешним осмотром при помощи увеличительной оптики и обмер, который имеет большое значение при получении качественных сварных изделий [81].

Наиболее перспективным методом проверки механических свойств является безобразцовый метод контроля, который может быть применен, в том числе и для сварных швов, полученных ЭЛС. Данный метод позволяет оперативно выявлять распределение механических свойств в различных зонах сварного соединения без вырезки образцов. Но данный метод контроля пока не нашел широкого применения при производстве ракетной и авиационной техники [82].

1.8.1 Разрушающие методы контроля сварных швов

Разрушающие испытания проводятся на образцах-свидетелях, моделях и на самих изделиях для получения данных, которые характеризуют прочность, качество или надежность неразъемного соединения. К ним относятся металлографическое исследование, механические испытания, химический анализ и специальные испытания. Данные методы применяются при разработке технологии изготовления узлов ракетной и авиационной техники, а также для выборочного контроля готовой продукции (периодический контроль).

Механические испытания включают в себя статическое испытание различных участков сварного шва на растяжение, изгиб, твердость, динамическое испытание на ударный изгиб и усталостную прочность.

Металлографическое исследование (МГИ) проводят для установления структуры металла сварного шва и наличия дефектов в нем. При макроструктурном контроле определяют характер и наличие видимых дефектов при использовании увеличительных приборов до 30X в различных зонах сварного соединений, путем изучения макрошлифов и изломов.

При анализе микроструктуры исследуют структуру металла на полированных и протравленных реактивами шлифах при увеличении до 2000X. Данные исследования позволяют выявить пережог металла, наличие окислов по границе зерна, сульфидных и оксидных включений, величины зерна, микротрещины и другие дефекты структуры.

Химический анализ позволяет установить состав сварного шва и основного металла, их соответствие техническим условиям на получение сварного соединения [83].

Специальные испытания проводят для получения характеристик сварных соединений, которые учитывают условия эксплуатации изделия (коррозионная стойкость, ползучесть металла при воздействии высоких температур и др.).

1.8.2 Неразрушающие методы контроля сварных швов

При неразрушающем методе контроля производят исследования оценку физических свойств, которые косвенно характеризуют прочность и надежность сварного шва. Неразрушающие методы, которыми контролируются более 90 % сварных соединений, применяют, как правило, после изготовления узла для выявления в нем дефектов. К неразрушающим методам контроля качества сварных соединений относятся: внешний осмотр, рентгенографический, ультразвуковой и магнитный контроль, контроль на герметичность и ряд других методов, имеющих ограниченное применение [84, 85].

Внешнему осмотру подвергается 100 % сварных соединений, при котором используют шаблоны и мерительный инструмент. При этом контролируют геометрические размеры шва, наличие подрезов и их величину, трещины, непроваров, наличие кратеров и другие наружные дефекты.

Задачи для экспериментальных исследований:

В результате литературного обзора установлено, что при получении сварных соединений металлов камерами сгорания с использованием электронно-лучевой сварки, велика вероятность получения дефектов.

При производстве камер сгорания АД и ЖРД в АО «Металлист-Самара» возникают дефекты, перечисленные выше, которые необходимо дорабатывать, что удорожает стоимость изготовления готовой продукции.

Необходимо провести материаловедческий анализ качества сварных швов жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов на никелевой основе, полученных методом ЭЛС, выявить причины образования дефектов, установить режимы ЭЛС для получения бездефектных сварных швов.

Таким образом, целью данной работы является повышение качества формирования сварных соединений из коррозионностойких сплавов, жаропрочных сплавов и хромоникелевых аустенитных сталей при ЭЛС, выполненных как с технологическим подкладным кольцом, так и со свободным

формированием швов путем материаловедческого анализа сварных швов и научно обоснованного выбора параметров режима сварки.

Для достижения поставленной цели в 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.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

2.1 Материалы для исследования

В настоящий момент сортамент материалов, используемых при изготовлении камер сгорания, достаточно широк. В данной работе исследуются материалы, получившие наиболее широкое применение в производстве камер сгорания.

Наибольшее распространение получили хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т, жаропрочная коррозионностойкая сталь 06Х15Н6МВФБ-Ш, сплавы на никелевой основе ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67МВТЮ-ВД [86, 87].

Материал свариваемых образцов:

- прокат листовой 12Х18Н10Т поставляется по ТУ 14-1-1150-74.

Химический состав стали должен соответствовать ГОСТ 5632-72 и приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Химический состав стали 12Х18Н10Т-ВД

Массовая доля, %								
Cr	Ni	Fe	Ti	Mn	Si	C	S	P
				Не более				
17-19	9-11	остальное	0,8	2,0	0,8	0,12	0,020	0,035

Механические свойства листов в состоянии поставки должны соответствовать нормам таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Механические свойства стали 12Х18Н10Т-ВД

Временное сопротивление σ_B , МПа (кгс/мм ²)	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ_5 , %
530 (53)	235 (24)	38

Теплофизические свойства (коэффициент линейного термического расширения) при различных температурах представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т-ВД

Температура, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700	20-800
$\alpha \times 10^{-6}$ 1/град	16,7	17,0	17,4	17,8	18,2	18,6	19,1	19,4

- сталь 06Х15Н6МВФБ-Ш, поставляется по ТУ 14-1-2903-80,

Химический состав стали соответствует ГОСТ 5632-72 и приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Химический состав стали 06Х15Н6МВФБ-Ш

Массовая доля, %							
Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P
13,5-15	5,5-6	0,35-0,6	≤0,4	≤0,4	≤0,06	≤0,015	≤0,025

Механические свойства листов в состоянии поставки должны соответствовать нормам таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Механические свойства стали 06Х15Н6МВФБ-Ш

Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
Не менее		
960÷980	720÷740	16,0÷17,5

Теплофизические свойства (коэффициент линейного термического расширения) при различных температурах представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Коэффициент линейного расширения стали 06Х15Н6МВФБ-Ш

Температура, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500
$\alpha \times 10^{-6}$ 1/град	11,3	11,5	11,6	11,8	12,1

- сплав ХН45МВТЮБР-ИД, поставляемый по ТУ 14-1-3905-85,

Материал свариваемого образца-имитатора – сплав ХН45МВТЮБР-ИД. Основные структурные составляющие данного сплава – твердый раствор +

интерметаллидные соединения типа $(Ni, Me)_3 (Al, Me)$ – γ' -фаза + карбиды типа Me_2C_6 , карбиды титана – TiC , нитриды титана – TiN [88]. Химический состав сплава соответствует ГОСТ 5632-72 и приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Химический состав сплава ХН45МВТЮБР-ИД

Массовая доля, %										
Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	C	S	P	W	Mn
14-16	43-47	4,0-5,0	0,9-1,4	1,9-2,4	2,5-3,5	≤0,1	0,01	0,015	2,5-3,5	0,6

Механические свойства листов сплава ХН45МВТЮБР-ИД в состоянии поставки приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Механические свойства сплава ХН45МВТЮБР-ИД

Твердость, НВ	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
	Не менее		
320-355	<1000,0	700,0	30,0

Теплофизические свойства (коэффициент линейного термического расширения) при различных температурах представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Коэффициент линейного расширения сплава ХН45МВТЮБР-ИД

Температура, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700	20-800
$\alpha \times 10^{-6}$ 1/град	12,8	13,2	13,6	14,0	14,3	14,5	14,9	15,7

- сплав ХН67МВТЮ-ВД, поставляемый по ТУ 14-1-588-73.

Химический состав сплава соответствует ГОСТ 5632-72 и приведен в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Химический состав сплава ХН67МВТЮ-ВД

Массовая доля, %										
Cr	Ni	Mo	Al	Ti	W	C	S	P	Si	Mn
17,0-20,0	60,5-68,8	4,0-5,0	1,0-1,5	2,2-2,8	4,0-5,0	≤0,08	≤0,01	≤0,015	≤0,01	≤0,5

Механические свойства листов в состоянии поставки приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Механические свойства сплава ХН67МВТЮ-ВД

Твердость, НВ	Временное сопротивление σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
	Не менее		
240-340	930,0	550,0	15,0-18,0

Теплофизические свойства (коэффициент линейного термического расширения) при различных температурах представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Коэффициент линейного расширения сплава ХН67МВТЮ-ВД

Температура, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700	20-800
$\alpha \times 10^{-6}$ 1/град	12,0	12,3	13,5	13,6	13,6	14,4	14,8	15,2

Характеристики и свойства сталей и сплавов, исследуемых в данной работе, в том числе и свариваемость данных материалов, указаны в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Характеристики свариваемых материалов

№	Материал	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м ³	S,%	P,%	Класс материала
1.	12Х18Н10Т-ВД	1460	7920	0,020	0,035	качественная
2.	06Х15Н6МВФБ-Ш	1480	7820	0,015	0,025	высококачественная
3.	ХН45МВТЮБР-ИД	1400	8290	0,01	0,015	особовысококачественная
4.	ХН67ВМТЮ-ВД	1460	8250	$\leq 0,01$	$\leq 0,015$	особовысококачественная

Из таблицы 2.13 видно, что исследуемые стали и сплавы являются высококачественными, так как суммарное содержание серы и фосфора не превышает 0,045%. Однако, сплавы ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД являются ограниченно свариваемыми [89].

Сталь 12Х18Н10Т-ВД является качественной, в ней суммарное содержание серы и фосфора составляет 0,055%. Однако, она хорошо сваривается [43].

Размеры образцов (100 × 200 мм – толщиной от 1,5 мм до 9 мм) были выбраны, исходя из необходимости создания достаточной жесткости и максимального приближения условий сварки к натурным узлам.

Все экспериментальные исследования проводились на образцах и имитаторах сборочных единиц, а проверка полученных результатов на натуральных узлах.

Образцы, для устранения остаточной намагниченности, подвергали дополнительному размагничиванию, и они поступали на сварку с уровнем намагниченности не более 300 мкТл. Контроль намагниченности производился микротеслометром МФ-24ФМ.

2.2. Материаловедческие методы исследования

2.2.1 Металлографическое исследование качества сварных швов

Такие исследования производятся путем визуального осмотра поперечного сечения шлифа, вырезанного с образцов-имитаторов. Исследуемая поверхность включает в себя сечение шва с зоной термического влияния и участком основного материала.

Макроисследование проводилось визуально и при увеличении до 30 раз (а как фотографирование). Макроструктурным анализом выявляли строение и геометрические параметры неразъемного соединения, глубину провара, величину зерна и размер околошовной зоны, наличие в соединении непроваров, трещин, пор, шлаковых включений, химической неоднородности и т. п.

Результаты исследования на оптическом микроскопе микро- и макроструктуры совместно с измерениями микротвердости дают объективные результаты о количественном составе элементов и качестве сварного соединения и об корректировке режимов для повышения качества шва, которые нужно ввести в технологию сварки [90].

При исследовании макроструктуры металла можно сделать следующие выводы:

- характер кристаллизации, величину и направление роста зерен;

- степень развития межкристаллитной и зональной неоднородности (ликвацию металла);
- наличие газовой пористости в металле, шлаковых включений, окисных пленок значительной величины и усадочных трещин;
- изменение структуры в направлении волокон, характер и режим термической обработки (по характеру излома материала в зоне сварного шва).

Микроструктурный анализ позволяет определить:

- структуру наплавленного металла и основного материала;
- зону термического влияния, приблизительно содержание углерода в наплавленном металле;
- перегрев и пережог, выгорание отдельных элементов;
- микротрещины, микропоры, шлаковые включения и т. п. [79].

Микроструктура поперечного шлифа зоны ЭЛС позволяет установить:

- наличие в материале неметаллических включений и микропор;
- величину балла зерна;
- степень закалки и величину отпуска;
- микронеоднородность сталей и сплавов (полосчатость);
- глубину цементации или диффузионное насыщение поверхностного слоя материала другими способами;
- наличие углерода в поверхностном слое, характер и глубину обезуглероживания;
- качество и режим горячей обработки;
- величину зерна в результате обработки холодном;
- особенности строения микрозерен;
- межкристаллитную коррозию.

Металлографические методы выявления и определения величины зерна сталей и сплавов установлены ГОСТ 5639-82 [91]. При помощи данного метода определяли: размер фактического зерна, предрасположенность зерна к росту и динамику роста зерна.

По ГОСТ 8233-56 [92] определяли шкалы основных элементов структуры исследуемых материалов: перлит, мартенсит, нитриды и карбиды. С каждого участка образца-имитатора вырезалось по одному шлифу. На исследование образцы изготавливали площадью поперечного сечения 1 - 2 см². Исследование микроструктуры образцов выполняли на оптическом микроскопе при увеличениях до 1000X.

По ГОСТ 1778-84 [93] выявляли наличие загрязнений в виде неметаллических включений в сталях и сплавах путем металлографического исследования. Для определения количества неметаллических включений, их объемного процента производится сравнение эталонными шкалами, путем линейного подсчета включений.

Для проведения анализа поверхность образцов полировали вручную на абразивных кругах с различной зернистостью. Финишная полировка макрошлифа осуществлялась наждачной бумагой марки К-3 зернистостью Р280. В зависимости от материала сварного соединения и особенности проявления макроструктуры для травления шлифов применяли различные реактивы.

Чтобы выявить макроструктуру сварных швов жаропрочных сплавов, использовали реактив - HCl (70%)+ несколько капель H₂O₂ (перекись водорода), свежеприготовленный.

Для выявления макроструктуры сварных швов коррозионностойких сталей и сплавов использовали реактив хлорного железа (20 г на 100 г воды) или раствор соляной кислоты (10 мл на 100 мл воды). Раствор подогревали до температуры 60 °С и производили травление. Затем выполняли осветление в 10 %-ном водном растворе азотной кислоты.

Для выявления микроструктуры сварных швов при травлении шлифов использовали реактив “ВЖ” с составом, приведенным в таблице 2.14. Применяемый реактив позволяет выявить литую зону сварного шва, структуру основного материала и границы зерен. Травили путем погружения шлифа в реактив в течение 2-3 с и затем промывали проточной водой, после чего сушили. Травление производили при температуре 20 С°.

Таблица 2.14 – Состав реактива “ВЖ”

№	Компоненты	Количество, мл
1	HCl	200
2	H ₂ O	200
3	CuSO ₄	40 гр

Также, для выявления структуры сварных швов практически на всех сталях и сплавах широко используется раствор хлористого железа (200 г) и азотной кислоты (300 мл) в 100 мл воды. Шлиф травили протиранием ватным тампоном, смоченным в растворе.

Поверхность микрошлифа подготавливали более тщательно, чем в случае с макрошлифом. Окончательную полировку производили алмазной пастой или раствором окиси хрома на сукне.

Для металлографического анализа микроструктуры образцов использовалось следующее оборудование: оптический микроскоп Axio Vert A1 с анализатором микроструктуры поверхностных твердых тел Thixomet при различных увеличениях (рис. 2.1), а также электронный микроскоп JEOL-6390A (рис. 2.2). Исследованием производили с 600 - 1000 -кратным увеличением.



Рисунок 2.1 - Оптический микроскоп Axio Vert A1



Рисунок 2.2 - Электронный микроскоп JEOL-6390A

На оптическом микроскопе Axio Vert A1 получили оцифрованные изображения микроструктуры поверхности шлифов сварных швов посредством цифровой камеры, интегрированной в оптическую систему микроскопа. Полученные изображения обрабатывали в соответствии с методиками, заложенными в программном обеспечении Thixomet.

Для определения концентрации (массовых долей) элементов исследуемых сталей и сплавов использовали спектрометр ДФС-500 (рис. 2.3). В качестве источника возбуждения спектра использовали генератор СПАРК-500. Для продувки полихромата использовали аргон марки ВЧ с содержанием аргона не менее 99,998%.



Рисунок 2.3 - Спектрометр ДФС-500

Микротвёрдость измерялась на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на индентор составляла 50 г. Измерения микротвёрдости проводились в поперечном сечении, начиная от верхнего края образца до нижнего края, со средним шагом между «уколами» 0,2 мм по стандартной методике.

2.2.2 Измерение твёрдости сварных швов

Твёрдость металлов не является физической постоянной, а представляет собой сложное свойство, зависящее как от прочности и пластичности, так и от метода измерения.

При проведении исследований в данной работе микротвёрдость на образцах измеряли микротвердомером ПМТ-3М (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Микротвердомер ПМТ-3М

Вдавливание алмазного наконечника Виккерса производили с нагрузкой 50 гр. Управление нагрузки – ручное. Шлиф был расположен на предметном столике.

При замере микротвердости шлиф со сварным швом наблюдали в светлом поле. Измерение длины диагоналей или сторон равностороннего треугольника отпечатков производили с помощью фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2-16 (рис. 2.5). При работе с микрометром ФОМ-2-16 обработка результатов измерения производили с помощью электронно-вычислительного устройства.



Рисунок 2.5 - Фотоэлектрический окулярный микрометр ФОМ-2-16

2.2.3 Прочность и пластичность сварных швов

Прочность сварных швов проверяли на разрывной машине ИР-5047-50 (рис. 2.6) на соответствие требованиям ГОСТ1497-84 [94]. Машина ИР-5047-50 предназначена для статических испытаний на растяжение и сжатие с максимальной нагрузкой 50 кН [95, 96].



Рисунок 2.6 - Разрывная машина ИР-5047-50

Пластичность - способность материала без разрушения получать большие остаточные деформации. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций, как штамповка, вытяжка, волочение, изгиб и др. Мерой пластичности являются относительное удлинение δ и относительное сужение ψ , определяемые при проведении испытаний на растяжение. Чем больше δ , тем более пластичным считается материал. По уровню относительного сужения ψ можно делать вывод о технологичности материала.

Испытание образцов на пластичность производили на машине УММ-20 (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 - Испытательная машина УММ-20

Испытательная машина УММ-20 предназначена для статических испытаний металлических и других образцов на растяжение, сжатие, изгиб и плотный загиб [97, 98].

2.2.4 Ударная вязкость сварных швов

Для оценки свойств материала при динамических нагрузках недостаточно механических характеристик, определяемых при статических испытаниях.

В настоящее время при входном контроле образцы проходят испытания на ударный изгиб. Образцы устанавливали на двух опорах и подвергали воздействию ударной нагрузки падающего маятника. Разрушение происходит в плоскости надреза, и поэтому форма надреза и его размеры влияют на склонность материала к хрупкому разрушению. Испытания на ударный изгиб регламентированы ГОСТ 9454-78 [99].

Все испытания производили маятниковых копрах. На рис. 2.8 представлен копер МК-30. Цифра в маркировке копра показывает максимальную работу удара в кГ/м, которую может совершить копер при испытании образцов [100].



Рисунок 2.8 - Маятниковый копер для испытания на ударный изгиб МК-30

2.2.5 Неразрушающий контроль сварных швов

Ко многим изделиям в ракетно-космической и авиационной промышленности, с получением неразъемных соединений, в том числе, сваркой, предъявляется множество требований, определяющих качество шва, например проверка на герметичность. Для ее определения проводятся испытания на непроницаемость сварных швов неразрушающими методами контроля (пневматическое испытание, гидравлические испытание и проверка на керосин меловым способом).

Основной задачей данных методов является выявление сквозных дефектов, через которые жидкость или газ выходят на поверхность испытываемого сварного соединения или, напротив, проникает внутрь [101].

2.2.6 Рентгенографический контроль сварных швов

Рентгенографический контроль сварных швов производили на аппарате рентгеновском для промышленной дефектоскопии ЭКСТРАВОЛЬТ-160/Р3000. Он предназначен для проведения анализа промышленных изделий методом рентгеновской дефектоскопии в промышленных и научных лабораториях, а также в цеховых условиях [102].

В рентгеновском аппарате используется металлокерамическая рентгеновская трубка ТНХ160, производства фирмы Thales Electron Devices, Франция (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 - Рентгенографический аппарат ЭКСТРАВОЛЬТ-160/Р3000

Деталь после ЭЛС поступала на участок рентгенографического контроля. Затем, зона сварного шва, подлежащая просвечиванию, размечалась цветным карандашом. Далее, устанавливается на пластилин эталон чувствительности и маркировочные знаки. После идет установка кассеты с радиографической пленкой на контролируемый участок сварного шва. Устанавливается источник излучения (рентген трубка) в положение, перпендикулярное сварному шву. Проводится просвечивание сварного шва. Далее, удаляется с поверхности детали

пластилин, эталон чувствительности и маркировочные знаки. Проводят химико-фотографическую обработку экспонированной радиографической пленки и производят расшифровку рентгеновского снимка с отметкой недопустимых дефектов.

При расшифровке рентгенограмм сварных соединений использовали эталонные снимки характерных дефектов для аналогичных сталей и сплавов.

Анализ рентгенограмм производили на негатоскопе Н-85/220. Данный негатоскоп предназначен для расшифровки радиографических снимков. Область применения - неразрушающий контроль методом промышленной радиографии (рис. 2.10).



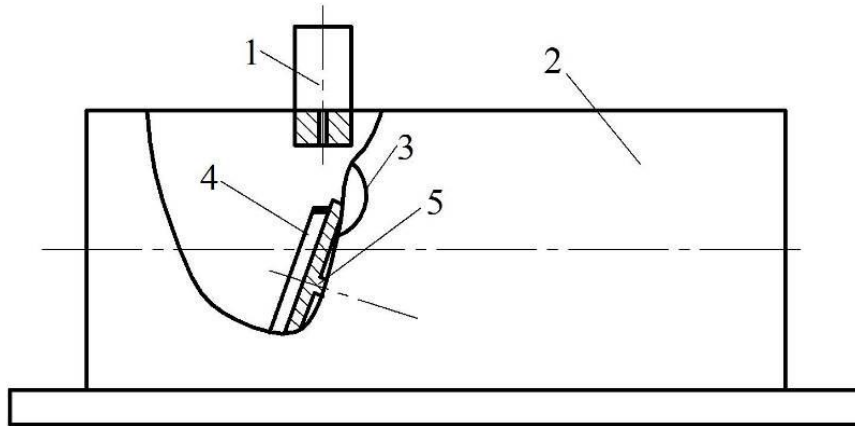
Рисунок 2.10 - Негатоскоп Н-85/220

2.2.7 Ультразвуковой контроль сварных швов

Ультразвуковой контроль производили при помощи дефектоскопа ультразвукового УД2-70. Шероховатость поверхности исследуемого образца в зоне акустического контакта с преобразователем Rz составляла не более 80 мкм. При контроле изделия датчик водится по поверхности и полученные колебания преобразуются в цифровую форму и выводятся на дисплей [103, 104].

2.3 Технология электронно-лучевой сварки

Электронно-лучевая сварка выполнялась на установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-11. Принципиальная схема электронно-лучевой установки представлена на рис. 2.11 [105, 106].



1- электронно-лучевая пушка; 2 – камера установки; 3 – смотровое окно, 4 – образец-имитатор; 5 – манипулятор.

Рисунок 2.11 - Принципиальная схема установки для электронно-лучевой сварки

Установка ЭЛУ-9Б (рис. 2.12) и установка ЭЛУ-11 (рис. 2.13) предназначены для сварки электронным лучом в вакууме (5×10^{-5} мм. рт. ст.) кольцевых швов в щелевой конструкции на изделиях, расположенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также, для сварки изделий с продольными швами. Они позволяют производить сварку цилиндрических изделий под углом наклона планшайбы относительно горизонтальной оси вверх на 90° . Установка позволяет сваривать углеродистые стали толщиной до 45 мм, титан и его сплавы до 55 мм, алюминий и его сплавы толщиной до 60 мм при скоростях сварки 0,5-40 мм/с.



Рисунок 2.12 - Общий вид установки ЭЛУ-9Б



Рисунок 2.13 - Общий вид установки ЭЛУ-11

Исполнение установок – горизонтальное. Установки комплектуются оптическими трубками наблюдения для обзора места сварки. Для получения вакуума в камере применяются форвакуумный насос для предварительной откачки и вакуумный агрегат для окончательной откачки до степени разряжения 5×10^{-5} мм рт. ст.

Принципиально, данные установки одинаковы. Различаются лишь внутренним объемом камер 4 м^3 и 39 м^3 соответственно, что позволят сваривать крупногабаритные изделия в ЭЛУ-11 [107].

Данные установки укомплектованы универсальным сварочным манипулятором, электронно-лучевой аппаратурой ЭЛТА-60.15 мощностью 15 кВт, в которую входит электронная пушка с катодом косвенного подогрева и инверторный высоковольтный источник питания [108].

Электронно-лучевая пушка (ЭЛП) с двойным преломлением электронного луча установлена снаружи рабочей вакуумной камеры. В качестве источника электронов используется катод с косвенным подогревом. Катод выполнен в виде таблетки диаметром 4.7мм из гексаборида лантана (LaB_6).

Для отсечения катодно-анодной области пушки от объема вакуумной камеры в пушке имеется вакуумный затвор. Фокусирующая линза служит для получения остросфокусированного пучка электронов. Для отклонения электронного луча применена электромагнитная отклоняющая система, обеспечивающая двойное преломление электронного луча. Такая отклоняющая система состоит из двух отклоняющих катушек с малой индуктивностью, расположенных друг над другом. В случае использования только нижней отклоняющей катушки обеспечивается отклонение на угол до 10 градусов относительно оси пушки. В случае одновременного использования двух отклоняющих катушек осуществляется параллельный перенос электронного луча на расстояние до 12 мм от оси пушки (рис. 2.14) [6, 110, 111].

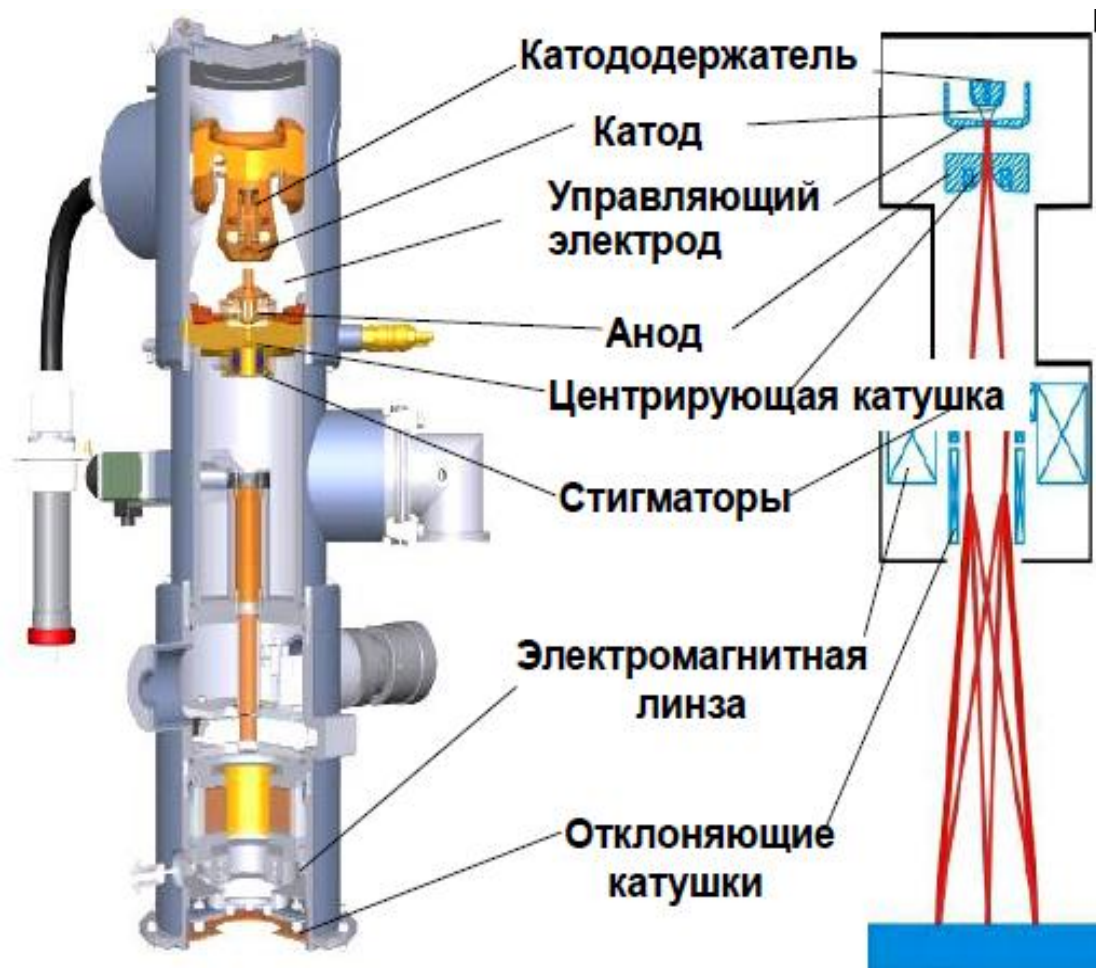


Рисунок 2.14 - Электронно-лучевая пушка

2.3.1 Влияние технологических параметров на процесс сварки

Процесс электронно-лучевой сварки осуществляется в вакууме за счет нагрева свариваемых кромок кинетической энергии потока электронов, имеющего высокую удельную мощность. Диапазон удельной мощности q_2 сфокусированного потока электронов при нагреве, плавлении и испарении составляет до $5 \cdot 10^8$ Вт/см². Сварка материалов толщиной до 3 мм выполняется с удельной мощностью пучка электронов $q \sim 10^4$ Вт/см², в данном случае испарение с поверхности сварочной ванны мало. При сварке материалов большой толщины (до 300 мм) удельная мощность пучка должна составлять до 10^6 Вт/см² [5, 109].

Параметры, контролируемые в процессе ЭЛС, являются: ток сварки I_l , ускоряющее напряжение U , ток фокусирующей линзы I_ϕ , дистанция от центра

фокусирующей линзы до поверхности свариваемых кромок изделия l и скорость сварки v [110, 112, 114].

Тепловую энергию в центре пятна нагрева определяет ускоряющее напряжение. Величина ускоряющего напряжения оказывает значительное влияние на глубину провара. При постоянной удельной мощности в пятне нагрева глубина провара возрастает с увеличением ускоряющего напряжения. Глубина провара пропорциональна корню квадратному ускоряющего напряжения.

На современных электронно-лучевых установках данный параметр является постоянной величиной, выдаваемой высоковольтным источником и в большинстве случаев составляет 30, 60 или 120 кВ [115, 116].

При сварке ускоряющее напряжение должно быть стабильным, его колебания может привести к значительному изменению величины пятна нагрева. В случае увеличения произойдет занижение лицевого валика сварного шва или прожог, а при уменьшении - велика вероятность несплавления кромок в корне шва [117].

Ток сварки имеет большое значение и от его величины зависит ширина сварного шва и глубина провара. С увеличением тока сварки возрастает ширина и глубина провара. Для повышения глубины провара при ускоряющем напряжении более 60 кВ используют метод формирования на подъем. В зависимости от толщины величину тока сварки задают от 10 мА до 1000 мА и более.

Величина скорости сварки влияет на ширину сварного шва и глубину провара, как в случае сварке в среде защитных газов. При увеличении скорости сварки и постоянной величине погонной энергии глубина проплава увеличивается, но незначительно.

Наибольшее влияние на ширину сварного шва и глубину провара оказывает значение тока фокусирующей линзы (ток фокусировки). Данный параметр задает плотность электронов в потоке, который характеризует размер шва и величину пятна нагрева. Варьирование током магнитной линзы позволяет изменять плотность энергии тепла в пятне нагрева. Это означает, что при равной величине погонной энергии можно получить сварной шов различной формы [113].

Также, на размер сварного шва и величину провара оказывают незначительное влияние параметры электронно-лучевой пушки: значение тока фокусирующей линзы, величина остаточного давления в камере (глубина вакуума); частота и характер развертки электронного луча; дистанция от фокусирующей линзы до свариваемых кромок и др. [118 - 120].

Величина остаточного давления в вакуумной камере определяет стабильность качества получения неразъемных соединений. Вакуум должен быть не ниже 10^{-4} мм. рт. ст., чтобы исключить перебои электронного луча на всем протяжении сварки. Повышение давления в рабочей камере уменьшает мощность электронного луча и его проникающую способность, которая непосредственно влияет на глубину провара. Для поддержания вакуума в процессе сварки производительность диффузионных насосов рассчитывается с расчетом повышения остаточного вакуума в рабочем пространстве камеры при сварке. Допустимая величина вакуума при проведении электронно-лучевой сварке составляет $10^{-4} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст.

Дистанция тоже имеет немаловажное значение и может составлять 50 – 100 мм для электронно-лучевых установок с низким ускоряющим напряжением (до 15 кВ) и 100 - 500 мм для высоковольтных источников с ускоряющим напряжением более 30 кВ. Колебание расстояния при сварке между изделием и пушкой до 5 мм не оказывает значительного влияния на геометрические размеры и качество швов. При сварке в импульсном режиме выделение тепла регулируется частотой и сварочными импульсами. Электронно-лучевая сварка в импульсном режиме широко применяется тогда, когда требуется минимальная зона термического влияния [121, 122].

Выводы по главе 2:

1. Произведен выбор жаропрочных, коррозионностойких сталей 12Х18Н10Т, 06Х15Н6МВФБ-Ш и жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР-ИД, ХН67МВТЮ-ВД для проведения исследования формирования, состава,

структуры и свойств сварных швов. Представлен химический состав и свариваемость выбранных материалов.

2. Изложены методы исследования неразрушающего и разрушающего контроля исходных материалов и полученных сварных швов.

3. Описано оборудование, на котором производили экспериментальные работы по электронно-лучевой сварке образцов и влияние технологических параметров на формирование сварных швов, их состав структуру и свойства.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАЯНЫХ СЕКЦИЙ ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА 12X18H10T - ВД

Хромоникелевые аустенитные стали известны давно и получили широкое применение в промышленности. Российская металлургическая промышленность ежегодно выпускает аустенитные стали сотни марок, предназначенные, в подавляющем большинстве, для изготовления сварных конструкций. Не все они одинаково хорошо свариваются. Более того, как правило, аустенитные стали по свариваемости в значительной степени уступают обычным углеродистым сталям.

Проблема сваривания аустенитных сталей - одна из наиболее сложных проблем современной сварочной науки и техники, ею на протяжении ряда лет занимаются коллективы многих научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий. Проблема сварки аустенитных сталей сложна еще и потому, что одну и ту же сталь можно использовать для изготовления конструкций разного назначения, например, хладостойких и жаропрочных. Однако сварочные материалы и технология сварки будут в каждом случае различными в зависимости от условий эксплуатации конструкции.

При сварке аустенитных сталей могут возникнуть следующие трудности:

1. необходимо обеспечить стойкость металла шва и околошовной зоны к образованию трещин при кристаллизации;
2. обеспечить коррозионную стойкость сварного соединения;
3. сохранить свойства неразъемного соединения во времени, заложенные в процессе формирования сварного шва, при действии рабочих температур и напряжений в процессе эксплуатации изделия;
4. получить плотный и однородный сварной шов.

3.1 Анализ свариваемости стали 12X18H10T - ВД

При сварке кольцевых швов обечаек на производстве столкнулись с целым рядом трудностей, основной из которых явились кристаллизационные трещины в сварном шве. Данные дефекты выявили при анализе рентгенограмм на нигатоскопе Н-85/220 при увеличении 10 крат (рис. 3.1).

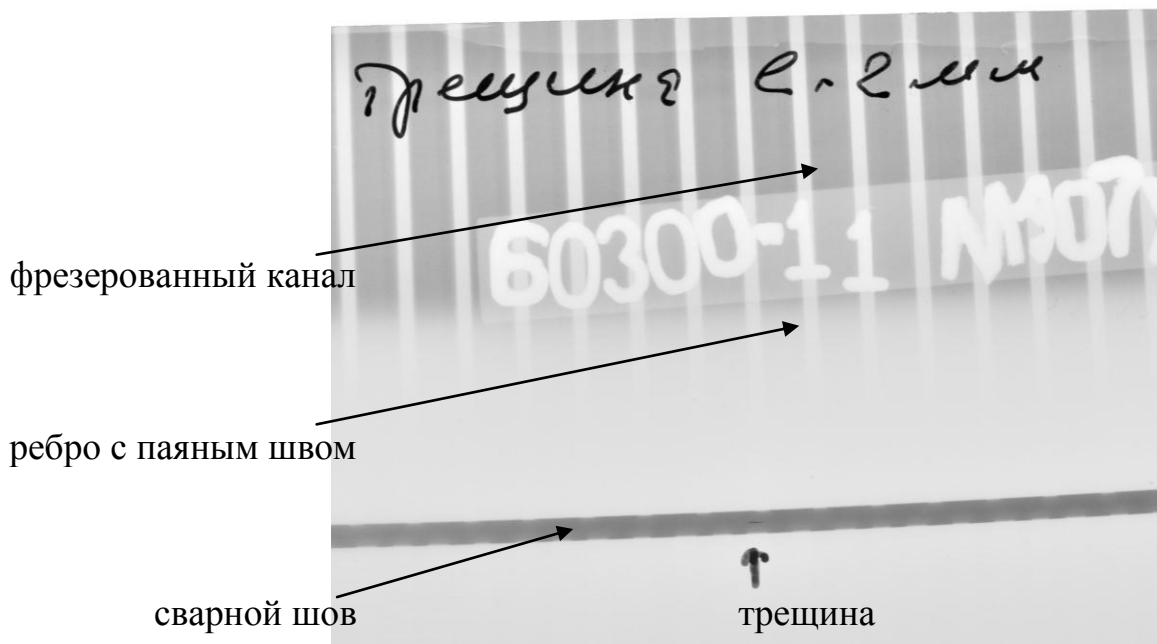


Рисунок 3.1 - Рентгенограмма сварного шва с трещинами X2

Из литературных данных [123 - 128] известно, что при сварке хромоникелевых аустенитных сталей в сварных швах довольно часто наблюдаются кристаллизационные трещины. В зависимости от расположения к оси шва трещины могут быть как продольные, так и поперечные. Продольные трещины располагаются как по оси шва по границам столбчатых кристаллов или между соседними кристаллами. Поперечные трещины чаще всего расположены между соседними кристаллами.

Трещины в подавляющем большинстве случаев, являются недопустимым дефектом, их наличие может привести к хрупкому, усталостному или коррозионному разрушению конструкции в процессе её изготовления или эксплуатации.

Механизм появления и развития трещин при кристаллизации материала можно описать следующей схемой. При кристаллизации расплавленный металл проходит через эффективный интервал кристаллизации, представляющий собой участок интервала кристаллизации от начала переплетения и срастания дендритов в жесткий каркас до температуры реального солидуса. В этом интервале металл шва находится в твердо-жидком состоянии и для него характерно резко выраженное снижение - провал пластичности по сравнению с пластичностью закристаллизовавшегося металла. Пластическая деформация в этих условиях заключается во взаимном перемещении кристаллитов, при этом они могут деформироваться. При переходе нижнего предела интервала хрупкости пластические свойства металла возрастают. Размер температурного интервала хрупкости зависит от химического состава сварного шва. Кристаллизация сварного шва протекает при действии растягивающих напряжений, которые возникают из-за неравномерного нагрева и последующего охлаждения свариваемых кромок. Наличие растягивающих напряжений приводит к упруго-пластической деформации сварного шва и интенсивность ее возрастания при понижении температуры увеличивается.

При нахождении металла шва в состоянии пониженной пластичности, величина растягивающих напряжений превзойдет его предел текучести и произойдет разделение кристаллитов, т.е. образование трещины. Если растягивающие напряжения, действующие в металле шва во время его пребывания в температурном интервале хрупкости, не превзойдут предела текучести материала, то кристаллизационные трещины не образуются.

В настоящее время нет единого мнения по вопросу о том, в каком состоянии находятся участки шва, в которых образуются трещины. По наиболее распространенному мнению кристаллизационные трещины образуются по жидким легкоплавким пленкам-прослойкам эвтектического типа, имеющим пониженную температуру затвердевания, или по маточной жидкости, расположенной по границам затвердевших столбчатых кристаллитов [129].

Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин характеризуется совокупностью взаимосвязанных факторов. Основные из них: диапазон интервала температур хрупкости, пластические свойства материала в этом интервале и скорость нарастания упруго-пластической деформации по мере снижения температуры расплавленного материала [16, 130].

Целью настоящей работы являлось выявление причин образования трещин в кольцевых швах тонкостенных паяных изделий из материала 12Х18Н10Т-ВД, материаловедческое исследование сварных швов и разработка, на основании исследований, рекомендаций по их устранению.

Для того, чтобы разработать технологические рекомендации по ликвидации трещин, необходимо было решить ряд задач, связанных с металлургическими и технологическими особенностями их изготовления. Эти задачи вытекают из того, что стойкость сварного шва к образованию трещин при кристаллизации зависит от:

1. величины и скорости нарастания растягивающих напряжений;
2. химического состава сварного шва, который определяет свойства при кристаллизации и продолжительность нахождения в состоянии пониженной пластичности;
3. формой сварного шва, которая определяет направление роста столбчатых кристаллов, характер срастания между собой, места скопления межкристаллитных участков по отношению к растягивающим напряжениям и характера изменений упруго - пластических деформаций [131];
4. размера первичных кристаллитов.

В виду того, что в настоящее время отсутствуют информационные материалы в отечественной и зарубежной литературе о методах и средствах борьбы с кристаллизационными трещинами при сварке двухслойных паяных узлов, основными путями решения поставленных задач явились экспериментальные исследования.

При поступлении стали 12Х18Н10Т-ВД, перед запуском в производство, проводился 100 % контроль марки материала в состоянии поставки. В ЦЗЛ был проведен химический анализ на содержание углерода, никеля, хрома, марганца и титана при помощи спектрометра. Также, был произведен контроль предела прочности и относительного удлинения на соответствие требованиям ТУ 14-1-1150-74. При МГИ на микрошлифах контролировали наличие неметаллических включений.

Свариваемые узлы секций КС РД представляют собой паяные обечайки двухслойной конструкции, состоящие из наружной обшивки и внутренней фрезерованной стенки (рис. 3.2).

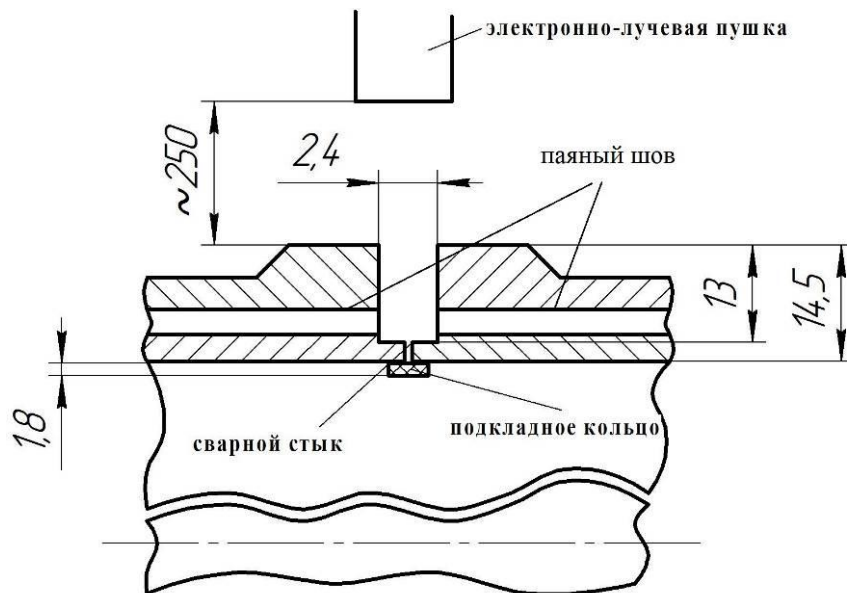


Рисунок 3.2 - Эскиз сварного соединения

При электронно-лучевой сварке кольцевых швов спаянных узлов из материала 12Х18Н10Т-ВД в условиях серийного производства выявлены трещины. Располагаются они как по границам оплавленных точек, так и перпендикулярно к ним (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Микроструктура сварного соединения с трещиной (x300)

Визуальный осмотр шлифов, вырезанных из бракованных узлов показал, что сварной шов близко расположен к паяному соединению и часто наблюдается натекание припоя на металл сварного шва. Микроисследованием установлено, что при сварке данного соединения имеет место оплавление галтелей паяного соединения и попадание припоя в сварной шов. В микроструктуре сварного шва, зоне сплавления и по границам оплавленных точек, имеются участки повышенной травимости.

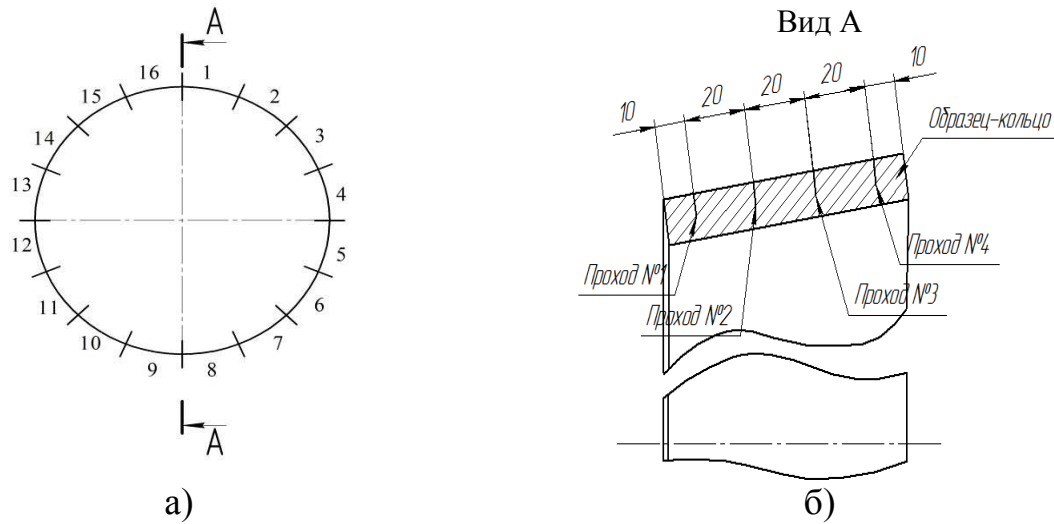
Трещины в наплавленном металле проходят по границам кристаллов и достигают длины 0,25 - 0,8 мм. Замечено, что микроструктура металла шва несколько отличается от типичной структуры сварных швов, характерной для литого металла материала 12X18H10T-ВД, крупнозернистостью и необычным внутризерненным строением.

3.2 Моделирование процесса сварки паяных соединений

Для определения влияния исходной структуры материала и элементов припоя на трещинообразование были проведены экспериментальные исследования на образцах из листового материала 12X18H10T-ВД толщиной 3,0 мм. Режимы сварки образцов выбирались из условия получения удовлетворительного формирования сварного шва и минимального проплава.

Сварка осуществлялась в приспособлении, обеспечивающим жесткое закрепление свариваемого стыка в процессе сборки и сварки.

Образец для моделирования процесса образования сварного шва электронным лучом был выполнен из листовой стали 12X18Н10Т-ВД в виде кольца шириной 100 мм, толщиной 3 мм, диаметром 1050 мм (рис. 3.4 б). Диаметр выбирался исходя из величины диаметра сварных кромок паяных оболочек. Образец-кольцо был разбит на 16 равных участков (рис. 3.4 а).



слева образец – кольцо, справа – сечение образца-кольца.

Рисунок 3.4 - Схема моделирования процесса сварки кольцевого шва

На кольце было выполнено четыре прохода электронным лучом с различными значениями тока луча, тока фокусирующей линзы и скорости сварки [14, 129]. Режимы сварки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Режимы сварки

Проход	Участок	Скорость сварки, мм/с	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА
Первый проход (рез)	1	11	12	744
	2			747
	3			749
	4			752
	5			754
	6			757
	7			759
	8			763
	9		14	744
	10			747
	11			749
	12			752

Продолжение таблицы 3.1

Проход	Участок	Скорость сварки, мм/с	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА
Первый проход (рез)	12	11	14	752
	13			754
	14			757
	15			759
	16			763
Второй проход (рез)	1	11	16	744
	2			747
	3			749
	4			752
	5			754
	6			757
	7		759	
	8		763	
	9		18	744
	10			747
	11			749
	12			752
	13			754
	14			757
	15			759
	16			763
Третий проход (рез)	1	6	12	744
	2			747
	3			749
	4			752
	5			754
	6			757
	7			759
	8			763
	9		14	744
	10			747
	11			749
	12			752
	13			754
	14			757
	15			759
	16			763
Четвертый проход (рез)	1	6	16	744
	2			747
	3			749
	4			752
	5			754
	6			757
	7			759
	8			763

Продолжение таблицы 3.1

Проход	Участок	Скорость сварки, мм/с	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА
Четвертый проход (рез)	9	6	18	744
	10			747
	11			749
	12			752
	13			754
	14			757
	15			759
	16			763

Электронно-лучевая сварка выполнялась на установке ЭЛУ-11 [132].

Образец-кольцо, для устранения остаточной намагниченности подвергали дополнительному размагничиванию и он поступал на сварку с уровнем намагниченности не более 300 мкТл. Контроль производили микротеслометром МФ-24ФМ.

Наличие дефектов формирования сварных соединений выявляли рентгенографическим контролем и последующим металлографическим исследованием.

Были сварены образцы после термической обработки по режиму пайки (балл зернистости 9-10 мкм по дополнительной шкале № 3 ГОСТ 5639-82).

При визуальном осмотре образцов, заваренных по серийной технологии, обнаружены натеки на сварной шов припоя, а в микроструктуре сварного соединения имелись зоны повышенной травимости. Микроструктура сварного шва - аустенитно-ферритная. Элементы припоя располагались по границе кристаллов с наибольшей их концентрацией по зоне сплавления.

Наличие элементов припоя в металле сварного шва, по нашему мнению, связано с температурным воздействием электронного луча на металл паяного соединения. В случае оплавления паяного шва электронным лучом при сварке наблюдается расплавление элементов припоя и их проникновение в сварной шов.

При металлографическом исследовании отчетливо виден момент межзеренного проникновения припоя по границам кристаллов сварного шва.

Наличие элементов припоя по границам кристаллов и привело к развитию трещины (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 - Трещина в сварном шве (X300)

В случае увеличения ширины сварного шва при сварке электронным лучом микроструктура в этом случае характеризуется направленным крупнокристаллическим строением и наличием небольшого количества элементов припоя.

С целью определения величины и скорости нарастания растягивающих напряжений, действующих на структуру и возникновение трещин в период кристаллизации сварного шва, были проведены экспериментальные исследования по сварке образцов с предварительным растяжением свариваемых кромок. В процессе исследований нагрузка изменялась от 0 до 2000 кг.

При металлографических исследованиях основного материала в околошовной зоне видимых изменений в микроструктуре не обнаружено. При сварке электронным лучом с различным предварительным растяжением свариваемых кромок с увеличением нагрузки микроструктура металла шва измельчается [133].

3.3 Исследование влияния параметров сварки на химический состав сварных соединений и металлографическое исследование

В ходе выполнения работы были проведены экспериментальные исследования по определению влияния режимов сварки и элементов припоя на образование трещин при сварке предварительно спаянных конструкций.

Перед выполнением эксперимента был проведен спектральный анализ на содержание химических элементов в сварном шве с трещинами после рентгенографического контроля и сопоставлен с припоем и основным материалом стали 12X18H10T-ВД (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – 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	отсутствует	35	10
Сварной шов	36-37	15-17	30-31	12-14	1

Произведена рентгенография образца на наличие сварочных дефектов. Трещин, шлаковых включений и подрезов не обнаружено. Выявлена 1 пора диаметром 1 мм на участке № 4 прохода № 4.

Режимы сварки с наиболее отличающимися параметрами сварного шва, полученного на образце-кольце (рис. 3.4.) при различных значениях тока луча и фокусирующей линзы представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Зависимость геометрических параметров сварного шва от режимов сварки

Проход	Участок	Скорость сварки	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
					Ширина вкалика, мм	Глубина провара, мм
Первый проход (рез)	1	5 мин/об; 11 мм/с	12	744 (I_0)	2,6	0,8
	2			747 (I_0+3)	2,5	0,9
	3			749 (I_0+5)	2,45	1,0
	4			752 (I_0+8)	2,5	1,05
	5			754 (I_0+10)	2,55	1,3
	6			757 (I_0+12)	2,2	1,6
	7			759 (I_0+15)	1,9	1,9
	8			763 (I_0+18)	2,5	1,9

Продолжение таблицы 3.3

Проход	Участок	Скорость сварки	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
					Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
Первый проход (рез)	9	5 мин/об; 11 мм/с	14	744 (I_0)	3,0	1,0
	10			747 (I_0+3)	2,8	1,1
	11			749 (I_0+5)	2,8	1,2
	12			752 (I_0+8)	2,75	1,3
	13			754 (I_0+10)	2,45	1,4
	14			757 (I_0+12)	2,55	1,8
	15			759 (I_0+15)	2,5	1,9
	16			763 (I_0+18)	2,2	2,0
Второй проход (рез)	1	5 мин/об; 11 мм/с	16	744 (I_0)	3,2	1,0
	2			747 (I_0+3)	3,0	1,2
	3			749 (I_0+5)	3,0	1,5
	4			752 (I_0+8)	3,0	1,5
	5			754 (I_0+10)	2,85	1,7
	6			757 (I_0+12)	2,7	2,1
	7			759 (I_0+15)	2,45	2,35
	8			763 (I_0+18)	2,8	2,0
	9		18	744 (I_0)	3,4	1,2
	10			747 (I_0+3)	3,2	1,3
	11			749 (I_0+5)	3,15	1,45
	12			752 (I_0+8)	3,1	1,7
	13			754 (I_0+10)	2,7	1,9
	14			757 (I_0+12)	2,9	2,2
	15			759 (I_0+15)	2,85	2,3
	16			763 (I_0+18)	3,0	2,4
Третий проход (рез)	1	9 мин/об; 6 мм/с	12	744 (I_0)	3,2	1,15
	2			747 (I_0+3)	3,1	1,2
	3			749 (I_0+5)	3,2	1,2
	4			752 (I_0+8)	3,3	1,5
	5			754 (I_0+10)	3,05	1,75
	6			757 (I_0+12)	3,3	2,0
	7			759 (I_0+15)	2,9	2,1
	8			763 (I_0+18)	3,6	2,1
	9		14	744 (I_0)	3,4	1,4
	10			747 (I_0+3)	3,4	1,45
	11			749 (I_0+5)	3,65	1,4
	12			752 (I_0+8)	3,5	1,8
	13			754 (I_0+10)	3,5	2,0
	14			757 (I_0+12)	3,5	2,35
	15			759 (I_0+15)	3,8	2,45
	16			763 (I_0+18)	4,0	2,4
Четвертый проход (рез)	1	9 мин/об; 6 мм/с	16	744 (I_0)	3,9	1,5
	2			747 (I_0+3)	4,1	1,4
	3			749 (I_0+5)	4,0	1,65
	4			752 (I_0+8)	3,9	2,0
	5			754 (I_0+10)	3,85	2,5
	6			757 (I_0+12)	3,9	2,9
	7			759 (I_0+15)	3,8	2,8
	8			763 (I_0+18)	4,3	2,9
	9		18	744 (I_0)	4,2	1,7
	10			747 (I_0+3)	4,15	1,7

Продолжение таблицы 3.3

Проход	Участок	Скорость сварки	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
					Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
Четвертый проход (рез)	11	9 мин/об; 6 мм/с	18	749 (I_0+5)	4,3	1,7
	12			752 (I_0+8)	4,2	2,0
	13			754 (I_0+10)	4,1	3,0
	14			757 (I_0+12)	4,4	3,0
	15			759 (I_0+15)	4,55	3,1
	16			763 (I_0+18)	5,0	3,1

Подбор оптимального режима электронно-лучевой сварки на образце-кольце проводился, исходя из условия получения качественного сварного шва с минимальной шириной ванны и глубиной провара не менее 2 мм, для гарантированного провара сварных кромок [134].

Для более наглядного анализа геометрических размеров по данным таблицы 3.3 построены диаграммы при скоростях сварки 6 мм/с 11 мм/с (рис. 3.6 – 3.11).

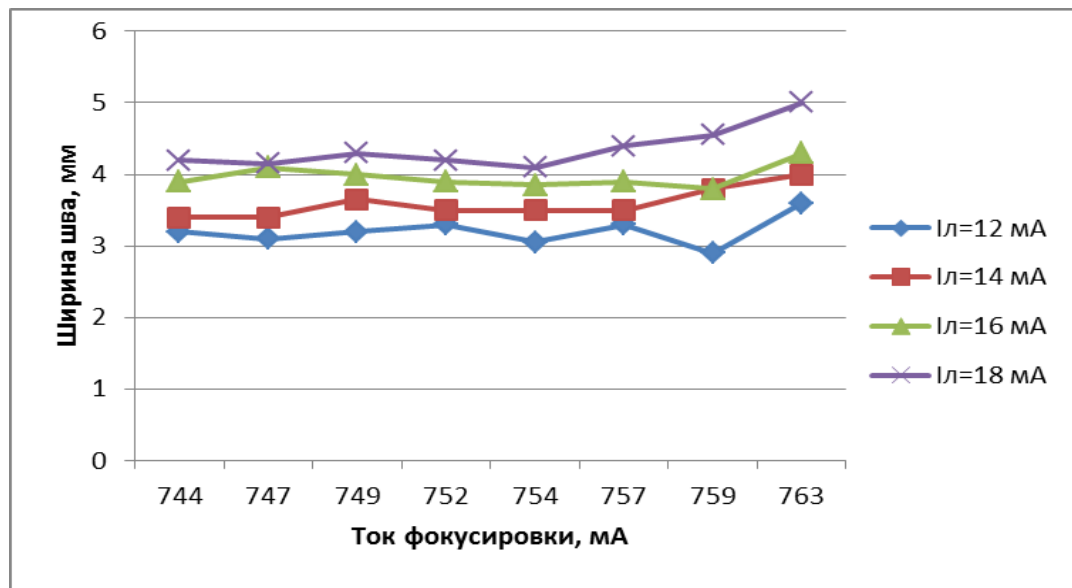


Рисунок 3.6 - Диаграмма зависимости ширины сварного шва от тока фокусировки при скорости сварки 6 мм/с

На диаграмме рис. 3.6 видим, что ширина сварного шва количественно одинакова (2,9- 5,0 мм), при увеличении тока фокусирующей линзы более 757 мА увеличивается при всех токах луча. Ввиду того, что соединение имеет “щелевой” вид (см. рис. 3.2) с шириной 2,4 мм, ни один из режимов при скорости сварки 6 мм/с не подходит.

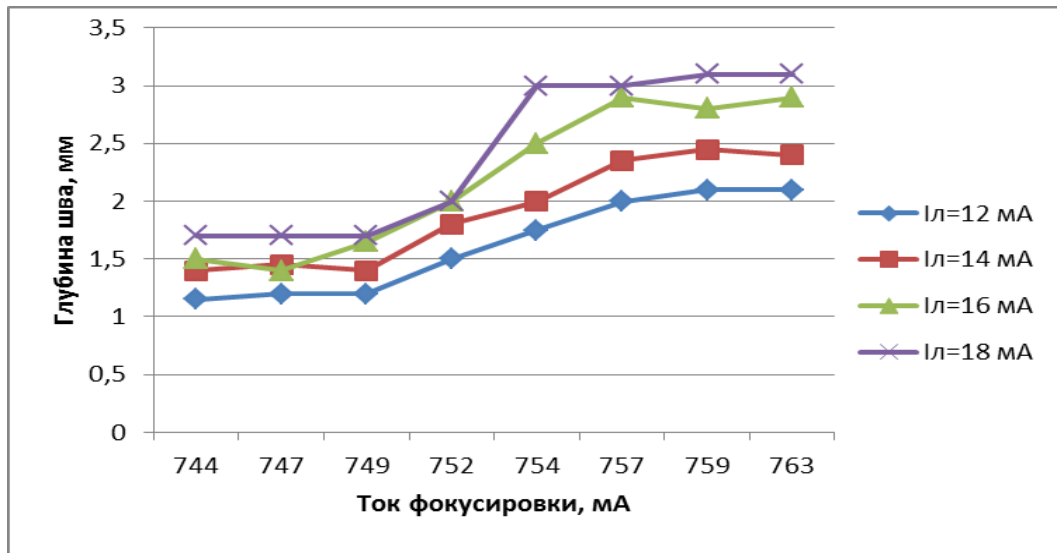


Рисунок 3.7 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока фокусировки при скорости сварки 6 мм/с

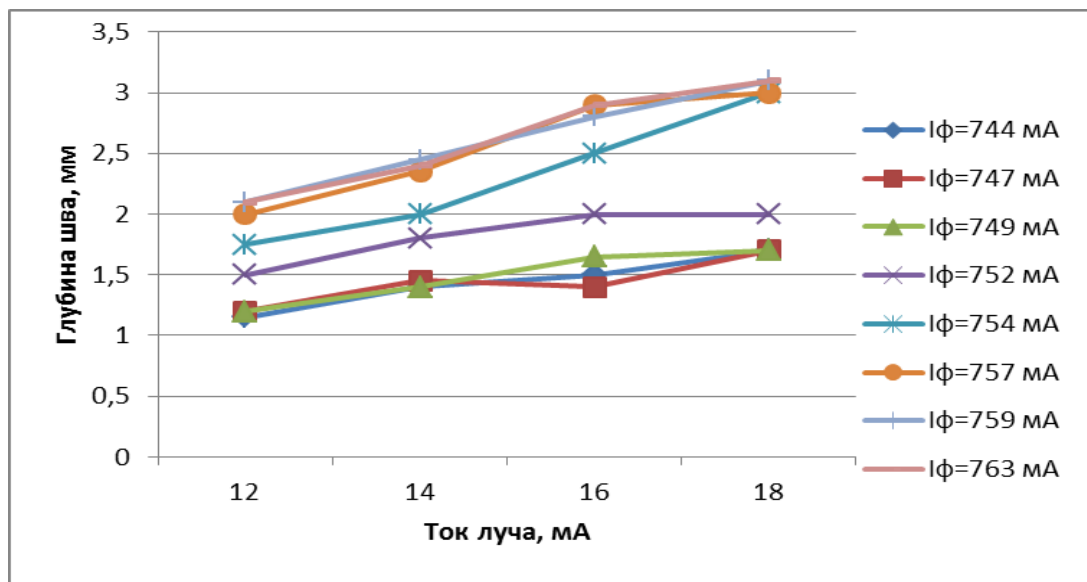


Рисунок 3.8 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока луча при скорости сварки 6 мм/с

На диаграммах рис. 3.7 и 3.8 видим, что глубина провара возрастает с увеличением тока сварки и тока фокусирующей линзы. На необходимую нам глубину проварили образца при всех токах луча при токе фокусирующей линзы больше 757 мА.

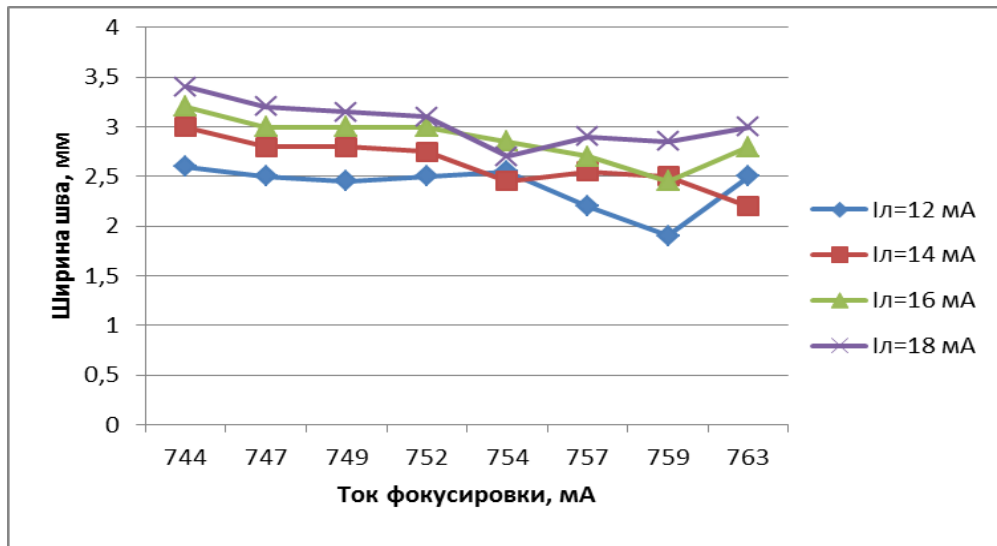


Рисунок 3.9 - Диаграмма зависимости ширины сварного шва от тока фокусировки при скорости сварки 11 мм/с

На диаграмме рис. 3.9 видим, что ширина сварного шва уменьшается с увеличением тока фокусирующей линзы и составила 1,9 – 4,2 мм. Ввиду того, что соединение имеет “щелевой” вид (см. рис. 3.2) с шириной 2,4 мм, наиболее оптимальные режимы получили при токе сварки 12мА и 14 мА, и токе фокусирующей линзы 759 мА.

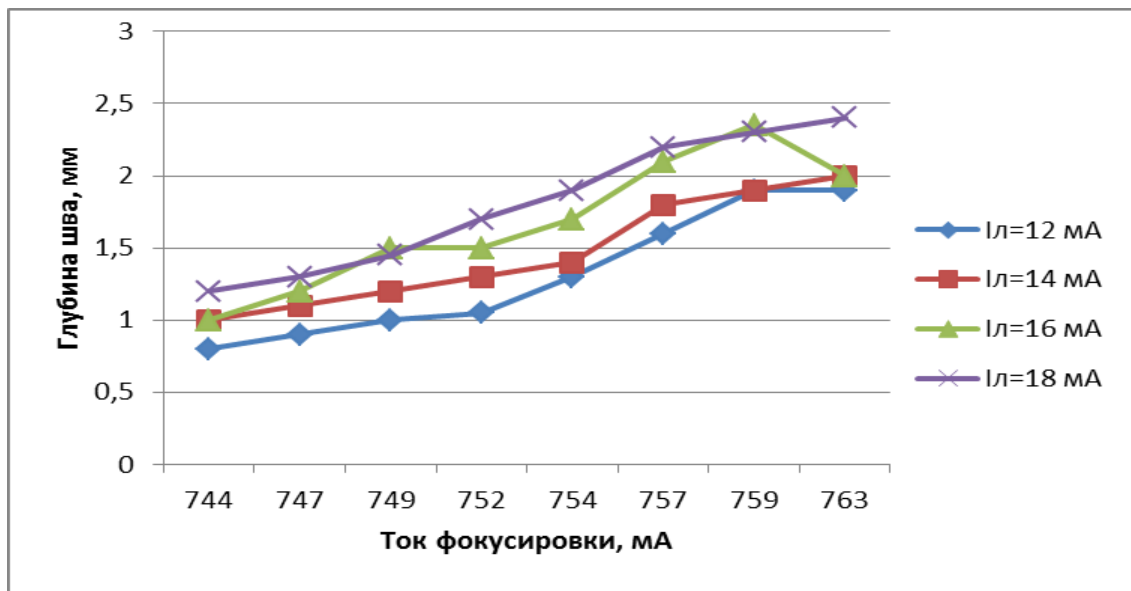


Рисунок 3.10 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока фокусировки при скорости сварки 11 мм/с

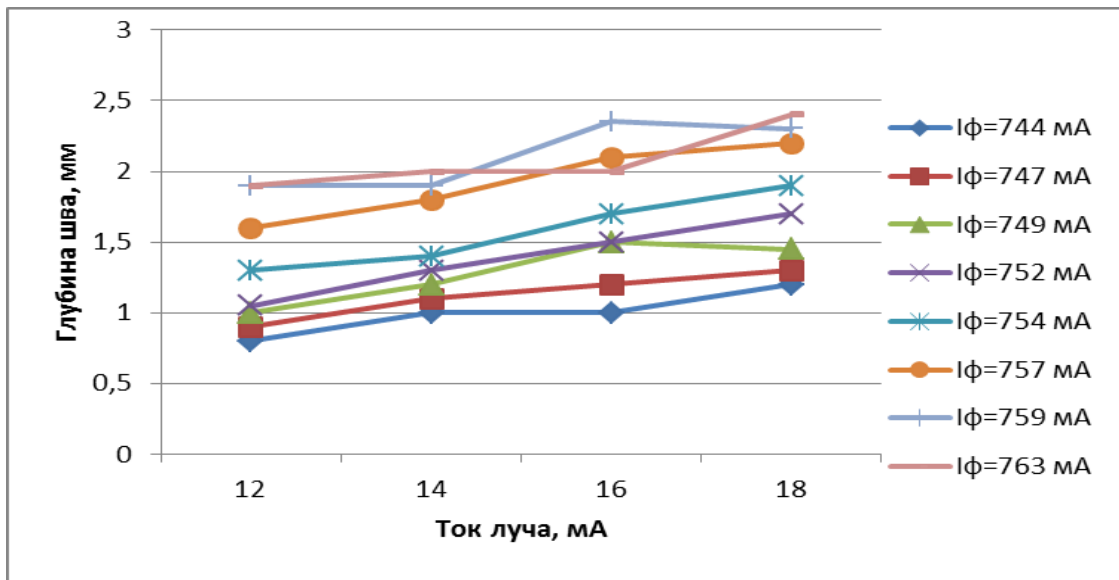


Рисунок 3.11 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока луча при скорости сварки 11 мм/с

На диаграммах рис. 3.10 и 3.11 видим, что величина провара сварного шва возрастает с увеличением тока сварки и тока фокусирующей линзы. На необходимую нам глубину проварили образца при всех токах луча при токе фокусирующей линзы больше 757 мА.

Как видно из таблицы 3.3 и диаграмм, при остром токе фокусировки 744 мА наблюдается максимальная величина ванны и минимальная глубина провара. С увеличением тока фокусирующей линзы ширина ванны уменьшается, а глубина возрастает. При скорости сварки 6 мм/с не обеспечивается требуемой ширины сварного шва. При скорости сварки 6 мм/с и токе луча 12 мА минимальная ширина сварного шва при составила 2,9 мм. При сварке паяных оболочек с шириной целевого соединения 2,4 мм (рис. 3.2) это приведет к нагреву паяного шва, попаданию жидкого припоя в сварной шов и повышению вероятности появления трещин при сварке паяных оболочек.

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 сварки 16 мА и токе фокусирующей линзы 759 мА (второй проход участок 7 таблицы 3.3).

На данном режиме была выполнена ЭЛС двух листовых образцов толщиной 1,5 мм на подкладном кольце с целью определения химического состава сварного шва и наличия дефектов (рис. 3.12).

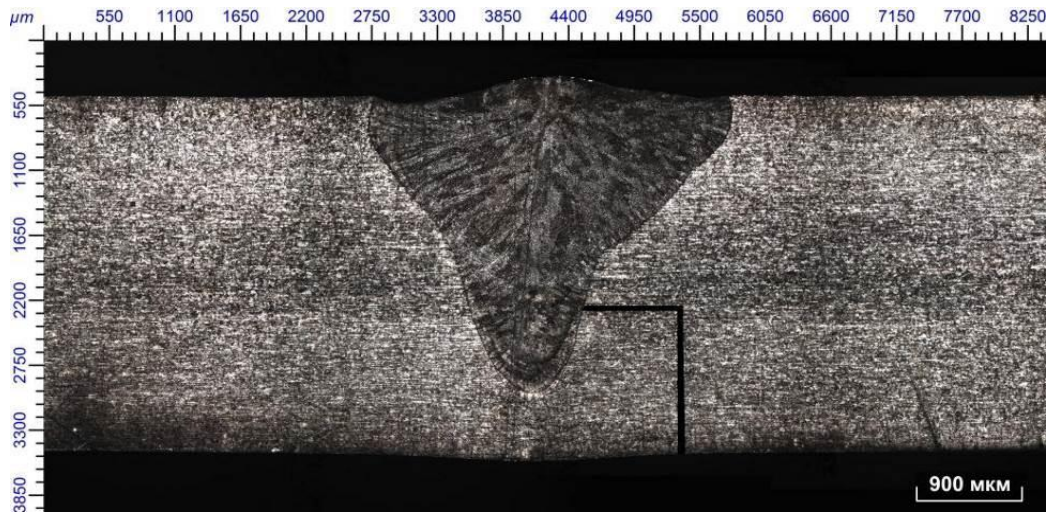
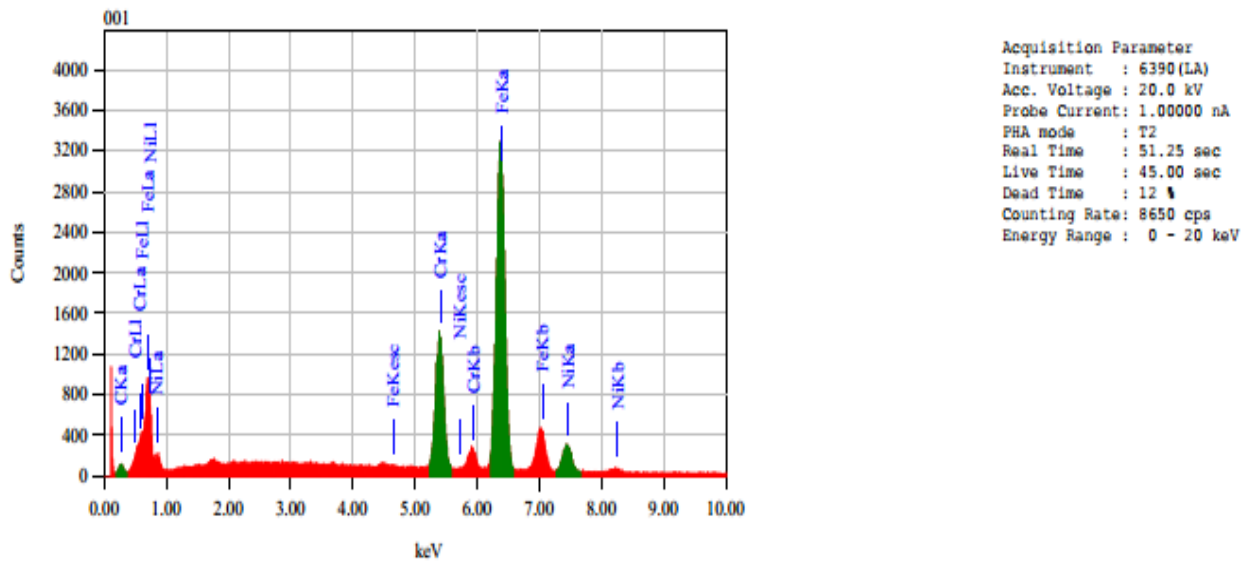
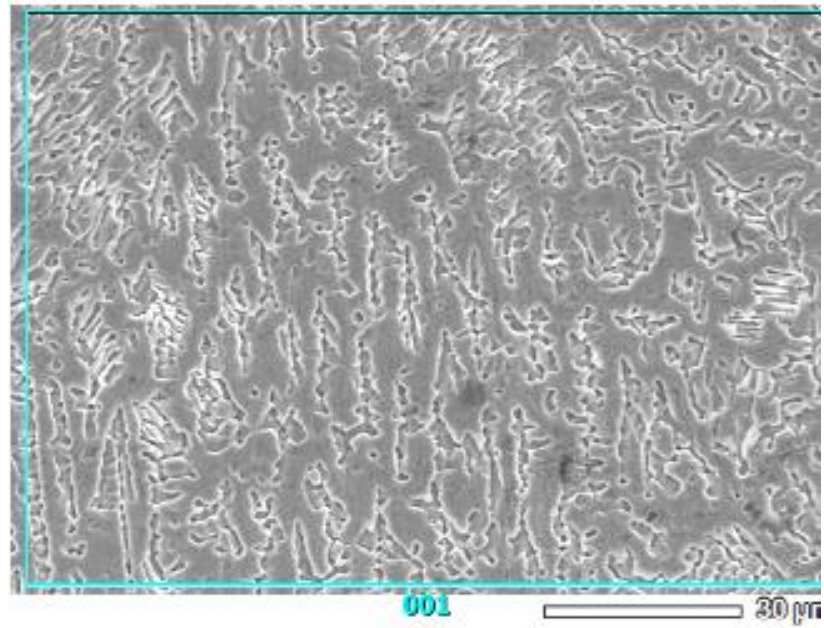


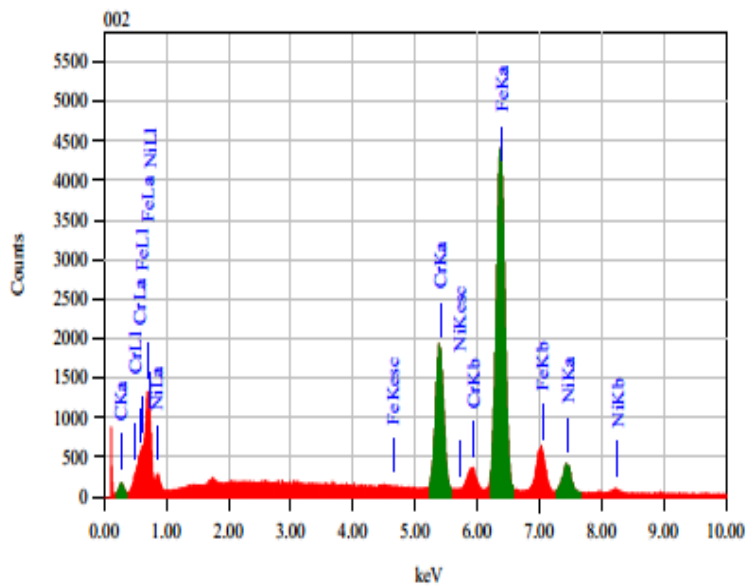
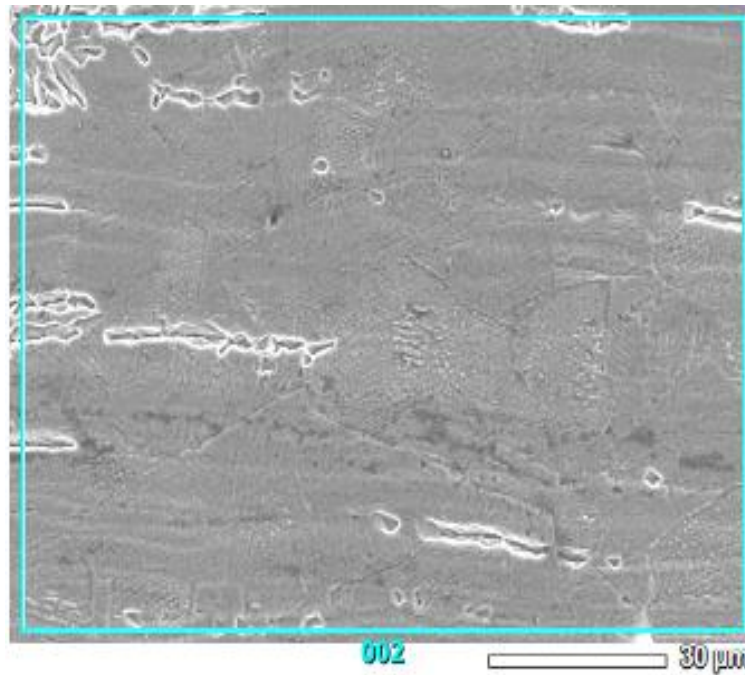
Рисунок 3.12 - Сварной шов без паяного соединения

Был выполнен химический анализ сварного шва (рис. 3.13), околошовной зоны (рис. 3.14) и основного материала (рис. 3.15).



	Химический состав, %				
	C	Cr	Fe	Ni	Total
по массе	1,71	21,69	68,89	7,71	100,00
атомный	7,41	21,67	64,10	6,82	100,00

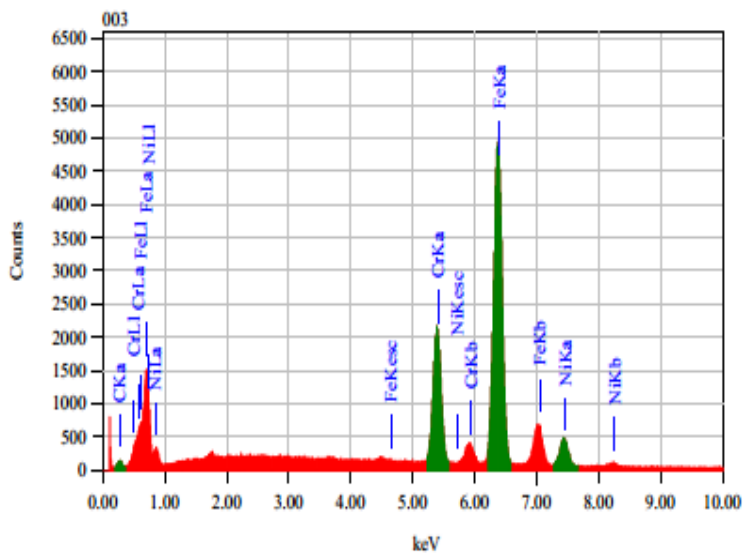
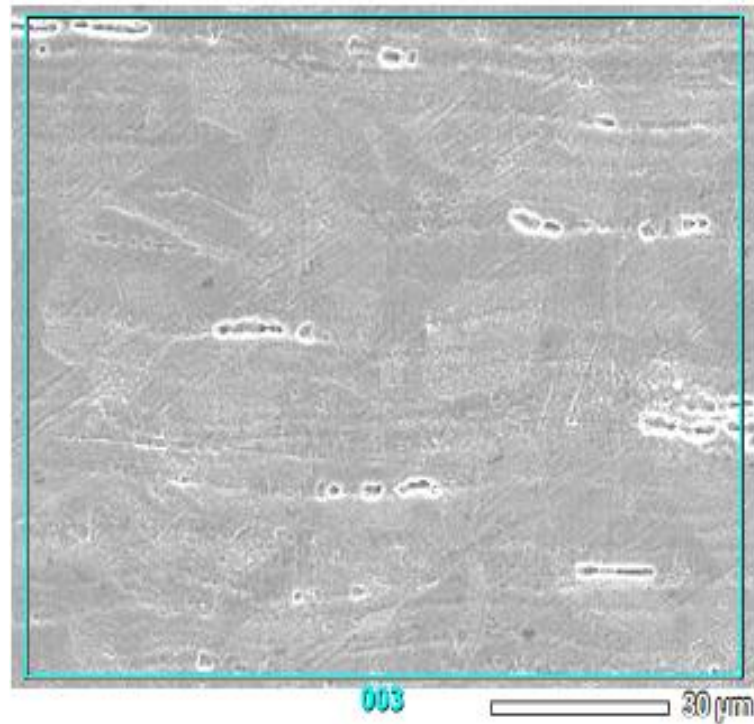
Рисунок 3.13 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения поверхности сварного шва материала 12X18H10T-ВД



Acquisition Parameter
 Instrument : 6390(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 52.03 sec
 Live Time : 45.00 sec
 Dead Time : 13 %
 Counting Rate: 9316 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

	Химический состав, %				
	C	Cr	Fe	Ni	Total
по массе	1,84	21,80	68,88	7,48	100,00
атомный	7,92	21,68	63,80	6,59	100,00

Рисунок 3.14 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения поверхности околошовной зоны сварного шва материала 12X18H10T-ВД



Acquisition Parameter
 Instrument : 6390(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 52.21 sec
 Live Time : 45.00 sec
 Dead Time : 13 %
 Counting Rate: 9641 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

	Химический состав, %				
	C	Cr	Fe	Ni	Total
по массе	1,30	21,45	69,90	7,35	100,00
атомный	5,68	21,74	65,97	6,60	100,00

Рисунок 3.15 - Электронная микроскопия шлифа поверхности материала 12X18H10T-ВД

Для каждого из 16 участков вырезаны образцы и отправлены в ЦЗЛ на исследование. По результатам МГИ замечаний нет.

Величина зерна по швале №3 ГОСТ 5639-82 при скорости сварки 11 мм/с, токе сварки 16 мА и токе фокусирующей линзы 759 мА приведена в таблице 3.4. На рис. 3.16 представлена микроструктура сварного шва, полученного при сварке образцов-пластин, на рис. 3.17 – микроструктура сварного шва натурального узла.

Таблица 3.4 - Величина зерна

Образец	Сварной шов	Основной материал
ЭЛС образец	Литая структура	9-10 мкм
ЭЛС натуральный узел		9-10 мкм

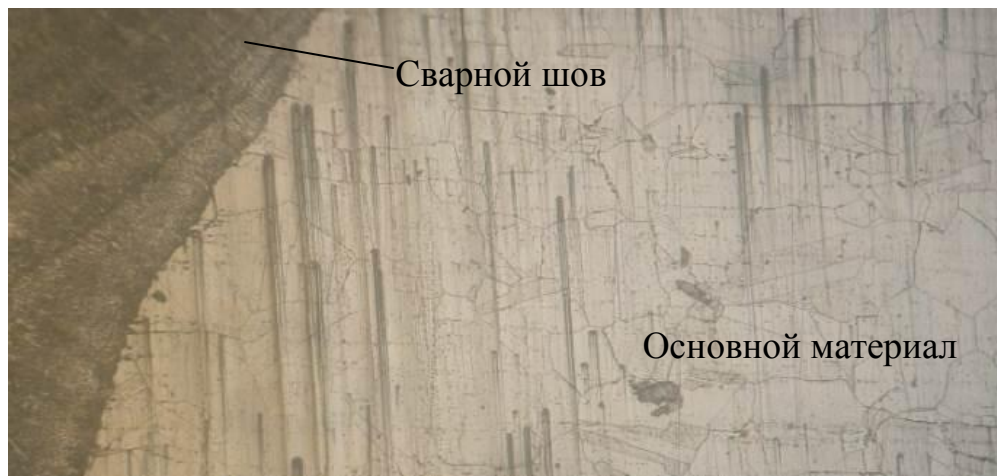


Рисунок 3.16 - Балл зерна на образце, выполненном ЭЛС ($\times 100$)



Рисунок 3.17 - Балл зерна сварного шва на натурном узле ($\times 100$)

Микроструктура сварного шва с паяным швом представлена на рис. 3.18 при увеличении 80X.

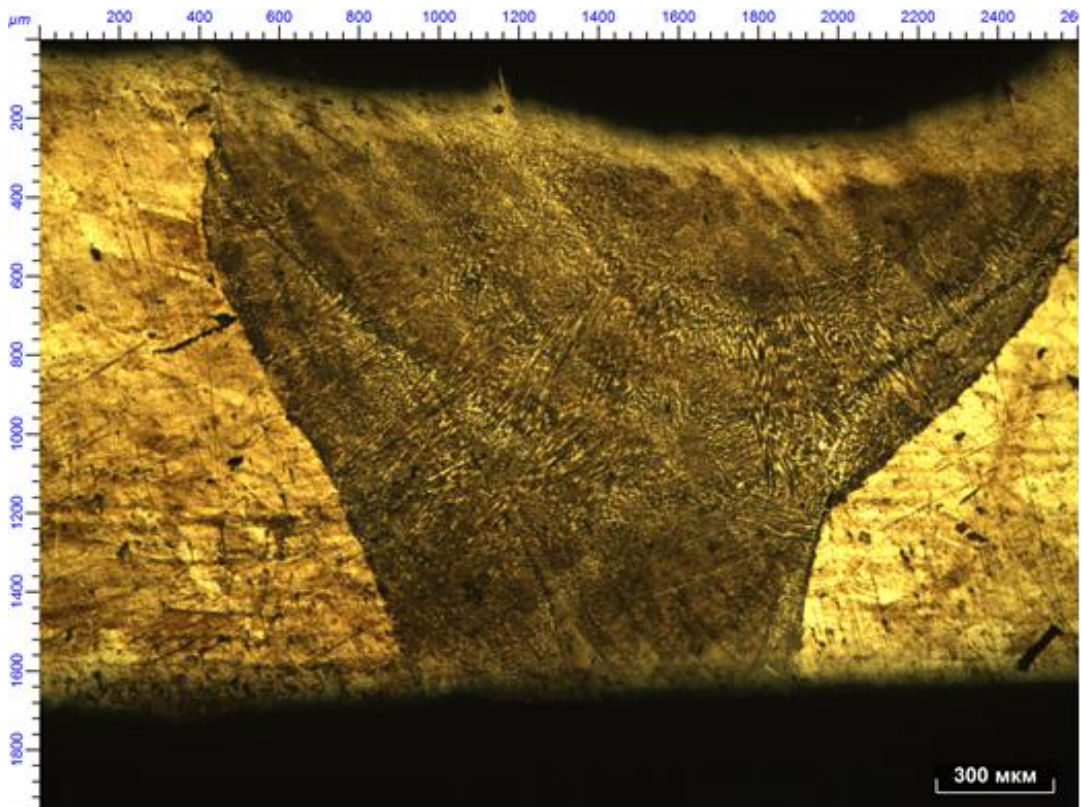
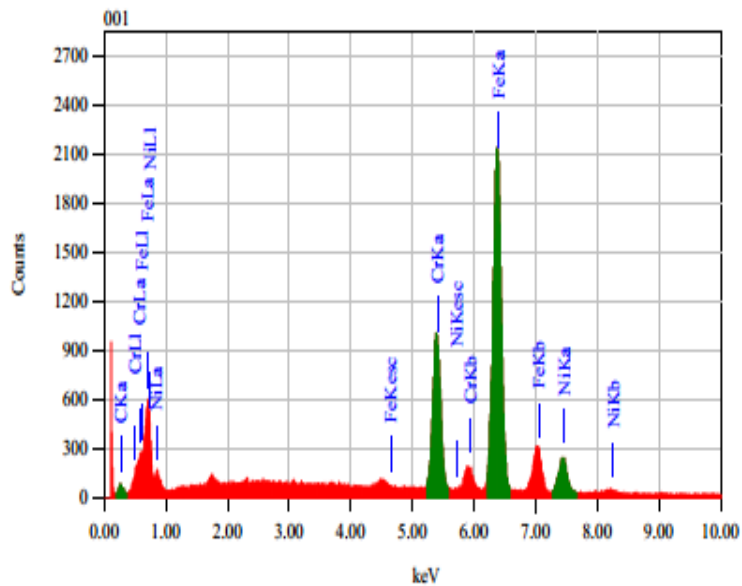
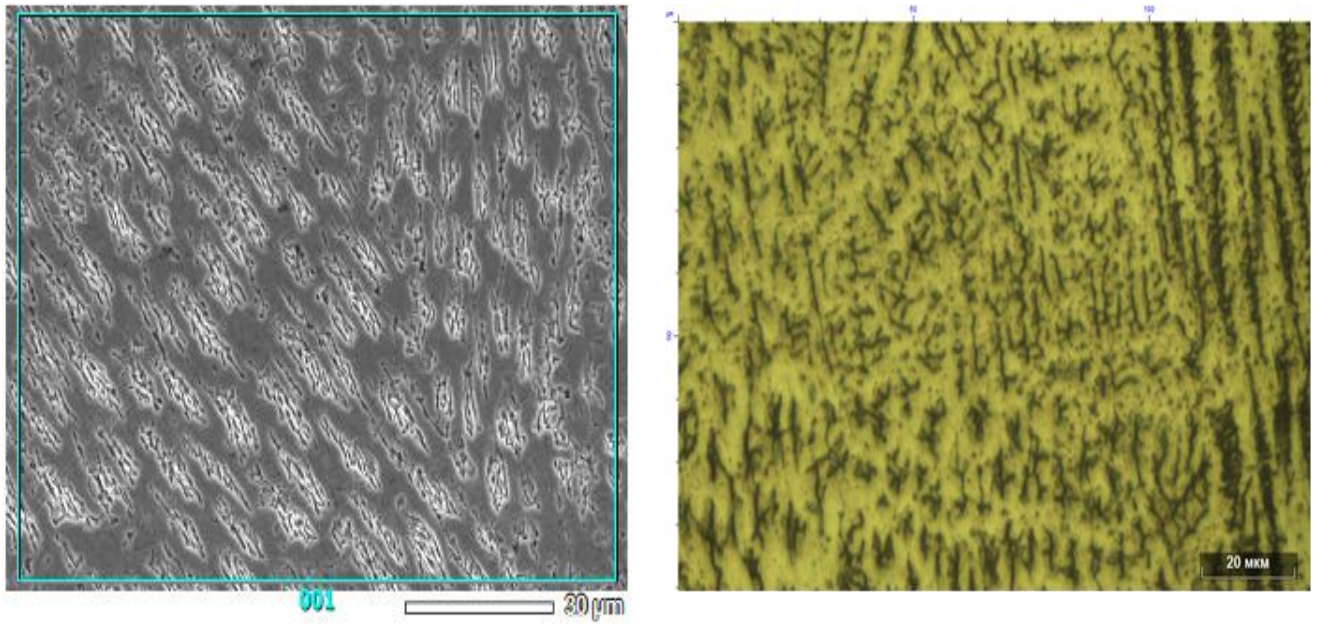


Рисунок 3.18 - Микроструктура сварного шва

Сварной шов имеет структуру литого сплава. Шов сварен в несколько проходов, несплавлений между проходами нет. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не имеется. Зона термического влияния по структуре не отличается от основного материала [135]. Структура основного материала – твёрдый раствор аустенита + карбиды, величина зерна соответствует № 9-10 шкалы ГОСТ 5639.

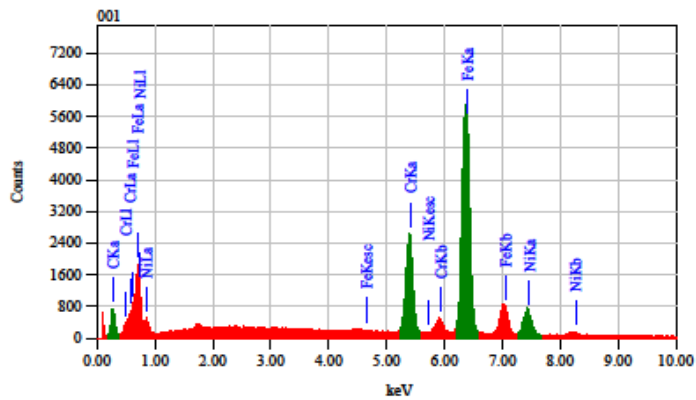
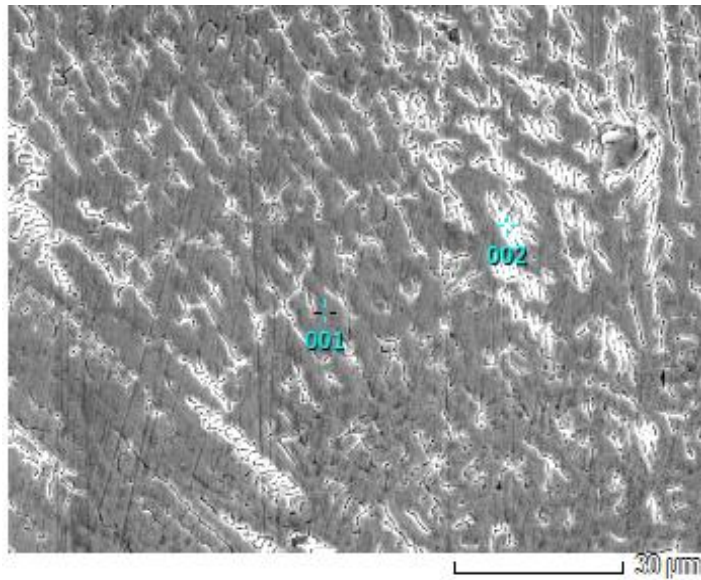
Был выполнен химический анализ сварного шва (рис. 3.19-3.20), околошовной зоны (рис. 3.21-3.22) и основного материала (рис. 3.23) шлифа с паяным швом.



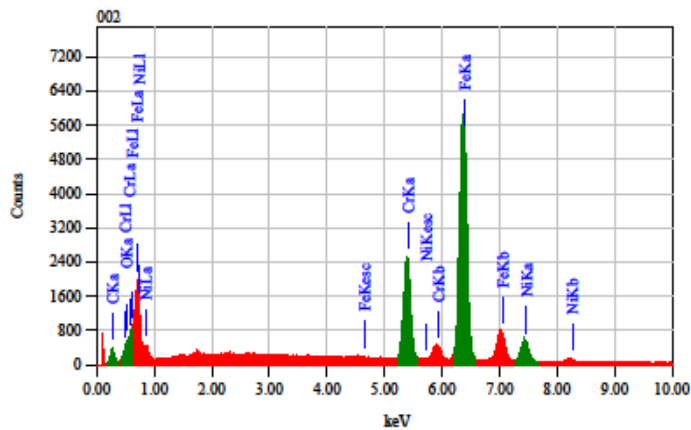
Acquisition Parameter
 Instrument : 6390(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 44.10 sec
 Live Time : 39.28 sec
 Dead Time : 10 %
 Counting Rate: 8272 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

	Химический состав, %				
	C	Cr	Fe	Ni	Total
по массе	1,73	23,01	67,00	8,25	100,00
атомный	7,47	22,97	62,27	7,30	100,00

Рисунок 3.19 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения поверхности сварного шва паяных оболочек из материала 12X18H10T-ВД



Acquisition Parameter
 Instrument : 6390 (IA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 53.49 sec
 Live Time : 45.00 sec
 Dead Time : 15 %
 Counting Rate: 10802 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

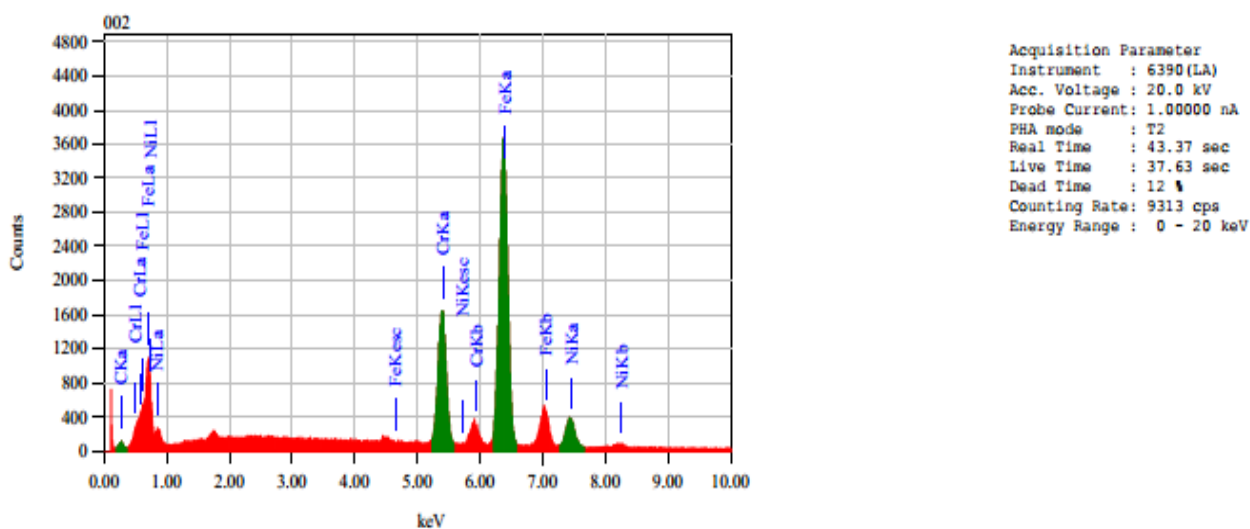
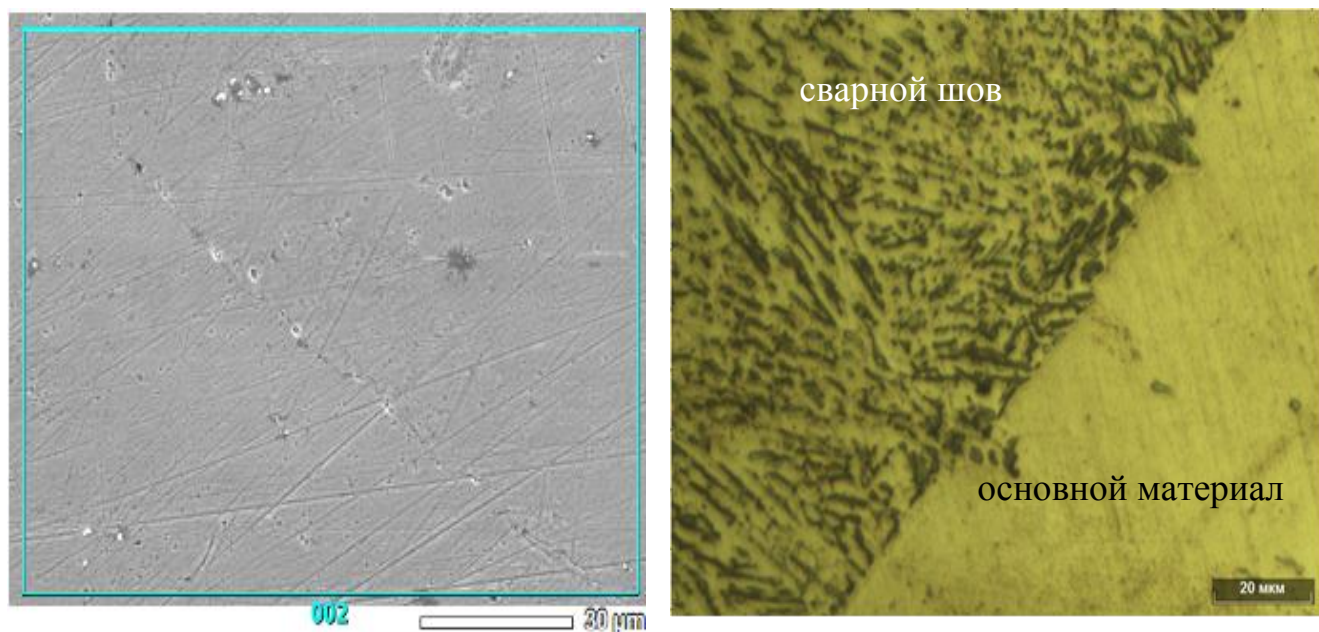


Acquisition Parameter
 Instrument : 6390 (IA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 52.48 sec
 Live Time : 44.24 sec
 Dead Time : 15 %
 Counting Rate: 10748 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

Химический состав, %

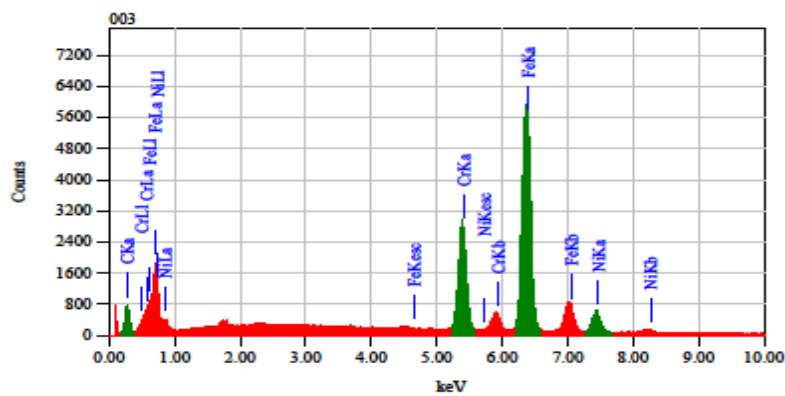
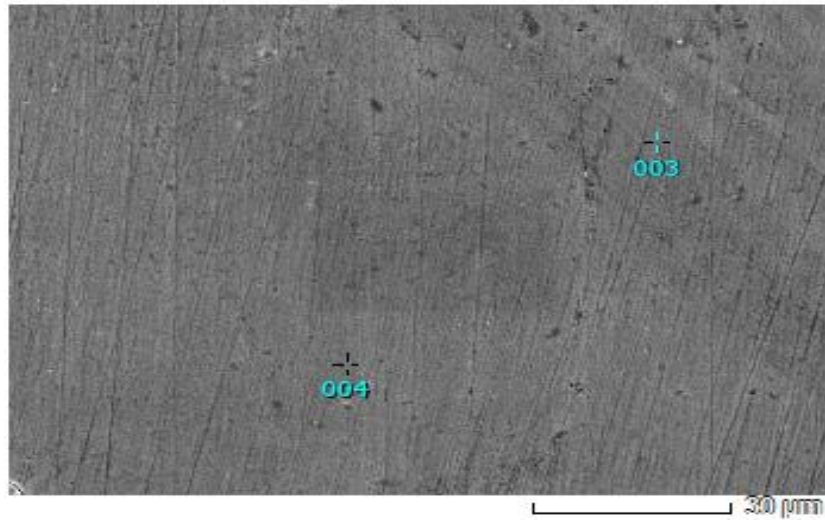
		C	Cr	Fe	Ni	Total
001	по массе	5,97	20,71	64,46	8,85	100,00
	атомный	22,60	18,10	52,45	6,85	100,00
002	по массе	2,98	21,64	67,10	8,27	100,00
	атомный	12,18	20,40	58,91	8,51	100,00

Рисунок 3.20 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения сварного шва паяных оболочек материала 12Х18Н10Т-ВД по точкам

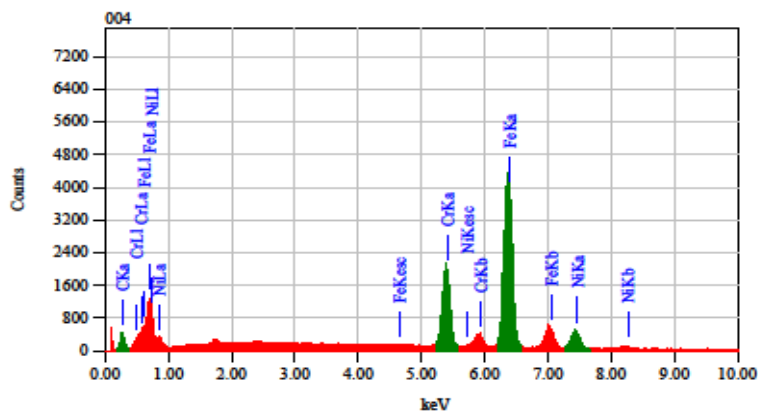


	Химический состав, %				
	C	Cr	Fe	Ni	Total
по массе	1,28	23,02	67,81	7,89	100,00
атомный	5,60	23,33	63,98	7,08	100,00

Рисунок 3.21 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения поверхности околошовной зоны сварного шва паяных оболочек из материала 12X18H10T-ВД



Acquisition Parameter
 Instrument : 6390 (LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000
 PHA mode : T2
 Real Time : 53.58 se
 Live Time : 45.00 se
 Dead Time : 15 %
 Counting Rate: 10853 cps
 Energy Range : 0 - 20



Acquisition Parameter
 Instrument : 6390 (LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current: 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 39.34 sec
 Live Time : 33.05 sec
 Dead Time : 16 %
 Counting Rate: 10894 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

Химический состав, %

		C	Cr	Fe	Ni	Total
003	по массе	6,43	22,69	63,71	7,18	100,00
	атомный	23,95	19,53	51,05	5,47	100,00
004	по массе	4,78	22,61	64,91	7,70	100,00
	атомный	18,73	20,45	54,66	6,16	100,00

Рисунок 3.22 - Электронная микроскопия шлифа поперечного сечения околосшовной зоны сварного шва паяных оболочек материала 12X18Н10Т-ВД по точкам

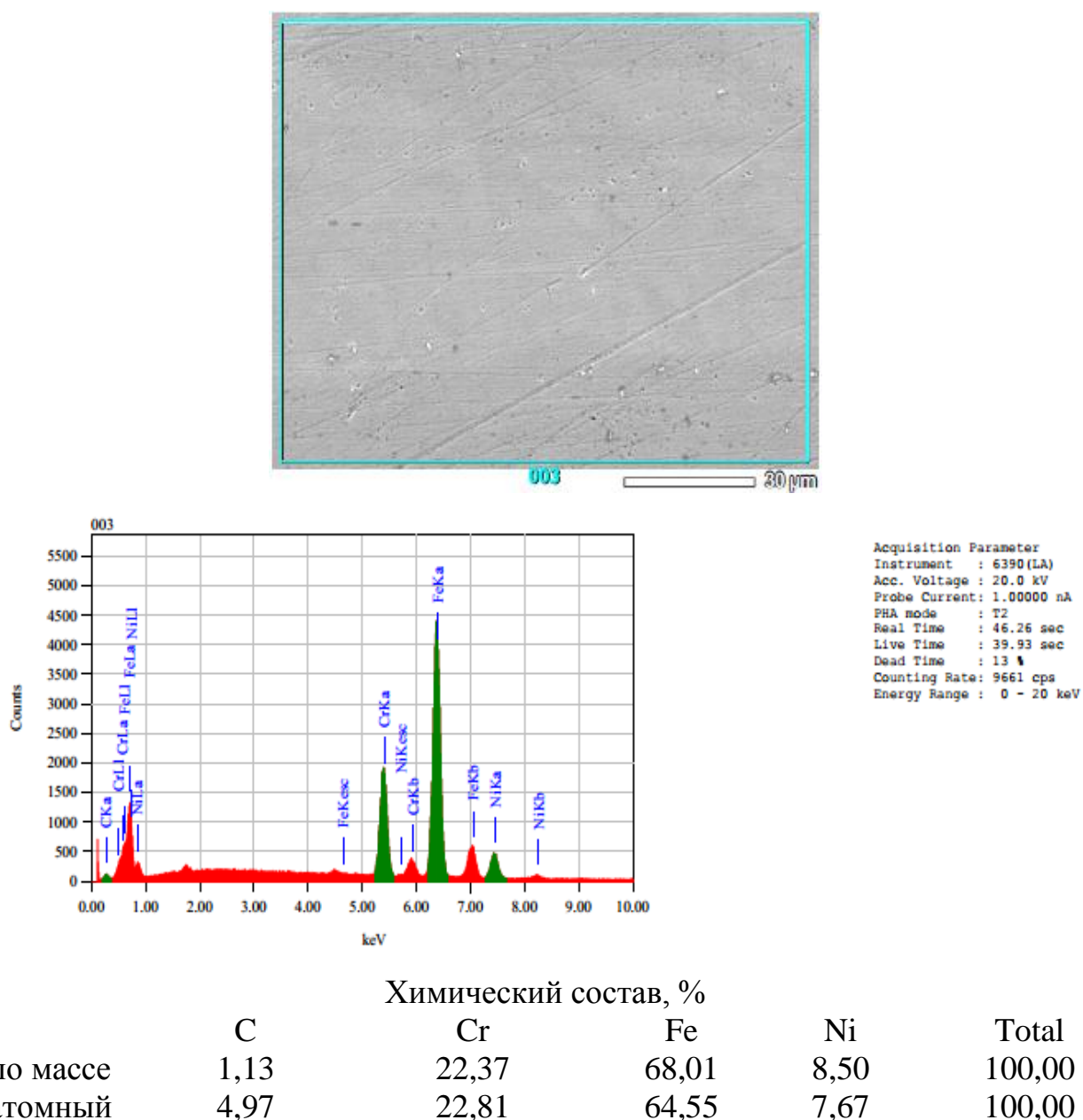


Рисунок 3.23 - Электронная микроскопия шлифа поверхности основного материала 12X18N10Т-ВД

По результатам электронной микроскопии следует, что содержание углерода во всех исследуемых образцах завышено (до 4,78 % в ОШЗ) по сравнению с содержанием в материале (не более 0,12 %). Содержание железа, хрома и никеля количественно близки 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 стали 12X18H10T-ВД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Содержание элементов

Метод замера/хим. элемент	C, %	Cr, %	Ni, %	Ti, %	Mn, %	Fe, %
Опτικο-эмиссионный спектрометр	0,039	17,4	10,1	0,30	0,86	71,3
РЭМ	1,13	22,37	8,50	-	-	68,01
ГОСТ	0,12	17-19	9-11	0,8	2,0	67,08-71

Из таблицы 3.5 видно, что при анализе на растровом электронном микроскопе 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. Содержание хрома, никеля и железа количественно одинаково и однородно. Отсутствие титана и марганца обусловлено высокой ошибкой при проведении эксперимента на растровом электронном микроскопе. При дальнейших исследованиях данный метод не применяли.

Микроструктура основного материала представляет собой сдвоенные аустенитные зерна, характерный размер которых не превышает 45 мкм. 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 зерна. На рис. 3.16 видно, что зерна аустенита в ЗТВ сдвойникованные.

Был произведен замер микротвердости на основном материале, и в литой зоне сварного шва. Результаты замеров микротвердости (средние значения) приведены в таблице 3.6. Замер микротвердости производился на приборе ПМТ-3М при нагрузке $P = 50$ г [136, 137].

Таблица 3.6 – Микротвердость HV0,05

Материал	Сварной шов, HV, кг/мм ²	Основной материал, HV, кг/мм ²
ЭЛС образец	163	150
ЭЛС натуральный узел	158	151

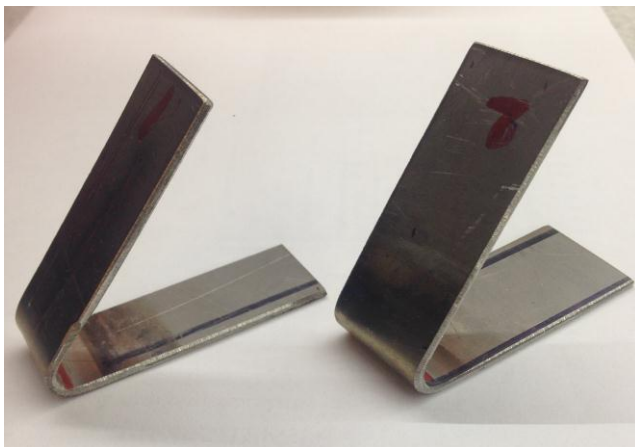
По результатам замера видно, что значения равны, что говорит о высоком качестве сварного шва.

Проведены механические испытания с замером временного сопротивления сварного шва на соответствие требованиям ГОСТ 14019-2003 [138]. Разрыв произошел не по сварному шву, а по основному материалу (рис. 3.24) на расстоянии 28 мм от края сварного шва, вне зоны термического влияния при усилии 580 МПа (по ТУ 530 МПа, см. таблица 2.2).

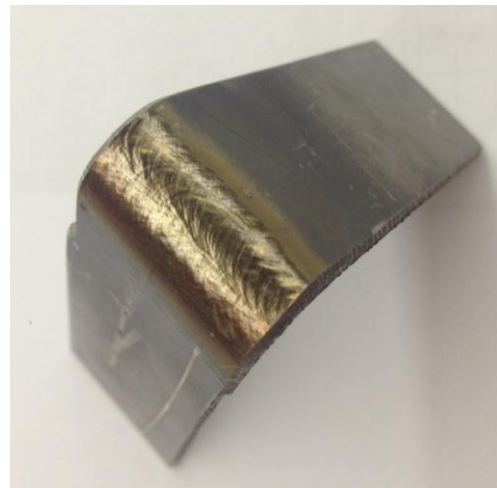


Рисунок 3.24 - Образец после испытания на временное сопротивление X1,5

При испытании на изгиб образец загнули до 130° (рис. 3.25а). На сварном шве трещин не обнаружено (рис.3.25б).



а) угол изгиба



б) сварной шов X2

Рисунок 3.25 - Образец после испытания на изгиб

Микроисследованием установлено, что при сварке данных паяных оболочек при скорости 6 мм/с имеет место оплавление галтелей паяного шва и попадание

элементов припоя в сварной шов. В микроструктуре сварного шва, зоне сплавления и по границам имеются участки повышенной травимости.

Трещины в наплавленном металле проходят по границам кристаллов и достигают длины 0,25 - 0,8 мм. Замечено, что микроструктура металла шва несколько отличается от типичной структуры сварного шва, характерной для листового металла материала 12X18H10T – ВД, крупнозернистостью и необычным внутризерненным строением.

При визуальном осмотре шлифов, вырезанных с дефектного сварного шва выявлено, что ширина сварной ванны 4 мм, что значительно превышает ширину щелевого соединения.

Режимы сварки согласно действующему технологическому процессу и геометрические параметры получаемого сварного шва приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Режим сварки

Проход	Скорость сварки	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
				Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
1	6 мм/с	$15^{\pm 2}$	$I_0 + 8^{\pm 2}$	3,3-3,9	1,5-2,0
2		$11^{\pm 2}$	$I_0 + 10^{\pm 2}$	3,05-3,5	1,75-2,0

На рис. 3.26 представлен сварной шов, полученный по действующему серийному технологическому процессу.

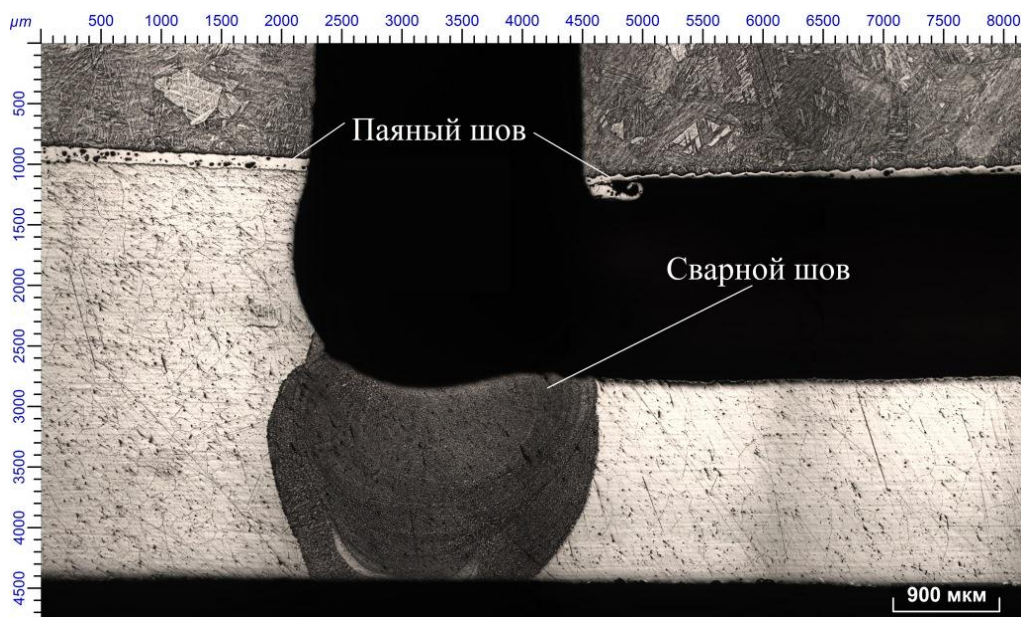


Рисунок 3.26 - Сварной шов паяных оболочек

Как видно на рис. 3.26 ширина сварного шва превышает ширину щелевого соединения (2,4 мм) и составила 2,8 мм.

Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва получены при скорости сварки 11 мм/с, токе сварки 15 мА и токе фокусирующей линзы 759 мА (рис. 3.27).

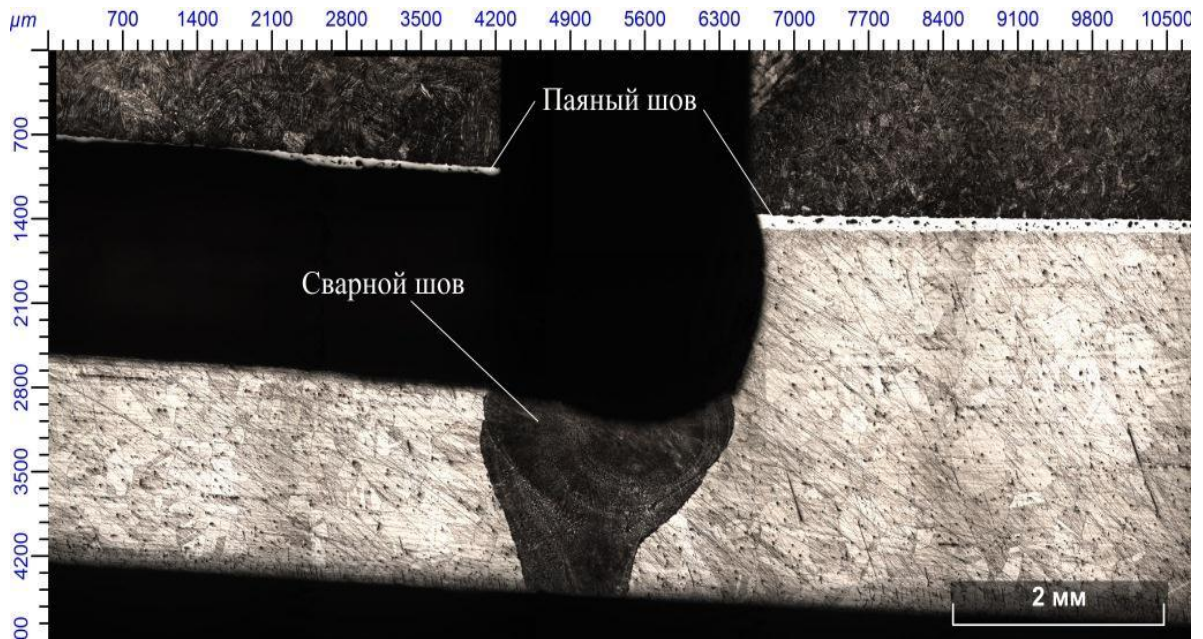


Рисунок 3.27 - Сварной шов паяной оболочки на вновь подобранном режиме

Как видно на рис. 3.27 ширина сварного шва составила 2,3 мм. Дефектов не выявили. Параметры сварного шва на оптимальных режимах сварки представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Оптимальные параметры для сварки тонкостенных паяных оболочек

Скорость сварки, мм/с	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
			Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
11	15±1	759	2,45	2,35

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 районе сварного шва.

Выводы по главе 3:

На основании полученных результатов исследования состава, структуры и свойств сварных швов материала 12Х18Н10Т - ВД установлено, что:

1 Основной причиной образования трещин при сварке кольцевых швов паяных узлов из материала 12Х18Н10Т - ВД является попадание элементов припоя в металл шва.

2. Установлено, что элементы припоя попадают в сварной шов как за счет оплавления паяных ребер под воздействием тепла от электронного луча (некорректно выбранный режим сварки), так и за счет некачественной зачистки сварных кромок.

3. На основе результатов материаловедческого исследования сварных швов показано что, сварной шов имеет минимальную ширину и мелкокристаллическую структуру, наиболее высокую стойкость против образования трещин при оптимальном режиме электронно-лучевой сваркой с током сварки 15 мА, током фокусирующей линзы 759 мА и скоростью сварки 11 мм/с.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА 06X15H6MBФБ-Ш

В настоящей главе исследовано влияние режимов ЭЛС коррозионностойкой жаропрочной стали 06X15H6MBФБ-Ш толщиной 9 мм без предварительного подогрева на склонность к образованию пор и шлаковых включений.

Сталь 06X15H6MBФБ-Ш относится к мартенситному классу и используется для изготовления обшивки и деталей самолета, работающих при температуре 500 - 550 °С, а также для изготовления наружных стенок камер сгорания ракетного двигателя.

Рассмотрим влияние химических элементов на свойства стали. Низкое содержание углерода 0,05-0,09% обеспечивает хорошую свариваемость, а в сочетании с хромом 13,5-15% - коррозионную стойкость стали.

Комплексное легирование карбидообразующими элементами (являющиеся одновременно и ферритообразующими) как Mo, W, V, Nb позволяют сохранить высокую прочность в интервале 450-550°С. Никель добавляют с целью подавления дельта - феррита, образующегося в результате совместного влияния Cr, W, Mo, V, Nb. Содержание никеля должно быть минимально необходимым, чтобы избежать сдвига по фазовому составу в переходный класс.

Избыток никеля может привести к снижению температур начала мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ (M_n) и обратно $\alpha \rightarrow \gamma$ (A_{c1}) превращений; образованию в структуре повышенного количества аустенита после закалки или в процессе эксплуатации при высоких температурах, и как следствие, к снижению жаропрочности.

При содержании никеля 5,2% в плавках с пониженным пределом углерода и верхним пределом ферритообразующих элементов количество δ – феррита обычно не превышает 5%. Для плавков со средним содержанием легирующих элементов, точка M_n соответствует 100-110°С и после закалки в структуре сохраняется не более 5% остаточного аустенита. Обратное $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение в

данной стали протекает изотермически и начинается для плавок с 6,2% Ni при 530°C и для плавок с 5,7% Ni при 560-580°C выдержка 6 часов.

При нагреве около точки A_{c1} до 550-600°C образуется до 25-30 % аустенита, стабильного вплоть до комнатной температуры. Следовательно, содержание более 5,7% Ni в стали 06X15H6MBФБ-Ш нецелесообразно из-за снижения точек M_n и A_{c1} .

Повышенное содержание аустенита снижает прочностные характеристики стали и может привести к образованию неотпущенного мартенсита. Поэтому на основании исследований пределы легирования стали 06X15H6MBФБ-Ш никелем приняты равным 5,2-5,7%, что обеспечивает достаточное ограничение образования δ – феррита и γ – фазы (аустенита).

Оптимальное сочетание механических свойств достигается после закалки с 1000°C, при которой происходит полное растворение всех карбидов (за исключением NbC) и отпуска 490-510°C 2 часа [139].

Нагрев термически обработанной стали до 450-500 °C в течении 1000 часов не снижает прочность и пластичность при комнатной и повышенной температурах. При нагреве при 500 °C в течение 500 часов, вследствие обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, образуется около 15% стального аустенита, наличие которого должно снижать механические свойства, т.е. происходит разупрочнение, но разупрочняющий фактор компенсируется упрочнением, обусловленным образованием высокодисперсной фазы на основе $Cr_2(CN)$.

При нагреве до 550°C происходит разупрочнение при выдержке 100 часов и более. Разупрочнение связано с обеднением твердого раствора легирующими элементами, а также образованием карбида $Me_{23}(C_6)$ и аустенита (упрочняющая фаза $Cr_2(CN)$ отсутствует). Разупрочнение при 550 °C ограничивает ресурс эксплуатации изделия не более 100 часов. В следствии чего данная сталь применяется при изготовлении деталей, эксплуатирующийся при температурах не более 500 °C.

4.1 Анализ свариваемость стали 06X15H6МВФБ-Ш

Сталь хорошо сваривается аргодуговой сваркой неплавящимся электродом без подачи присадочного материала, контактной (точечной и роликовой) и электронно-лучевой сваркой; не склонна к образованию горячих и холодных трещин и не требует подогрева до или после сварки. Сварные соединения не склонны к охрупчиванию или разупрочнению при длительных нагревах на температуры до 500 °С включительно.

Однако, при получении сварных соединений в условиях серийного производства методом электронно-лучевой сварки, нередко встречаются такие дефекты как поры и шлаковые включения (рис. 4.1).

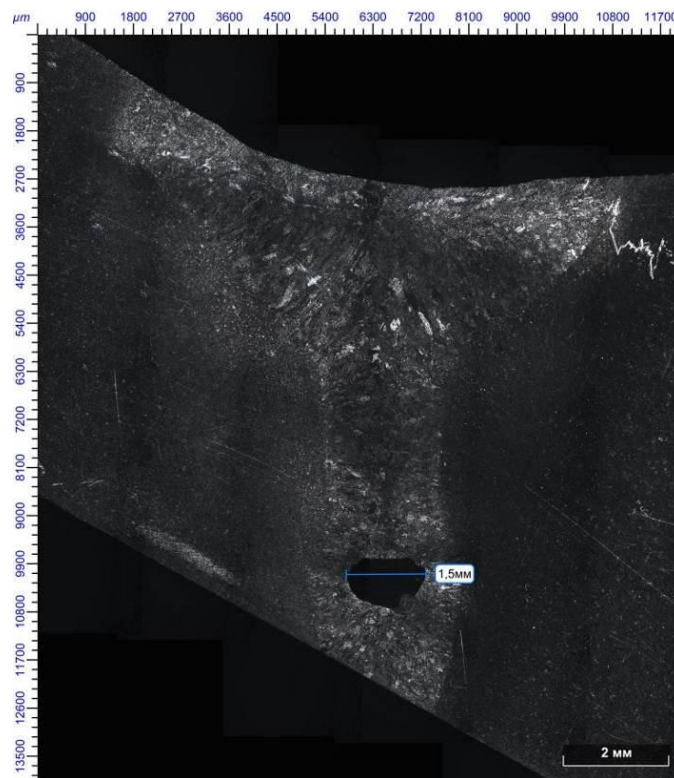


Рисунок 4.1 - Пора в корне сварного шва

Таким образом, в результате производственного опробования установлено, что сталь 06X15H6МВФБ-Ш обладает достаточной технологичностью и надежностью, и пригодна к использованию для деталей самолета и камер

сгорания жидкостного ракетного двигателя с температурой эксплуатации до 500-550°C.

Согласно техническим условиям режим упрочнения для данной стали следующий:

1. Термическая обработка деталей и узлов и заготовок образцов при входном контроле установлена следующий образом: закалка 1000°C с последующим охлаждением на воздухе (листы, прутки до 30 мм) в масле или воде (прутки >30мм, поковки), отпуск 510°C±10 не менее 2 часов.

2. После сварки термообработку производить по режиму: закалка 1000±10°C, охлаждение на воздухе (масло или вода), обработка холодом при температуре -70 – 80 °C - 6 часов, отпуск 510±10 °C - 2-3 часа с охлаждением на воздухе.

При поступлении стали 06X15H6MBФБ-Ш, перед запуском в производство, проводился 100 % контроль марки материала в состоянии поставки. В ЦЗЛ был проведен химический анализ образца от плавки на содержание углерода, никеля, хрома, молибдена, вольфрама, ванадия и ниобия.

Отработку режима сварки производили на образце-имитаторе натурального узла (рис. 4.2) . Имитатор был выполнен в виде кольца с толщиной сварных кромок 9 мм и толщиной технологического подкладного кольца 5. Образец-имитатор был разбит на 17 равных участков.

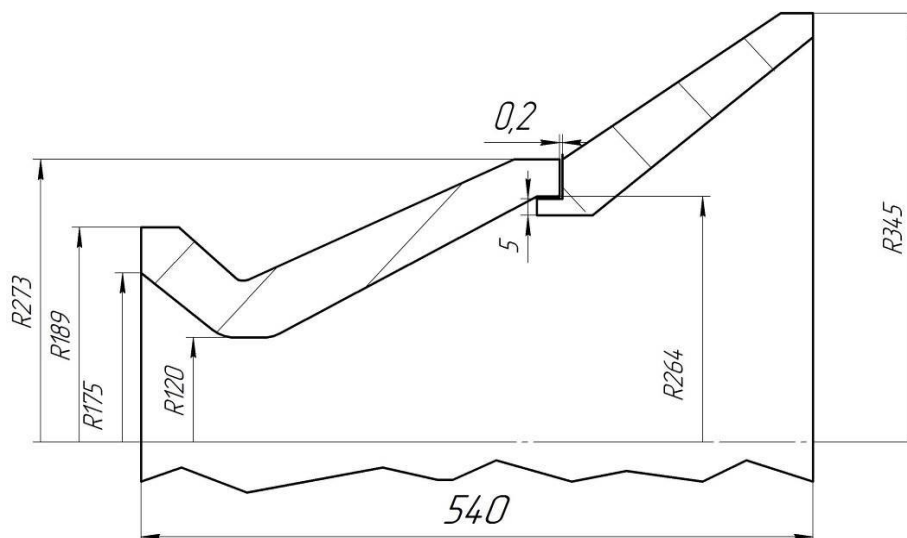


Рисунок 4.2 - Эскиз сварного соединения

Материал свариваемого образца-имитатора – сталь 06Х15Н6МВФБ-Ш, поставляется по ТУ 14-1-2903-80. Электронно-лучевая сварка выполнялась на установке ЭЛУ-9Б, укомплектованной универсальным сварочным манипулятором, электронно-лучевой аппаратурой ЭЛТА-60.15 мощностью 15 кВт. Контроль фокусировки электронного пучка производили на поверхности образца по наибольшей яркости пучка при токе луча 1мА (I_0). Рабочее расстояние от пушки до образца составило 200 мм.

4.2 Металлографическое исследование сварных швов

При исследовании замерялись геометрические параметры шва, полученного при различных значениях тока луча и тока фокусирующей линзы. Результаты геометрических параметров относительно каждого режима сварки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы сварки и параметры сварных швов

№ образца	Скорость сварки, мм/с	Ток луча I_l , мА	Ток фокусирующей линзы I_f , мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Ширина верхней обл. св. шва, мм	Глубина сварного шва, мм
1	3	35	728	60	7,5	7,7
2		35	732		6,0	7,7
3		35	736		6,1	7,2
4		40	728		5,6	8,3
5		40	732		5,7	8,0
6		40	736		6,3	8,4
7		40	744		7,0	8,4
8		40	740		6,9	8,5
9		45	740		6,2	8,6
10		45	736		6,0	8,8
11		45	732		6,1	9,0
12		45	728		5,7	9,0
13		48	728		6,0	Более 9,0
14		48	732		6,1	Более 9,0
15		48	736		6,2	Более 9,0
16		52	728		6,0	Более 9,0
17		52	732		6,3	Более 9,0

Из таблицы 4.1 видно, что с ростом тока фокусирующей линзы ширина сварного шва возрастает, а глубина провара уменьшается. Величина провара сварного шва возрастает с увеличением тока луча, который определяет мощность электронного пучка [140].

На образцах №16 и №17 получили прожог, что обусловлено завышенным током луча. В дальнейшей работе их не рассматривали.

Для более наглядного анализа геометрических размеров по данным таблицы 4.1 построены диаграммы (рис. 4.3-4.5).

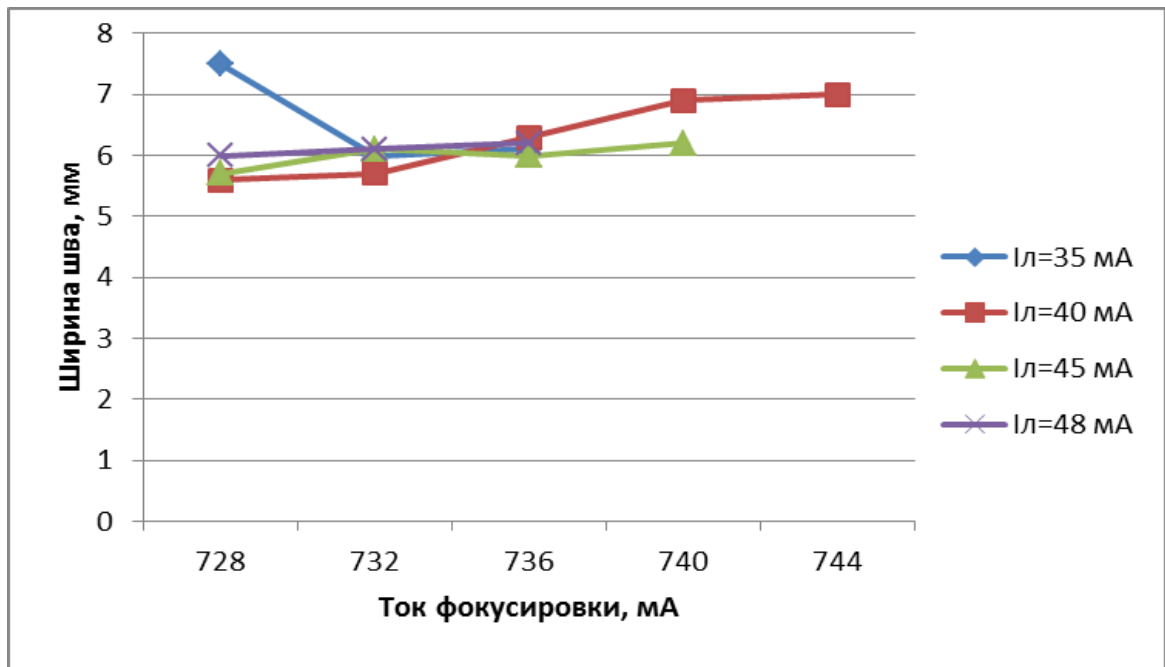


Рисунок 4.3 - Диаграмма зависимости ширины ванны сварного шва от тока фокусировки при различных токах электронного луча

На диаграмме рис. 4.3 видим, что ширина сварного шва количественно одинакова (5,6- 7,5 мм). Минимальную ширину сварного шва получили на всех токах луча при токе фокусирующей линзы 732 мА.

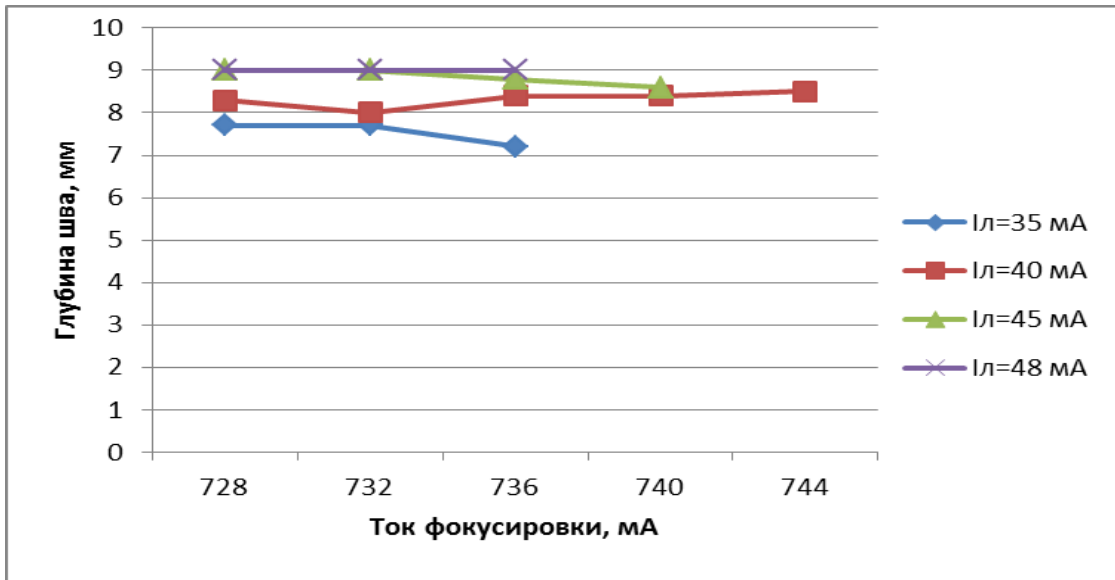


Рисунок 4.4 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока фокусировки при различных токах электронного луча

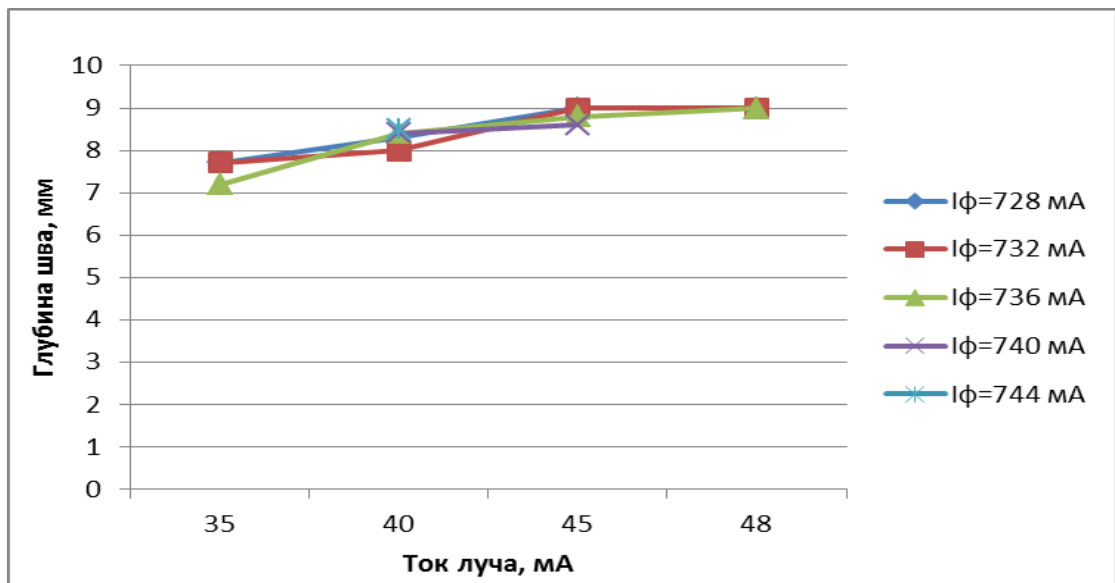


Рисунок 4.5 - Диаграмма зависимости глубины сварного шва от тока луча при различных токах фокусирующей линзы

На диаграммах рис. 4.4 и 4.5 видим, что величина провара сварного шва возрастает с увеличением тока сварки и тока фокусирующей линзы. На необходимую нам глубину проварили образцы при токах луча 45 мА и 48 мА при токе фокусирующей линзы до 736 мА.

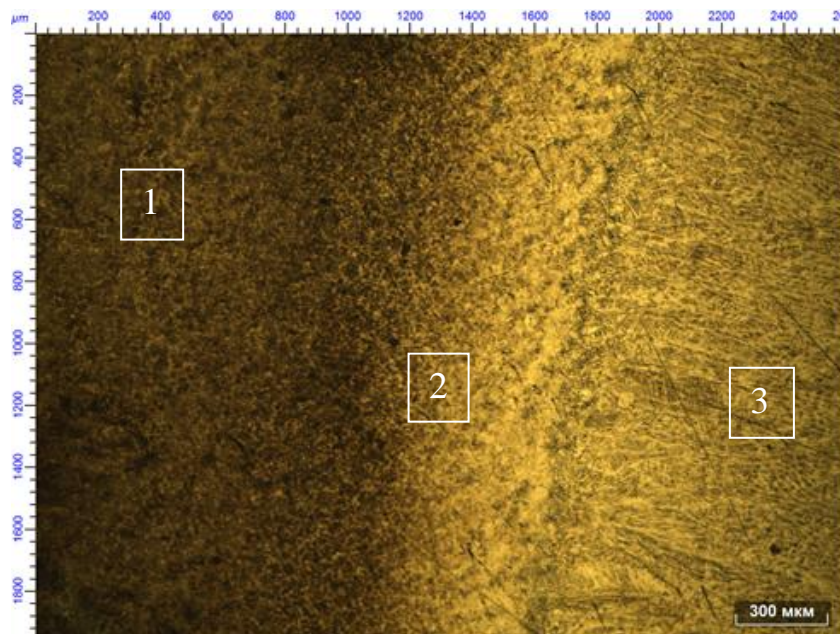
Исследование физико-механической однородности сварного соединения на образце №15 в целом оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, сварного шва и околошовной зоны (ОШЗ) [141]. Средние результаты замера представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Микротвердость HV 0,05

№ образца	Сварной шов, HV, кг/мм ²	ОШЗ, HV, кг/мм ²	Основной материал, HV, кг/мм ²
15	326	361	302

Из таблицы 4.2 следует, что характер распределения значений микротвердости по зонам сварного соединения из стали 06X15H6MBФБ-Ш качественно одинаков. Микротвердость основного металла имеет минимальные значения, максимальная микротвердость обнаружена в ОШЗ, что обусловлено образованием структур закалочного характера.

На рис. 4.6 представлена микроструктура сварного шва и околошовной зоны при увеличении 80X.



1- основной материал, 2- ОШЗ, 3- сварной шов

Рисунок 4.6 - Микроструктура сварного шва материала 06X15H6MBФБ-Ш

Сварной шов имеет структуру крупноигльчатого мартенсита. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не имеется. Зона термического влияния отличается по структуре от основного материала и соответствует

мелкоигольчатому мартенситу. Структура основного материала – скрытоигольчатый мартенсит + карбиды.

Была определена концентрация (массовых долей) химических элементов сварного шва стали 06X15H6MBФБ-Ш на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Содержание элементов

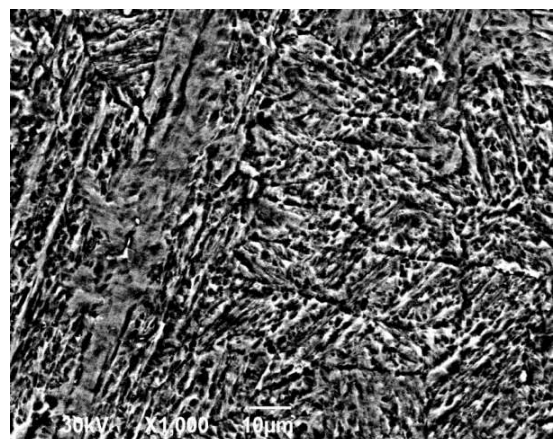
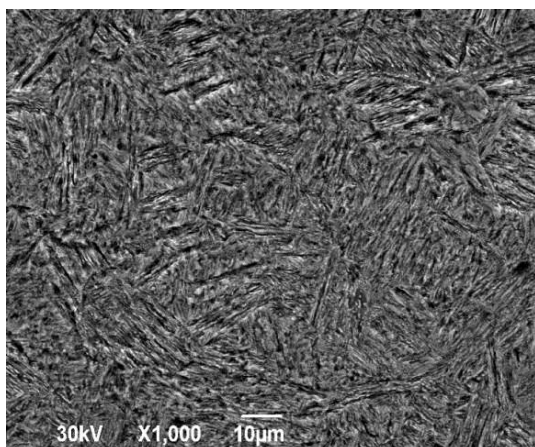
Метод замера/ хим. элемент	C, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Fe, %
Опτικο-эмиссионный спектрометр	0,067	14,3	5,34	0,8	79,49
ГОСТ	0,06	13,5-15	5,5-6	0,35-0,6	78,34-80,59

Из таблицы 4.3 видно, что содержание элементов находится в пределах ГОСТа, что говорит о высоком качестве сварного соединения.

Все образцы были проверены на наличие в них дефектов. Дефекты выявлялись двумя способами: визуально на микроскопе и рентгеновскими снимками. Визуально - на оптическом микроскопе, при увеличении в до 400X.

Отсутствие ярко выраженной, характерной зоны термического влияния (ЗТВ) на исследуемом образце свидетельствует о достаточно высокой структурной и физико-механической однородности сварных соединений из исследуемых сталей.

Микроструктура сварного шва на участке №15 представлена на рис. 4.7.



а) структура основного металла

б) структура сварного шва

Рисунок 4.7 - Микроструктура образца после сварки

Как видим из рис. 4.7а, структура мартенситного класса, а на рис. 4.7б видна крупнозернистая структура в сварном шве, характерная для высоколегированных сталей.

После ЭЛС, структура представлена двумя фазами: аустенит (гранцентрированная кубическая решетка) и α - Fe (объемно-центрированная кубическая решетка). Сталь 06X15H6BMФБ относится к аустенитно-мартенситному классу.

В таблице 4.4 представлены дефекты на каждом из образцов.

Таблица 4.4 - Режимы сварки стали 06X15H6BMФБ

№ образца	Скорость сварки, мм/с	Ток луча $I_{л}$, мА	Ток фокусирующей линзы $I_{ф}$, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Выявленные дефекты
1	3	35	728	60	Непровар 7%, зашлакованность
2		35	732		Зашлакованность
3		35	736		Непровар 15%, Зашлакованность
4		40	728		Зашлакованность
5		40	732		Зашлакованность
6		40	736		Зашлакованность
7		40	744		Непровар 8%
8		40	740		Зашлакованность, поры
9		45	740		Отсутствуют
10		45	736		Отсутствуют
11		45	732		Отсутствуют
12		45	728		Отсутствуют
13		48	728		Отсутствуют
14		48	732		Отсутствуют
15		48	736		Отсутствуют
16		52	728		Прожоги
17		52	732		прожоги

В результате исследования образцов, были выявлены такие дефекты как: непровар, неоднородности в виде шлака, несплавления и поры. Все эти дефекты присутствуют в нижней области шва.

При визуальном осмотре шлифов, вырезанных с образца-имитатора сварного шва выявлено, что ширина сварной ванны меняется от 5,6 мм до 7,5 мм, что значительной степени обусловлено изменением тока фокусирующей линзы.

Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва и бездефектное соединение получены при скорости сварки 3 мм/с на образце №15 (таблица 4.5).

Таблица 4.5 - Оптимальные параметры для сварки стали 06X15H6BMФБ

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

Микроструктура с геометрическими параметрами сварного шва на режимах таблицы 4.5 представлены на рис. 4.8.

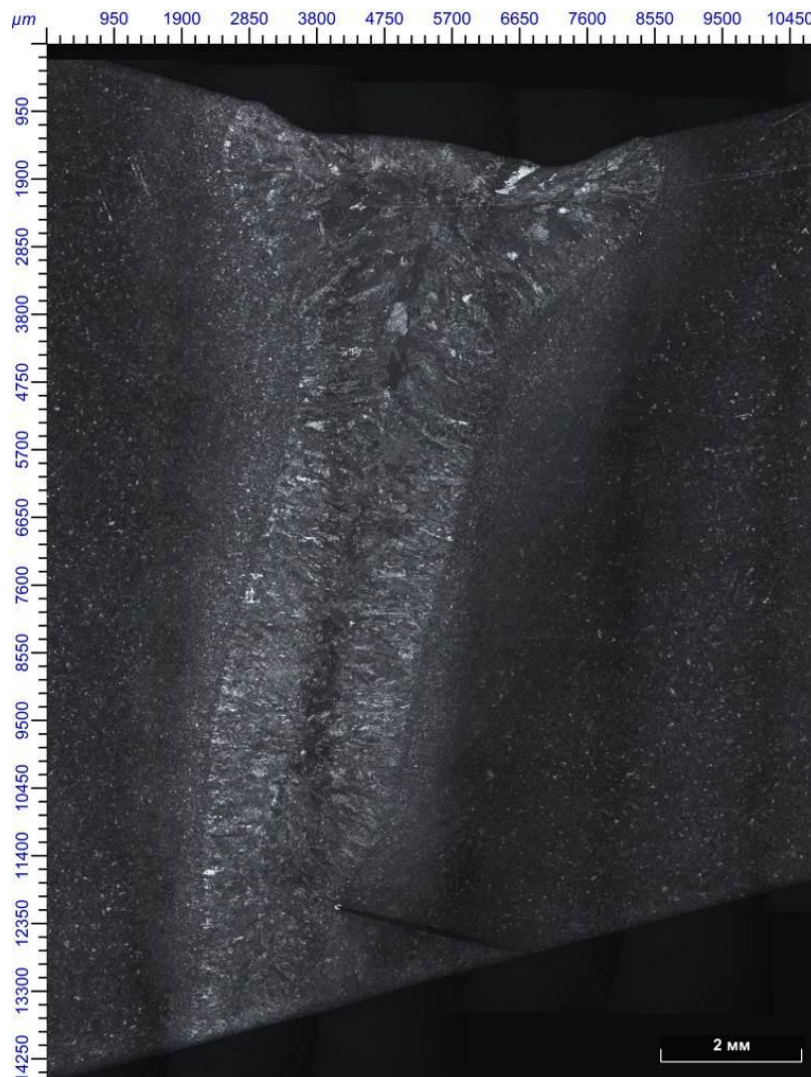


Рисунок 4.8 - Сварной шов

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

Выводы по главе 4:

По результатам проведенных исследований режимов ЭЛС и их влияния на формирование структуры, состав и свойства сварных швов и образование дефектов в них, можно сделать следующие выводы:

1. С возрастанием тока фокусирующей линзы увеличивается ширина ванны сварного шва, а глубина уменьшается.

2. Глубина сварного шва увеличивается с увеличением тока луча, который определяет мощность в электронном пучке.

3. Рентгенографический контроль и материаловедческое исследование микроструктуры сварных швов позволило выявить дефекты такие как: непровар, несплавление, неоднородность и трещины. Дефекты имеют все образцы с током луча $I_{\text{л}}=35, 40$ и 52 мА.

4. Результаты измерения микротвердости показали, что в отличие от основного металла, в сварном шве твердость изменилась от 302 НВ, кг/мм² до 360 НВ, кг/мм².

5. Результаты проведенного микроанализа показали, что химические элементы сплава 06Х15Н6ВМФБ в сварном шве и в основном металле, распределены одинаково, что говорит о высоком качестве ЭЛС.

6. Оптимальными режимами электронно-лучевой сварки является $I_{\text{л}}=48$ мА и $I_{\text{ф}}=728$ мА.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Жаропрочные сплавы на основе никеля, наряду с высокой жаропрочностью и окислительной стойкостью обладают повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах (газовая, соляная и жидкометаллическая) и применяются при изготовлении деталей, работающих при температурах не более 1100 °С. Никелевые сплавы делятся на две группы: гомогенные нетермоупрочняемые и гетерогенные термоупрочняемые дисперсионным твердением.

Дисперсионно-твердеющие термоупрочняемые сплавы на основе никеля в зависимости от проведенных термических обработок, имеют несколько состояний. Сплавы после закалки, имеют малую жаропрочность, но большую пластичность, что способствует, например, лучшей штамповке. После операции старения пластичные свойства сплава становятся минимальными, а жаропрочность достигает максимального значения и линейно зависит от химического состава и объема упрочняющих фаз. Чаще всего данную операцию проводят на конечной стадии изготовления изделия.

В современном двигателестроении для изготовления силовых элементов, работающих при высоких температурах наряду с другими материалами, применяются жаропрочные сплавы типа ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД.

Сплав ХН45МВТЮБР-ИД – жаропрочный дисперсионно твердеющий на никелевой основе с интерметаллидным упрочнением. Сплав используется при изготовлении камер сгорания авиационных двигателей.

Основой сплава является аустенитный твердый раствор системы никель-железо-хром, легированный Mo, W, Mn, Nb Al Ti и другими элементами. Упрочняющей фазой является γ' фаза на основе $(Ni, Fe, Cr)_3(Ti, Al, Nb, Mo, W)$. Кроме γ' - фазы в структуре аустенита сплава присутствуют включения карбидной и нитридной фаз [142].

Упрочнение сплава производится путем двойного старения, при 780-820°C - 5 часов, воздух + 650-700 °C – 10 часов.

Сплав сохраняет высокие жаропрочные свойства при $t=600-800^{\circ}\text{C}$.

При испытании сплава в течение 1000-1300 часов при 700 °C и напряжении 30 кг/мм² в структуре было отмечено большое количество упрочняющей фазы, границы зерен были утолщены.

Сплав ХН67ВМТЮ-ВД – жаропрочный дисперсионно твердеющий на никелевой основе с интерметаллидным упрочнением. Деформируемый сплав, имеет равноосную структуру. Температура начала интенсивного окисления 1000 °C. Используется при изготовлении лопаток, корпусов, дисков, листовых деталей турбин, а также сварных изделий, работающих при температурах до 800 °C.

Основную роль в обеспечении жаропрочности сплавов на никелевой основе обеспечивает наличие γ' - фазы, суммарное содержание которой сопоставимо с содержанием Ti + Al или Nb + Al. При суммарном содержании (Ti, Al) > 8 % доля γ' - фазы достигает 60% (по массе). Под γ' - фазой понимают интерметаллиды типа Ni₃(Ti, Al), Ni₃Al, Ni₃(Nb, Al), которые имеют ГЦК - решетку. Они взаимосвязаны между собой, выпадают в объеме матрицы при старении и обеспечивают дисперсное твердение сплавов.

В легированных сплавах γ' - фаза представлена сложным составом, так как никель и алюминий могут быть заменены другими элементами. γ' - фаза положительно влияет на механические свойства, ее выделение происходит в объеме зерна при температурах 600 - 950 °C и представлена большим числом мелкодисперсных частиц. Также, γ' - фаза создает эффективные барьеры для движения дислокаций, но является более пластичной чем карбиды, а предел прочности ее увеличивается с ростом температуры [143].

Помимо основных фаз, возможно появление ряда побочных некогерентных фаз, которые, выделяясь по границам зерен вследствие сегрегации или ликвации,

приводят к охрупчиванию сплавов: η - фаза (Ni_3Ti), σ - фаза (FeCr), карбиды (Me_{23}C_6 и Me_6C), бориды (Me_3B_2) [144].

После старения при повышенных температурах сплавы имеют промежуточные величины жаропрочности и пластичности из-за того, что происходит коагуляция упрочняющих фаз.

5.1 Закономерности формирования сварных швов из жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД

Использование ручных способов сварки этих сплавов сводит к минимуму их преимуществ перед ранее применявшимися сплавами. Ручная аргонно-дуговая сварка этих сплавов с присадкой весьма трудоемка и не обеспечивает стабильное качество получаемых соединений.

При анализе физической сущности процесса электронно-лучевой сварки выявлены основные параметры режима, определяющие условия этого процесса и в итоге качество сварного соединения.

Основными параметрами при электронно-лучевой сварке следует считать ток луча, ток фокусирующей линзы, ускоряющее напряжение и скорость сварки.

Эти параметры определяют характер протекающих при сварке тепловых и металлургических процессов. Изменение хотя бы одного из них неизбежно сказывается на конечном результате сварки.

Для выполнения неразъемных соединений сплава ХН45МВТЮБР-ИД перспективно применение ЭЛС, которая обеспечивает минимальную ширину шва. Однако процесс электронно-лучевой сварки имеет ряд трудностей и нерешенных проблем в получении бездефектных сварных соединений, к числу которых можно отнести возможность образования в сварных соединениях трещин, пор, прожогов, вызывающих снижение надежности и эксплуатационных характеристик.

Большинство дефектов структуры, среди которых могут быть микротрещины, наблюдается в верхней части сварного шва, т.е. в той части шва,

где в процессе сварки тепловложение больше, а скорость охлаждения металла шва и ОШЗ меньше.

Для уменьшения количества карбонитридов по границам зерен металл свариваемых заготовок следует подвергать перед сваркой закалке, а процесс сварки вести с высокими скоростями охлаждения металла по всей высоте поперечного сечения шва.

Сварной шов должен быть узким с параллельными сторонами. Такая форма шва может быть получена при максимальной плотности энергии электронного луча [145, 148 - 151].

Первичная структура сплавов на никелевой основе типа ХН67ВМТЮ-ВД образуется в виде укрупнения столбчатых кристаллов, при росте которых происходит поглощение других, отрицательно направленных кристаллов и остановке их роста. Это свойственно никелевым сплавам при однофазной кристаллизации, ведет к увеличению балла зерна и ограниченной свариваемости.

Вторая особенность – большое количество легирующих элементов в расплаве, из-за чего по границе сварного шва и материала формируется ячеисто-дендритная структура, а в центре сварного шва – дендритная структура с ярко выраженной ликвацией.

Основной причиной ликвации является неоднородность химического состава, которая приводит к возникновению в сварном соединении менее эффективных интерметаллидных фаз по сравнению с теми, что имеются в основном материале. Из-за повышенной ликвации титана в зонах химической неоднородности при старении выделяется фаза Ni_3Ti , которая имеет меньшую жаропрочность и тугоплавкость по сравнению с γ' - фазой [146].

Третья особенность – при повышенных скоростях сварки в сварном соединении формируется “зона пониженной прочности” на стыке двух кристаллизационных фронтов с ярко выраженной зоной ликвации. При низких скоростях сварки по центру шва возникают осевые кристаллы, на границах

которых образуются области срастания боковых и осевых кристаллов, имеющие пониженные механические свойства.

Измененная структура в ЗТВ характеризуется следующими факторами:

- укрупненным зерном в гомогенных сплавах;
- растворением упрочняющей фазы в гетерогенных сплавах в зоне нагрева более 900 °С, которое выявлена по изменению микротвердости;
- оплавлением упрочняющих фаз в состаренных сплавах;
- перестариванием (при сварке состаренных сплавов), которое приводит к увеличению упрочняющей фазы.

В зависимости от продолжительности высокотемпературного нагрева, исходного состояния материала и химического состава идет прогрессирование указанных факторов, которые определяют стабильность упрочняющей фазы при нагреве.

При сварке гетерогенных дисперсионно-твердеющих сплавов велика вероятность появления горячих трещин в околошовной зоне, а не в сварном шве.

Для предупреждения горячих трещин применяют следующие металлургические способы:

- повышают чистоту сплавов по содержанию вредных примесей (переплав, гранульная металлургия);
- при прокатке сплавов ограничивают полноту рекристаллизации, что позволит начать рекристаллизацию в процессе получения сварного шва и, соответственно, понизить сегрегацию в условиях ускоренного перемещения границ зерен в околошовной зоне при сварке;
- сварку изделий выполнять в закаленном состоянии. В этом случае, при постоянном химическом составе сварного шва, значения скорости кристаллизации в аустенитизированном состоянии возрастает в 1,5 - 2 раза.

Технологические способы предотвращения трещин при сварке жаропрочных сплавов на никелевой основе:

- производить с минимальной погонной энергией (ЭЛС);
- на максимально возможной скорости;

- применять электромагнитные поля и другие внешние воздействия для уменьшения балла зерна первоначальной структуры;
- использовать теплопроводящую оснастку и охлаждающие среды [147].

5.2 Исследование свариваемости жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД

В данной главе рассмотрено повышение стабильности формирования сварных соединений жаропрочного сплава ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм за счет изменения различных энергетических и технологических параметров (тока луча, тока фокусировки, скорости сварки) и выбора оптимального режима электронно-лучевой сварки без технологического подкладного кольца и исследовано влияние режимов ЭЛС жаропрочного сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм без предварительного подогрева на склонность к образованию дефектов.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- изучался механизм проплавления сплава электронным пучком;
- выполнялось экспериментальное исследование зависимости режима сварки на качество и стабильность формирования сварных соединений при электронно-лучевой сварке;
- исследовалась структура и свойства сварных соединений.

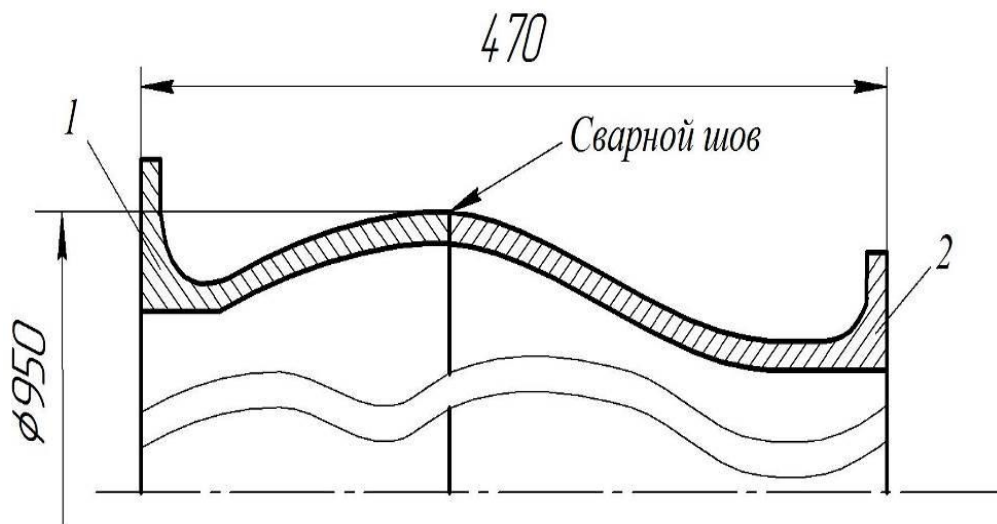
В работе приведены экспериментальные данные исследований по электронно-лучевой сварке сплава ХН45МВТЮБР-ИД. Проведено металлографическое исследование полученных сварных соединений, изучены механические характеристики сварных соединений в зависимости от режимов сварки, структура и химический состав.

При поступлении сплава ХН45МВТЮБР-ИД, перед запуском в производство, был проведен 100 % контроль марки материала в состоянии

поставки. В ЦЗЛ был проведен химический анализ образца от плавки на содержание углерода, никеля, хрома, молибдена, вольфрама, титана, алюминия и ниобия. Также, на термообработанных образцах был произведен контроль предела прочности и относительного удлинения. При МГИ контролировали балл зерна.

Сварке образца-имитатора ХН45МВТЮБР-ИД предшествовала термическая обработка по режимам: закалка с 1050 °С, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе.

Отработку режима сварки производили на образце-имитаторе натурального узла (рис. 5.1). Образец-имитатор был разбит на 7 равных участков.



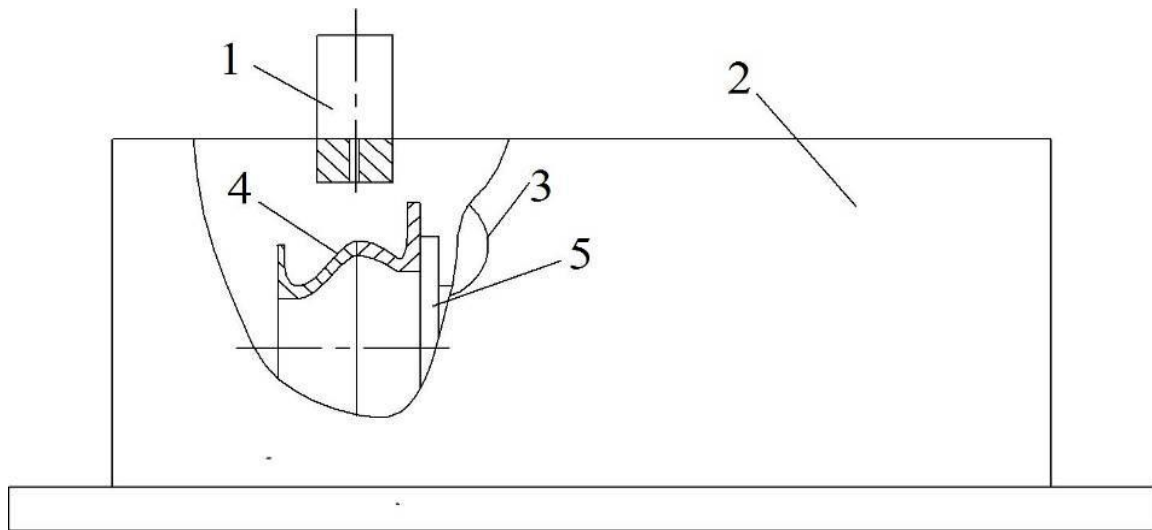
1 – нижняя часть, 2 – верхняя часть

Рисунок 5.1 - Эскиз образца-имитатора

Материал свариваемого образца-имитатора – сплав ХН45МВТЮБР-ИД, поставляемый по ТУ 14-1-3905-85. Основные структурные составляющие данного сплава – твердый раствор + интерметаллидные соединения типа $(Ni, Me)_3 (Al, Me)$ – γ' -фаза + карбиды типа $Me_{23}C_6$, карбиды титана – TiC , нитриды титана – TiN [152, 153].

Электронно-лучевая сварка выполнялась на установке ЭЛУ-11 (рис. 5.2). Контроль фокусировки электронного пучка производили на поверхности образца

по наибольшей яркости пучка при токе луча 1мА (I_0). Рабочее расстояние от пушки до образца составило 300 мм [154].



1- электронно-лучевая пушка; 2 – камера установки; 3 – смотровое окно, 4 – образец-имитатор; 5 – манипулятор

Рисунок 5.2. Принципиальная схема установки для электронно-лучевой сварки

При поступлении сплава ХН67МВТЮ-ВД, перед запуском в производство, был проведен 100 % контроль марки материала в состоянии поставки. В ЦЗЛ был проведен химический анализ образца от плавки на содержание углерода, меди, молибдена, вольфрама, титана, алюминия и железа. Также, был произведен контроль предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости и замер твердости по Бринеллю. МГИ на микрошлифах и макрошлифах не производили.

Сварку образцов выполняли на установке ЭЛУ-9Б с энергоблоком ЭЛТА-60/15 ДП. Контроль фокусировки электронного пучка производили на поверхности образца по наибольшей яркости пучка при токе луча 1мА (I_0). Рабочее расстояние от пушки до образца составило 200 мм.

Для исключения дефектов формирования сварного шва была применена технологическая подкладка из свариваемого материала толщиной 5 мм, установленная под кромки свариваемых деталей. Подкладка служит для формирования и защиты обратной стороны сварного шва. Значения тока луча, тока фокусировки и скорости сварки подбирали таким образом, чтобы в процессе

сварки на технологической подкладке получались отдельные точечные проплавления.

5.3 Особенности формирования и металлографическое исследование сварных соединений сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД

При металлографическом исследовании замерялись геометрические параметры шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД, полученного при различных значениях тока луча, тока фокусирующей линзы и скорости сварки. Результаты измерения геометрических параметров относительно каждого режима сварки приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Режимы сварки и параметры сварных швов

№ образца	Скорость сварки, мм/с	Ток луча, мА	Ток фокусирующей линзы, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Ширина верхней обл. св. шва, мм	Глубина сварного шва, мм	Выявленные дефекты
1	7	28	765	60	4,95	2,5	Непровар
2		28	776		5,9	3,6	Непровар
3		28	780		5,95	4,0	Непровар, поры
4		30	783		4,8	4,0	Отсутствуют
5	11	34	776		5,85	4,0	Пропплав
6		32	780		6,3	4,0	Пропплав
7		32	783		5,55	4,0	Пропплав

Из таблицы 5.1 видим, что ширина сварного шва количественно близка (4,8-5,95 мм), при токе фокусирующей линзы 780 мА ширина шва максимальная. При токе фокусирующей линзы 783 мА ширина шва минимальная и составила 4,8 мм. Величина проплава сварного шва возрастает с увеличением тока сварки и тока фокусирующей линзы. На необходимую нам глубину проварили образцы при токах более 30 мА и при токе фокусирующей линзы больше 760 мА.

Из таблицы 5.1 видно, что на образце №1 из-за малого тока сварки и тока фокусирующей линзы образовалось несплавление в корне шва и нехарактерная для ЭЛС форма неразъемного соединения.

На образце №2 ток фокусирующей линзы, по сравнению с образцом №1, был на 11 мА больше, вследствие чего, величина проплава возросла, но опять же получили непровар в корне шва, форма сварного соединения уже более характерная для ЭЛС, ширина шва составила 5,9 мм. На образце №3, по сравнению с образцами №1 и №2, получили более характерную форму электронно-лучевого шва, а также величину проплава больше предыдущих образцов, но данные параметры сварки не позволили получить сварное соединение без дефектов (образовался небольшой непровар), ширина шва составила 5,95 мм. На образце №4 ток фокусирующей линзы по сравнению с образцами №1-3 составил 783 мА, а ток луча - 30 мА. Это оказалось достаточным для того, чтобы проварить образец на всю глубину, ширина шва уменьшилась. На образцах №5, №6 и №7 сварное соединение имеет характерную форму для ЭЛС, кромки проварились на всю глубину. На всех образцах имеется проплав [155].

Исследование физико-механической однородности сварного соединения на образцах в целом оценивали методом измерения микротвердости основных его составляющих: основного металла, сварного шва в трех уровнях (на поверхности, в середине и в корне шва) и околошовной зоны (ОШЗ). Среднее значения замера микротвердости представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Микротвердость HV 0,05

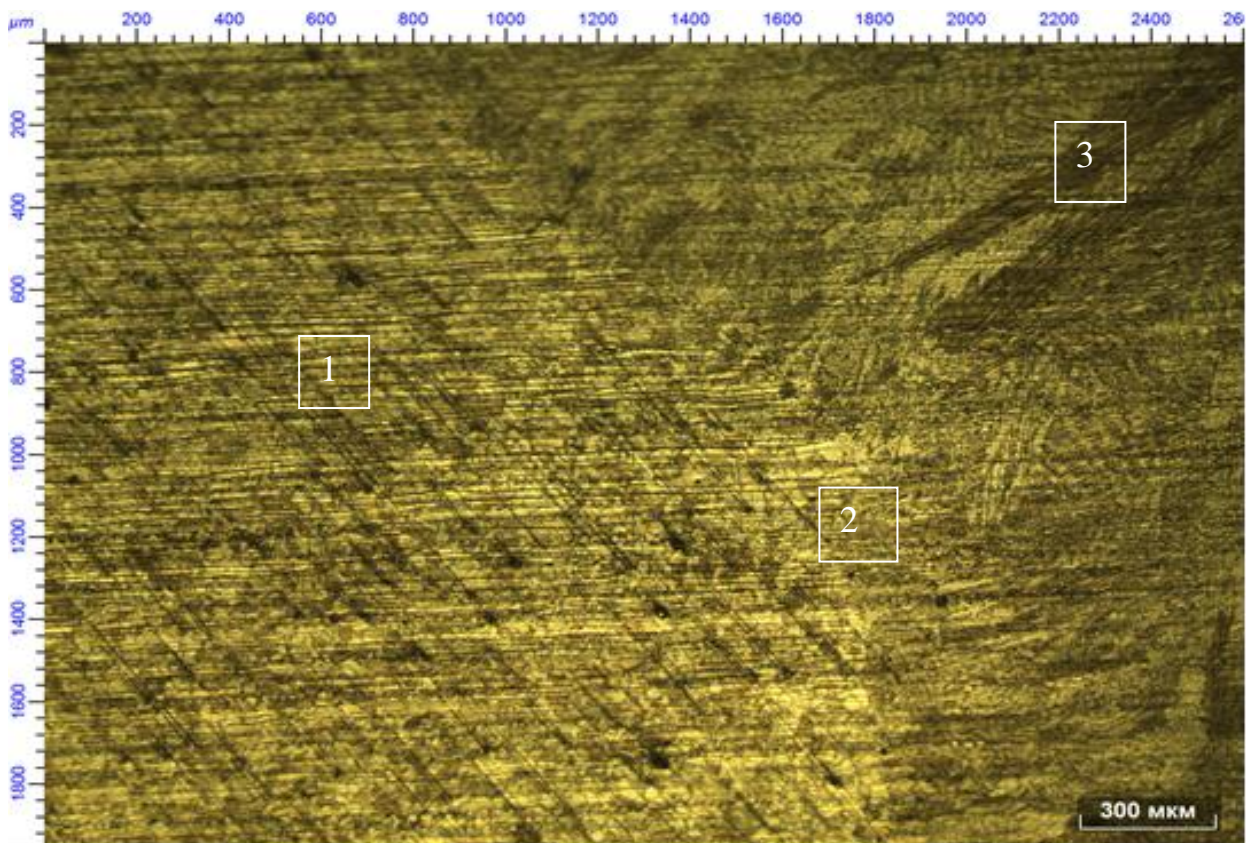
№ образца	Материал основы, HV, кг/мм ²	ОШЗ, HV, кг/мм ²	Сварной шов, HV, кг/мм ²		
			На поверхности	В середине	В корне шва
1	337	276	286	311	310
2	353	302	262	299	317
3	364	278	288	314	322
4	349	306	291	307	306
5	304	281	314	306	300
6	366	289	311	290	302
7	334	299	296	295	316

Из таблицы 5.2 следует, что характер распределения значений микротвердости по зонам сварного соединения из сплава количественно близок. 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.

Микротвердость металла всех зон сварных соединений после термообработки несколько выше, чем микротвердость металла соответствующих зон в нетермообработанных образцах, что связано с упрочнением сплавов в процессе старения за счет выделения интерметаллидной фазы γ' и, вероятно, небольшого количества боридной фазы типа Me_3B_2 .

На рис. 5.3 представлена микроструктура сварного шва при увеличении 90X.



1- основной материал, 2- ОШЗ, 3- сварной шов

Рисунок 5.3 - Макроструктура сварного шва

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

величина зерна соответствует № 7-8 шкалы ГОСТ 5639. Зона термического влияния по структуре не отличается от основного материала.

Была определена концентрация (в массовых %) химических элементов сварного шва материала сплава ХН45МВТЮБР-ИД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Содержание элементов

Метод замера/ хим. элемент	C, %	Cr, %	Ti, %	Al, %	Fe, %	W, %	Mo, %	Ni, %
Оптико-эмиссионный спектрометр	0,049	16,0	2,15	1,08	29,5	2,68	4,21	44,3
ГОСТ	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 5.3 видно, что содержание хрома, никеля и железа количественно одинаково и однородно. Это говорит о равномерном распределении элементов и высоком качестве сварного шва.

На электронном микроскопе была исследована микроструктура сварного шва на образце №4 (рис. 5.4).

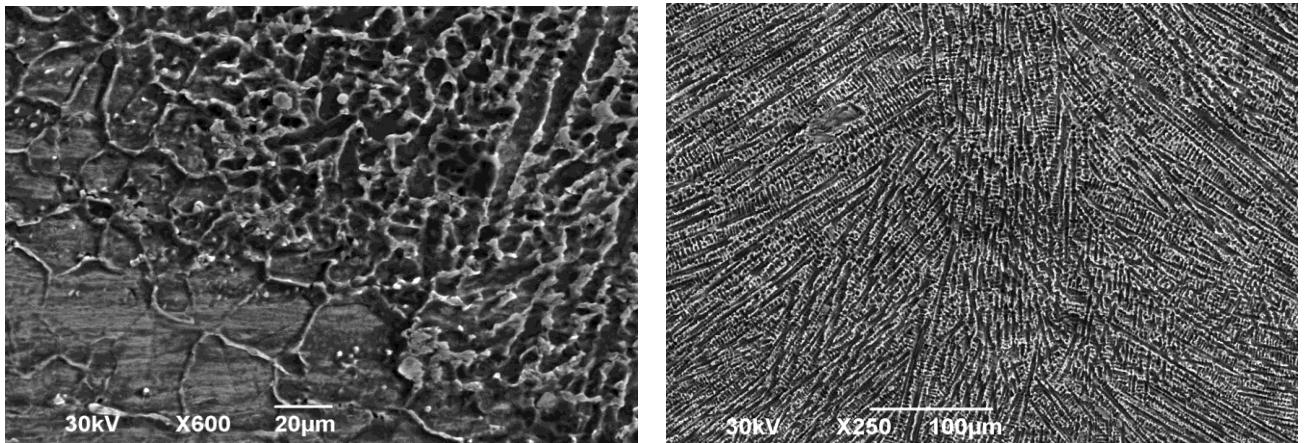


Рисунок 5.4 - Микроструктура образца после сварки основного металла в районе околошовной зоны (слева) и сварного шва (справа)

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 γ' - фаза.

По центру сварного шва видна столбчатая дендритная структура литого сплава. В микроструктуре сварного шва наблюдается повышенная травимость в околошовной зоне и увеличенное зерно до 7-8 балла по сравнению с основным материалом, где величина зерна соответствует 9 баллу шкалы ГОСТ 5639-82.

Основной металл сварных соединений из сплава ХН45МВТЮБР-ИД отличается ярко выраженной неоднородностью, полосчатостью структуры. Указанная неоднородность структуры сохраняется в ОШЗ, где наблюдается рост зерна.

По границам зерен, близко расположенных к металлу шва, в процессе термического цикла сварки могут располагаться ликвационные составляющие, отличающиеся высокой хрупкостью и легкой травимостью.

При травлении шлифов границы зерен сильно растравливаются и выглядят как трещины.

Кроме этого, большое количество карбонитридов и хрупкой ликвационной фазы по границам зерен при определенном уровне внутренних напряжений приводит в процессе сварки к образованию микротрещин.

Однако, дефектов макроструктуры в виде пор, трещин обнаружено не было.

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 5.4).

Таблица 5.4 - 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

Микроструктура с геометрическими параметрами сварного шва на режимах таблицы 5.4 представлены на рис. 5.5.

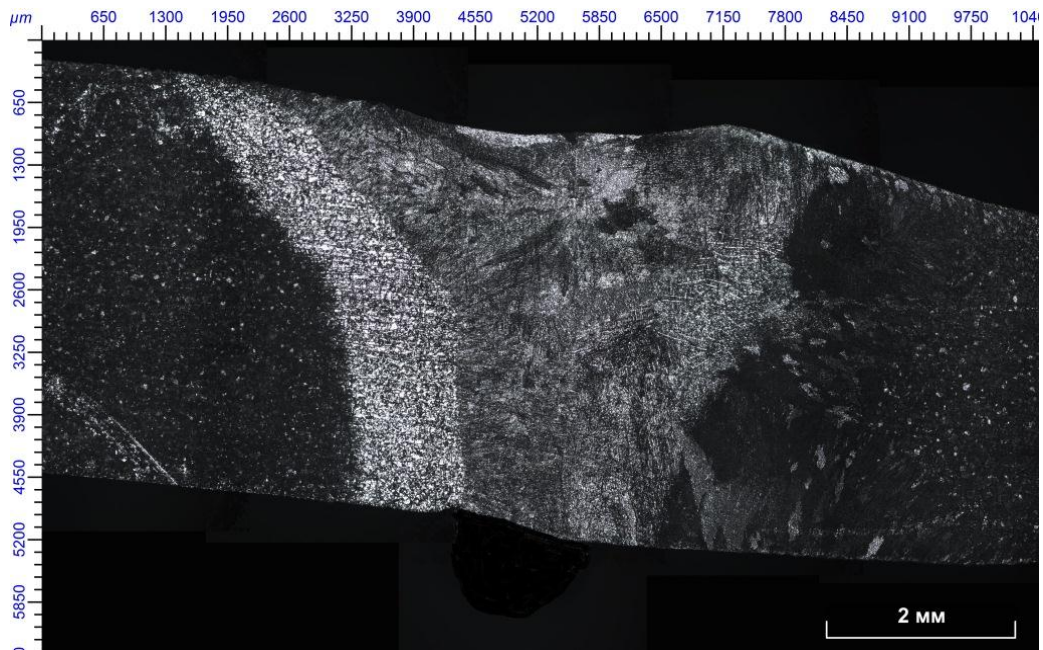


Рисунок 5.5 - Сварной шов

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

Склонность сплава ХН67ВМТЮ-ВД к образованию дефектов при ЭЛС исследовали при скоростях сварки 3 и 5 мм/с.

Как видно из таблицы 5.5, конфигурация сварного шва меняется: ширина шва уменьшается, поперечное сечение из конического переходит в более цилиндрическое [156, 157].

Таблица 5.5 - Результаты электронно-лучевой сварки образцов

№ образца	Скорость сварки, мм/с	Ток луча, мА	Ток фокус. I_{ϕ} , мА	Параметры сварного шва		Дефект
				Ширина ванны на поверхн./ корне, мм	Глубина провара, мм	
1	3	35	752	8,1/2,1	6,0	отсутствует
2		35	757	9,3/1,9	6,0	пора
3		35	767	11,8/1,6	6,0	пора
4	5	41	760	8,5/1,6	6,0	отсутствует
5		42	757	6,9/1,2	6,0	отсутствует
6		46	754	6,7/1,5	6,0	прожог
7		46	757	6,9/1,5	6,0	прожог

Из таблицы 5.5 видно, что 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. Исходя из этого, выбор наиболее оптимального режима произвели, исходя из минимального значения тока фокусирующей линзы (754 мА).

При сварке с технологической подкладкой, лицевой валик на исследуемых сварных швах сформирован на всех образцах без занижений и подрезов, кроме образцов №6 и №7.

Рентгенографическим контролем установлено, что на образцах №2 и №3 имеются поры. На образцах №6 и №7 наблюдаются подрезы сварного шва, что обусловлено завышенным током луча.

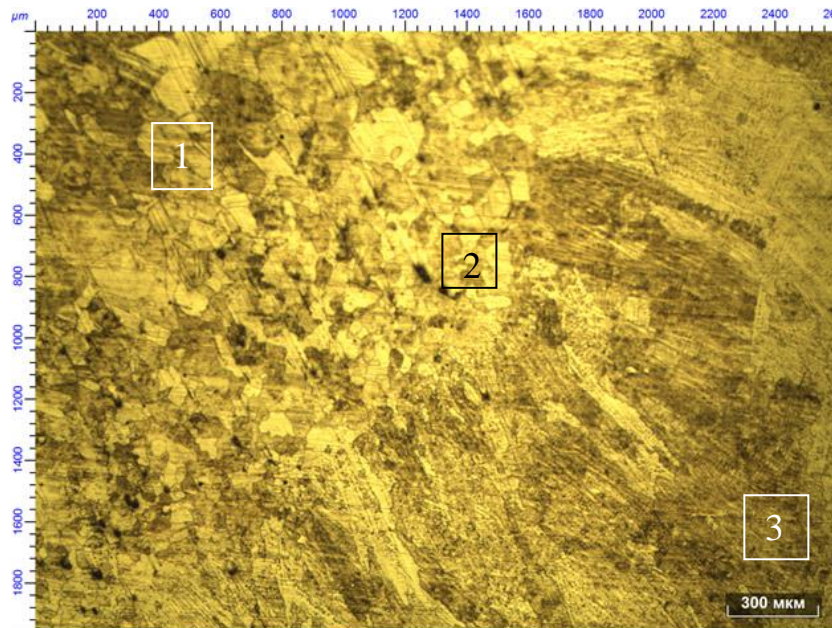
Для оценки качества сварки каждый из образцов подвергался разрезке и МГИ с определением параметров сварных швов, микротвердости и наличия дефектов.

Замер микротвердости производили на основном материале, в околошовной зоне (ОШЗ) и в литой зоне сварного шва. Результаты замеров микротвердости (средние значения) приведены в таблице 5.6. Замер микротвердости производился на приборе ПМТ-3М при нагрузке $P = 50$ г.

Таблица 5.6 - Микротвердость на образцах HV 0,05

№ образца	Микротвердость, HV, кГ/мм ²		
	Сварной шов	ОШЗ	Основной материал
1	291	287	295
2	293	292	291
3	294	298	296
4	294	292	292
5	294	290	295
6	298	289	292
7	292	289	297

На рис. 5.6 представлена микроструктура сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД при увеличении 85X.



1- основной материал, 2- ОШЗ, 3- сварной шов

Рисунок 5.6 - Микроструктура сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД

Сварной шов имеет столбчатую крупнокристаллическую структуру литого сплава. Непроваров, пор, трещин и других дефектов сварки не имеется. 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.

Для подтверждения содержания элементов, выявленных на растровом электронном микроскопе, была определена концентрация (в массовых %) химических элементов сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД на спектрометре ДФС-500. Результаты представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Содержание элементов

Метод замера/ хим. элемент	C, %	Cr, %	Ti, %	Al, %	Fe, %	W, %	Mo, %	Ni, %
Опτικο-эмиссионный спектрометр	0,04	17,7	2,57	1,49	1,18	4,50	4,71	67,81
ГОСТ	0,08	17-20	2,2-2,8	1-1,5	≤4	4-5	4-5	61,62-67,72

Из таблицы 5.7 видно, что содержание хрома, никеля, титана, вольфрама и железа в сварном шве сопоставимы с ГОСТ. Это говорит о высоком качестве сварного соединения.

На электронном микроскопе была исследована микроструктура сварного шва на образце №4 (рис. 5.7).

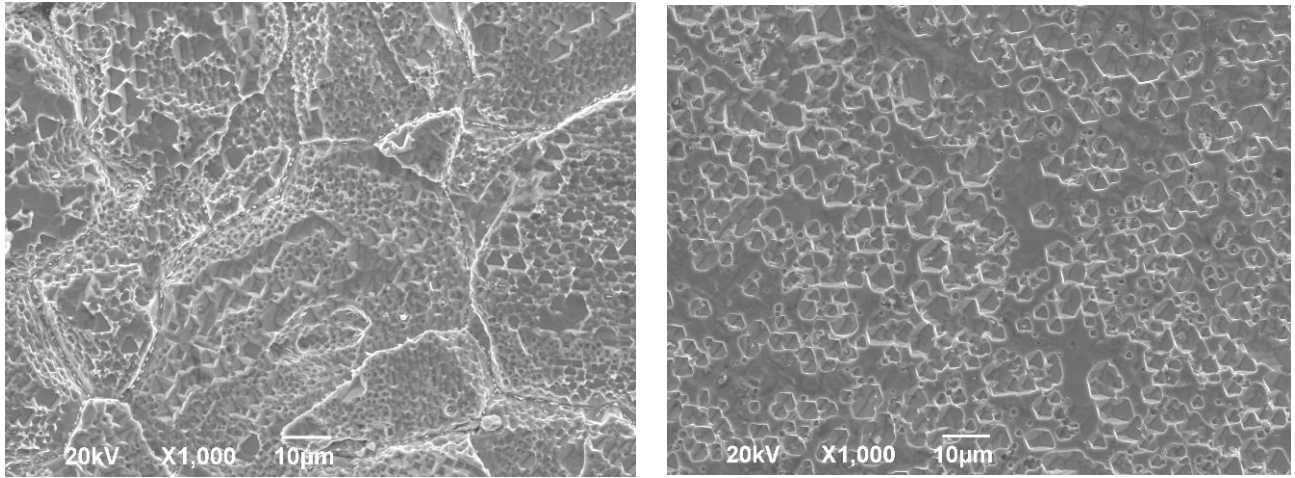


Рисунок 5.7 - Микроструктура образца после сварки: основного металла в районе околошовной зоны (слева) и сварного шва (справа)

Марки материала образцов были проверены методом спектрального анализа и соответствуют сплаву ХН67ВМТЮ-ВД.

Проведено МГИ микроструктуры сварного шва на образце №5. Литая зона сварного шва ХН67ВМТЮ-ВД + ХН67ВМТЮ-ВД сформирована с неоднородным составом – твердый раствор + упрочняющая фаза по границам зерен.

Величина зерна материала образца №5 соответствует 2 номеру шкалы ГОСТ 5639.

По результатам исследования макрошлифов оптимальным следует признать режим сварки для сплава ХН67ВМТЮ-ВД на образце №5 при скорости сварки 5 мм/с, на котором дефекты отсутствуют.

Из полученных результатов наиболее оптимальные геометрические параметры сварного шва сплава ХН67ВМТЮ-ВД и бездефектное соединение получено на образце №4 при скорости сварки 7 мм/с (таблица 5.8).

Таблица 5.8 - Оптимальные параметры для сварки

Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Параметры сварного шва	
		Ширина ванны, мм	Глубина провара, мм
42±1	757	6,7	6,0

Микроструктура с геометрическими параметрами сварного шва на режимах таблицы 5.8 представлены на рис. 5.8.

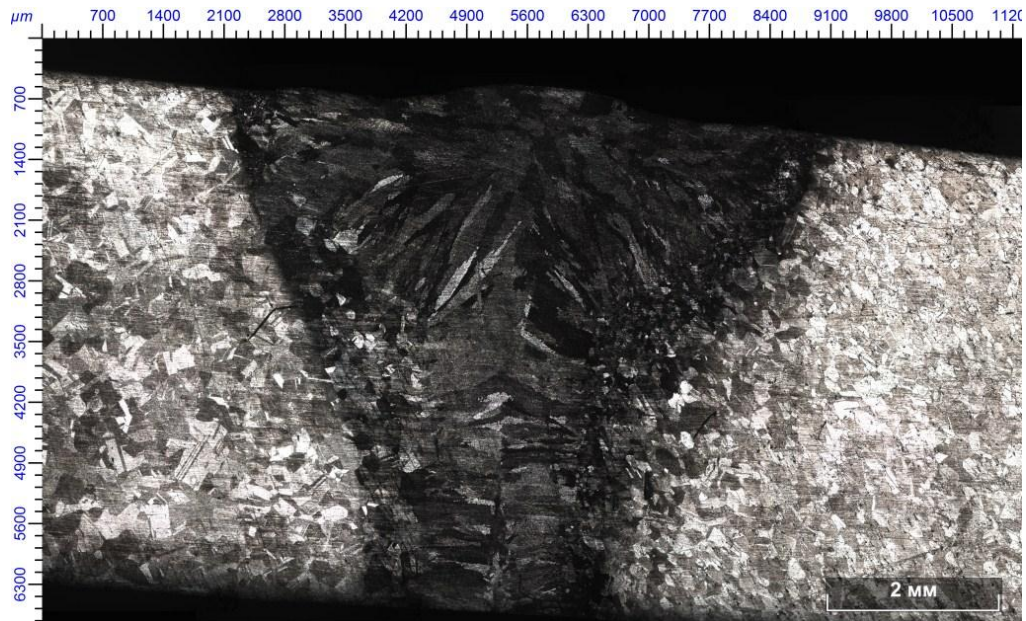


Рисунок 5.8 - Сварной шов

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

Выводы по главе 5:

В главе исследованы образцы сварных швов из жаропрочных сплавов ХН45МВТЮБР-ИД и ХН67ВМТЮ-ВД, полученные на разных режимах на электронно-лучевых установках ЭЛУ-11 и ЭЛУ-9Б. Определены геометрические параметры сварных соединений, исследована макро- и микроструктура и измерена микротвердость сварных соединений. Результаты комплексных исследований позволили выбрать оптимальный режим электронно-лучевой сварки.

На основе полученных результатов исследования структуры, состава и свойств материала сварных швов можно сделать следующие выводы:

1. Величина проплава сварного шва возрастает с увеличением тока сварки, который определяет мощность в электронном пучке.

2. В зоне сварного шва сплава ХН45МВТЮБР-ИД формируется мелкодисперсная дендритная структура. Основной металл имеет однородное крупнозернистое строение. В структуре наблюдаются карбонитриды и карбиды, а также мелкодисперсная интерметаллидная γ' – фаза.

3. При исследовании микроструктуры сварных соединений были выявлены такие дефекты как поры и установлена причина их появления.

4. Результаты замера микротвердости показали, что данный параметр в сварном соединении меньше, чем в основном металле.

5. На основании результатов материаловедческого исследования установлен оптимальный режим электронно-лучевой сварки сплава ХН45МВТЮБР-ИД толщиной 4 мм с параметрами: скорость сварки 7 мм/с, ток луча 28 мА, ток фокусировки 780 мА, при котором и не было выявлено дефектов.

6. Оптимальным режимом сварки сплава ХН67ВМТЮ-ВД толщиной 6 мм являются режим при токе сварки 42 мА, токе фокусирующей линзы 757 мА и скорости сварки 5 мм/с. Выбранные значения параметров сварки для стыкового соединения обеспечивают требуемое качество и размеры сварного шва.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

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 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 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, А.П. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей [Текст] / А.П. Васильев и [др.]; под ред. В.М. Кудрявцева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 703 с.
2. Володин, В.А. Конструкция и проектирование ракетных двигателей [Текст] / В.А. Володин. – М.: Машиностроение, 1971. – 336 с.
3. Туфанов, А.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов [Текст]: Справочник. 5-е издание / А.Г. Туфанов. - М.: Металлургия, 1990. - 464 с.
4. Волченко, В.Н. Сварка и свариваемые материалы [Текст]: В 3-х т. Т.П. Технология и оборудование. Справ, изд. / В.Н. Волченко; под ред. В.М. Ямпольского. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. - 574 с.
5. Патон, Б.Е. Основы технологии электронно-лучевой сварки [Текст] / Б.Е. Патон, Г.И. Лесков // Автоматическая сварка. - 2003. - №12. - С. 23–27.
6. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; под ред. Б.Е. Патона. - Киев: Наук. Думка, - 1987. – 256 с.
7. Драгунов, В.К. Прогнозирование режимов ЭЛС при изготовлении многошаговых конструкций [Текст] / В.К. Драгунов, М.С. Грибков, В.Н. Мартынов, А.Г. Сысоев // Сварочное производство. – 2015. - №1. – С. 20-22.
8. Терентьев, Е.В. Влияние скорости сварки на формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением [Текст] / Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.В. Щербаков // Сварочное производство. – 2014. – №2. – С.25-29.
9. Беленький, В. Я. Некоторые аспекты контроля процесса сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением [Текст] / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.В. Шварев // Сварка и диагностика. - 2010. - № 1. - С. 41-43.
10. Беленький, В.Я. Электронно-лучевая сварка [Текст]: монография / Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.Г. Колева. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. - 373 с.

11. Лаптенко, В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой [Текст] / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман. - Красноярск: САА, - 2000. – 234 с.
12. Браверман, В.Я. Вопросы управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев, В.П. Литвинов, О.В. Розанов // Вестн. Сиб. Гос. Аэрокосмич. Ун-та им. Акад М.Ф. Решетнева. – 2012. - №2. – С. 23-29.
13. Arata, Y. Theoretical analysis of weld penetration due to high energy density beam / Y. Arata, I. Miyamoto // Transactions of the JWRI. – 1972. – Т. 1, № 1. – P. 11-16.
14. Rai, R. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy / R. Rai, T.A. Palmer, J.W. Elmer, T. Debroy // Welding Journal. – 2009. - Vol. 88. - P. 54-61.
15. Tian, Y. Finite element modeling of Electron Beam Welding of a large complex al alloy structure by parallel computations / Y. Tain, C. Wang, D. Zhu, Y. Zhou // Journal of materials processing technology. - 2008. – Vol. 199. - P. 41-48.
16. Yilbas, B.S. Introduction into the electron beam welding of austenitic 321-type stainless steel / B.S. Yilbas, M. Sami, J. Nickel, A. Coban, S.A.M. Said // J. Mater Process Tech. -1998. - Vol. 82. - P. 13–20.
17. Фахрутдинов, И.Х. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива [Текст]: учебник для машиностроительных вузов / И.Х. Фахрутдинов, А.В. Котельников. - М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
18. Cannon, J.L. Turbomachinery for Liquid Rocket Engines / J.L. Cannon // Liquid propulsion systems - evolution and advancements, american institute of aeronautics and astronautics professional development short course. 2003.
19. Ерохин, Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ [Текст]: учебник для высших технических учебных заведений / Б.Т. Ерохин. - М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
20. Яскин, А.В. Конструктивные схемы РДТТ. Справочные материалы [Текст]: учебное пособие по дисциплине «Основы конструирования ракетных

двигателей» для студентов специальности 130400 / А.В. Яскин, С.Н. Вагичев. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. - Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2005. - 67 с.

21. Яскин, А.В. Конструкции и обработка ракетных двигателей на твёрдом топливе [Текст]: учебное пособие / А.В. Яскин. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 200 с.

22. Дюнзе, М.Ф. Ракетные двигатели твёрдого топлива для космических систем [Текст] / М.Ф. Дюнзе, В.Г. Жимолохин. - М.: Машиностроение, 1982. - 160 с.

23. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учебник для студентов высших технических учебных заведений [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин; под редакцией В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.

24. Kindermann, R. Advanced production and process technologies for current and future thrust chambers of liquid rocket engines / R. Kindermann, S. Beyer, T. Sebald, C. Hollmann, B. Denkena, T. Friemuth, M. Kaufeld, U. Kolb. // 4th International conference on launcher technology. Liege. 2002.

25. Волков, Е.Б. Жидкостные ракетные двигатели [Текст] / Е.Б. Волков, Л.Г. Головков, Т.А. Сырицын. – М.: Воениздат, 1970. – 592 с.

26. Воробей, В.В. Технология производства жидкостных ракетных двигателей [Текст] / В.В. Воробей, В.Е. Логинов. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.

27. Горев, И.И. Основы производства жидкостных ракетных двигателей [Текст] / И.И. Горев. – М.: Машиностроение, 1969. – 356 с.

28. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования / М.В. Добровольский; под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 с.

29. Мошкин, Е.К. Динамические процессы ЖРД [Текст] / Е.К. Мошкин. – М.: Машиностроение, 1964. – 256 с.

30. Никитин, А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов [Текст] / А.Н. Никитин. – М.: Машиностроение, 1982. – 269 с.

31. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей [Текст] / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1981. – 552 с.
32. Хронин, Д.В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебник [Текст] / Д.В. Хронин, С.А. Вьюнов, Ю.И. Гусев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
33. Паллей, З.С. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / З.С. Паллей, И.М. Королёв, Э.В. Ровинский. – М.: Транспорт, 1967. – 426 с.
34. Берне, Л.П. Отечественные авиационные двигатели – XX век [Текст] / Л.П. Берне, Д.А. Боев, Н.С. Ганшин. – М.: Авико Пресс, 2003. – 304 с.
35. Зрелов, В.А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы [Текст]: учеб. пособие / В.А. Зрелов. – Самара: СГАУ, 2002. – 415 с.
36. Данильченко, В.П. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.В. Ковылов [и др.]. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – 619 с.
37. Воробей, В.В. Технология производства жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учебник / В.В. Воробей, В.Е. Логинов. – М.: Изд-во МАИ, 2001. - 496 с.
38. Shelley, J.S. Metal-matrix composites for liquid rocket engines / J.S. Shelley, R. LeClaire, J. Nichols // JOM. - 2001. - Vol. 53, No. 4. - P. 18-21.
39. Wadle, M.F. Comparison of high aspect ratio cooling channel designs for a rocket combustion chamber with development of an optimum design / M.F. Wadle. NASA/TM-1998-206313. - 1998. – P. 12-16.
40. Барвинок, В.А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов [Текст] / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, П.А. Бордаков и др.; под ред. В.А. Барвинка. – М.: Машиностроение, 1996. - 576 с.

41. Meinert, J. Turbulent boundary layers with foreign gas transpiration / J. Meinert, J. Huhn, E. Serbest, O.J. Haidn // Journal of spacecraft and rockets. – 2001. Vol. 38, № 2. - P. 191-198.
42. Салахутдинов, Г.М. Развитие методов теплозащиты жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Г.М. Салахутдинов. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
43. Авиационные материалы. Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы [Текст]. – М.: ОНТИ, 1975. – Том 2. - С.45-51.
44. Беленький, В.Я. Электронно-лучевая сварка высокопрочных сталей с бронзой с использованием динамического позиционирования электронного пучка [Текст] / В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов, Т.В. Ольшанская, А.А. Абдуллин, Г.М. Младенов, Е.Г. Колева, С. И. Быков // Сварка и диагностика. - 2014. - № 1. - С. 48-50.
45. Выбор материалов для деталей ДЛА [Текст]: Метод. указания к курс. и дипл. проектированию (с приложением) // Куйбышев. авиац. ин-т.. – Куйбышев. 1984.
46. Cao, W.D. Role of chemistry in 718 – type alloys – allvac 718 plus™ alloy development / W.D. Cao, R. Kennedy // Superalloys. – 2004. - P. 91-99.
47. Serbest, E. Advanced technologies and materials for future liquid rocket engines / E. Serbest, O.J. Haidn, H. Hald, G. Korger, P. Winkelmann, K. Fritscher // 12th European aerospace conference. - Paris, 1999.
48. Ellis, D.L. GRCoP-84: a high-temperature copper alloy for high-heat-flux applications / D.L. Ellis. NASA/TM-2005-213566.
49. Пичугин, Д.Ф. Проектирование двигателей летательных аппаратов: учебное пособие [Текст] / Д.Ф. Пичугин. - Куйбышев: КуАИ, 1985. – 92 с.
50. Roberts, S.M. Nickel base superalloy welding models for residual stress, distortion and weldability: Recent advances in welding simulation / S.M. Roberts, O. Hunziker, D. Dye, H. J. Stone and R. C. Reed // I MechE seminar publication. – 2000. – № 13. - P. 33-43.

51. Benhadad, S. The influence of minor elements on the weldability of an Inconel 718 – type superalloy / S. Benhadad, N.L. Richards and M.C. Chaturvedi. Metallurgical and materials transactions. – 2002. – № 17.

52. Демидович, В.М. Исследование теплового режима ГТД [Текст] / В.М. Демидович. – М.: Машиностроение, 1978. – 171 с.

53. Henderson, M. B. Nickel based super alloy welding practices for industrial gas turbine applications / M. B. Henderson, D. Arrell, R. Larsson, M. Heobel and G. Marchant // Science and technology of welding and joining. – 2004. Vol. 9, №. 1. - P. 13-21.

54. Shinozaki, K. Welding and joining of Fe and Ni-base superalloys / K. Shinozaki // Welding international. – 2001. - Vol. 8, №. 15. - P. 593 - 610.

55. Крюков, Д.Б., Кривенков, А.О., Чугунов, С.Н., Козлов, Д.В. Особенности новых схем армирования композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением [Текст] / Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, П.С. Баканов, А.Н. Баранов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер.: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2016. №10 (189). - С. 72-75.

56. Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Баканов П.С., Баранов А.Н. / Использование высокоэнергетических методов воздействия для формирования заданного комплекса механических и теплофизических свойств композиционных материалов современной техники [Текст] / под ред. А.Д. Гулякова, Р.М. Печерской // Изд-во ПГУ. – Пенза: 2015. – Т. 2. – С. 130-131.

57. Hagemann, G. Advanced rocket nozzles / G. Hagemann, H. Immich, T.V. Nguyen, G.E. Dumnov // Journal of propulsion and power. – 1998. - Vol. 14, №.5. - P. 620 - 634.

58. Гольдштейн, М.И. Специальные стали [Текст] / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.

59. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов [Текст] / Г.П. Фетисов и др. – М.: Высш. школа, 2002. – 638 с.

60. Виноград, М.И. Металлургический контроль качества [Текст]: Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali / М.И. Виноградов, Г.М. Казичкин; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1983. - Т.1. – С. 320-322.
61. Борнацкий, И.И. Производство стали [Текст] / И.И. Борнацкий, В.Ф. Михнечев, С.А. Ярин. - М.: Металлургия, 1991 – 400 с.
62. Финкель, В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах [Текст] / В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
63. Штремель, М.А. Проблемы металлургического качества стали (неметаллические включения) [Текст] / М.А. Штремель // МиТОМ. - 1980. №8. - С. 2-6.
64. Хонрбоген, Е. Физическое металловедение сталей [Текст] / Е. Хонрбоген; под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена // Физическое металловедение. Фазовые превращения в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1987. - Т.2. - С. 493-549.
65. Гергиев, М.Н. Влияние величины зерна на сопротивление стали развитию трещины [Текст] / М.Н. Гергиев и др. // МиТОМ. - 1974. №2. - С. 44-45.
66. Карабасова, Ю.С. Сталь на рубеже столетий / под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.
67. Деев, Г. Ф. Дефекты сварных швов [Текст] / Г.Ф. Деев, И.Р. Пацкевич. - Киев: Наук. думка, 1984. - 208 с.
68. Калиниченко, Н.П. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла [Текст]: учебно-методическое пособие / Н.П. Калиниченко, М.А. Васильева. - Томск: изд-во ТПУ, 2006. – 55 с.
69. Юхин, Н.А. Дефекты сварных швов и соединений. Библиотечка сварщика [Текст]: иллюстрированное пособие / Н.А. Юхин. - М.: Изд. СОУЭЛО, 2007. - 56 с.
70. Новокщеновой, С.М. Дефекты стали [Текст]: справ. изд. / под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
71. Атлас дефектов стали [Текст] / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

72. Саломатова, Е.С. Моделирование температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке [Текст] / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 11. – С. 514-515.

73. Саломатова, Е.С. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке [Текст] / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. - 2015. - № 6. - С. 21-24.

74. Терентьев, Е.В. Влияние скорости сварки на свободное формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением [Текст] / Е.В. Терентьев, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.В. Щербаков // Сварочное производство. - 2014. - №2. – С. 25–29.

75. Саломатова, Е.С. Исследование процессов испарения при электронно-лучевой сварке [Текст] / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении: материалы 2-ой Международной науч. - практ. конф.. – Пермь: Изд-во ПНИПУ. - 2014. – С. 56-59.

76. Но, С.У. Fusion zone during focused electron-beam welding / Но, С.У. // Journal mater process tech. -2005. - Vol. 167. - P. 265–272.

77. Oltean, S.E. Advanced control of the Electron Beam Welding / S.E. Oltean, M. Abrudean // Control engineering and applied Informatics. – 2008. - Vol. 10. - P. 40-48.

78. Волченко, В.Н. Контроль качества сварки [Текст]: пособие и методики контроля / В.Н. Волченко. - М.: Машиностроение, 1975. - 328 с.

79. Троицкий, В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений [Текст] / В.А. Троицкий. – Киев: Феникс, 2006. - 320 с.

80. Панасенко, Н.Н. Контроль качества сварных конструкций: учебное пособие [Текст] / Н.Н. Панасенко, Д.И. Меркулов. – Астрахань: Астраханский государственный университет. Издательский дом «Астраханский университет», 2012. – 199 с.

81. Ольшанская, Т.В. Контроль качества сварных соединений [Текст] / Т.В. Ольшанская. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 157 с.

82. Матюнин, В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов [Текст]: пособие для научных и инженерно-технических работников / В.М. Матюнин. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 190-196.

83. Смирнов, А.Н. Неразрушающие и разрушающие испытания сварных соединений [Текст]: учебное пособие / А. Н. Смирнов. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. – 187 с.

84. Румянцева, С.В. Радиационные методы неразрушающего контроля [Текст] / С.В. Румянцева. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.

85. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений [Текст]: учебное пособие / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. — 368 с.

86. Ульянин, Е.А. Высоколегированные коррозионно-стойкие сплавы [Текст] / Е.А. Ульянин. - М.: Металлургия, 1987. - 215 с.

87. Ульянин Е.А. Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля [Текст] / Е.А. Ульянин. - М.: Металлургия, 1986. - 287 с.

88. Томашов Н.Д. Коррозия и коррозионностойкие сплавы [Текст] / Н.Д. Томашов, Г.А. Чернов. - М.: Металлургия, 1973. - 231 с.

89. Авиационные материалы. Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы [Текст]. – М.: ОНТИ, 1975. - Том 3. - С.189-190.

90. Богомолова, Н.А. Практическая металлография [Текст]: учебник для технических училищ / Н.А. Богомолова. - М.: Высш. школа, 1978. – 272 с.

91. ГОСТ 5639-82 Методы выявления и определения величины зерна. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 1982. – 22 с.

92. ГОСТ 8233-56 Сталь. Эталоны микроструктуры. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 1956. – 12 с.

93. ГОСТ 1778-84 Металлографические методы определения неметаллических включений. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2011. – 24 с.

94. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2011. – 35 с.
95. Берштейн, М.Л. Структура и механические свойства металлов [Текст] / М.Л. Берштейн, В.А. Займовский. - М.: Металлургия, 1970. – 742 с.
96. Золотаревский, В.С. Механические свойства металлов [Текст] / В.С. Золотаревский. - 3-е изд., перераб. и доп.. - М.: МИСИС, 1998. - 400 с.
97. Шарая, О.А. Механические свойства материалов [Текст]: учебное пособие / О.А. Шарая, В.Ю. Куликов, В.И. Шарый. - Караганда: КарГТУ, 2004. – 89 с.
98. Бернштейн, М.Л. Механические свойства металлов [Текст]: учебник / М.Л. Бернштейн, М.А. Займовский. - 2-е изд., перераб. и доп.. - М.: Металлургия, 1979. - 496 с.
99. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной температуре, комнатной и повышенной температура Металлографические методы определения неметаллических включений. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 1978. –12 с.
100. Тимощук, Л.Т. Механические испытания металлов [Текст] / Л.Т. Тимощук. - М.: Металлургия, 1971. – 224 с.
101. Сударикова, Е.В. Неразрушающий контроль в производстве [Текст]: учебное пособие Ч.2. / Е.В. Сударикова. - СПб.: ГУАП, 2007. - 112 с.
102. Зуев, В.М. Радиографический контроль сварных соединений [Текст] / В.М. Зуев, Р.Л. Табакман, Ю.И. Удралов. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд.. 2001. – 148 с.
103. Троицкий, В.А., Попов В.Ю. Ультразвуковой контроль сварных соединений [Текст] / В.А. Троицкий, В.Ю. Попов. - К.: Феникс, 2010. - 224 с.
104. Щербинский, В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений [Текст] / В.Г. Щербинский. - М.: Тиссо, 2005. – 326 с.
105. Ластовиря, В.Н. Оборудование для обработки материалов электронным пучком (основные принципы построения) [Текст]: учебное пособие / В.Н. Ластовиря. - М.: Издательство МЭИ, 1997. – 130 с.

106. Ластовиря, В.Н. Оборудование для обработки материалов концентрированными потоками энергии [Текст]: учебное пособие / В.Н. Ластовиря, М.А. Каримбеков, А.Л. Гончаров; под ред. В.М. Качалова. - М.: Издательство МЭИ, 2006. – 34 с.

107. Лебедев, В.К. Машиностроение. Энциклопедия [Текст] / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Чвертко и др; под ред. Б.Е. Патона. - 2-е изд., исправ.. - М.: Машиностроение, Оборудование для сварки, 2002. - Т. IV-6. - С. 327-369.

108. Кайдалов, А.А. Сварочные электронные пушки (инженерно-техническое описание и инструкция по эксплуатации сварочных электронных пушек УЛ-119, ЭЛА-15, ЭЛА-30, ЭЛА-60/60, ЭЛА-60Б) [Текст] / А.А. Кайдалов, Е.И. Истомин - Киев: НТК «ИЭС им. Е.О.Патона» НАНУ, 2003. – 153 с.

109. Зуев, И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии [Текст] / И.В. Зуев. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 162 с.

110. Алехнович, В.Н. Электронно-лучевая обработка материалов [Текст] / В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь. - Минск: Белорусская наука, 2006. – 318 с.

111. Мурыгин, А.В. Управление процессом электронно-лучевой сварки с использованием информационных свойств плотности распределения электронного пучка [Текст]: автореферат дисс. на соис. уч. степени докт. техн. наук: 05.13.06. / Мурыгин Александр Владимирович. – Красноярск, 2006. - 48 с.

112. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии [Текст] / А. А. Кайдалов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Экотехнология, 2004. – 259 с.

113. Hashimoto, T. Effect of welding variables and materials upon bead shape in electron beam welding / T. Hashimoto, E. Matsuda // Trans. nat. res. inst. met. – 1965. – Vol. 7, № 3. – P. 96–109.

114. Саломатова, Е.С. Влияние параметров режимов сварки на изменения химического состава сварных соединений при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча [Текст] / Е.С. Саломатова, Т.В. Олышанская, Д.Н.

Трушников, В.Я. Беленький, Г.М. Младенов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2015. - Т. 17, № 4. - С. 29-42.

115. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка [Текст] / О.К. Назаренко, Е.И. Истомин, В.Е. Локшин. - М.: Машиностроение, 1966. - 128 с.

116. Kolenic, F. Einfluß der elektronenstrahlfokussierung auf form und tiefe der schweißnaht / F. Kolenic, M. Kosecek // Schweißen und schneid. - 1992. - № 11. - P. 606–608.

117. Mauer, K.O. Untersuchungen zum ionenstrom und elektronenruckstreustrom beim elektronenstrahlschweissen / K.O. Mauer // Zis. mitt. - 1979. - №11. - P. 299–312.

118. Акопьянц, К.С. Влияние собственного магнитного поля сварочного электронного пучка на его фокусировку [Текст] / К.С. Акопьянц, Ю.В. Зубченко, А.А. Кайдалов [и др.]. // Информ. письмо. ИЭС; №18. - Киев. - 1975. - 4 с.

119. Fu, P.F. Analyses of dynamics of focus of an electron beam at electron beam welding / Fu Peng-fei, Wang Ya-jun, Mao Zhi-yong, Gong Shui-li, Wang Chun-ming // Hangkong cailiao хuebao. - 2009. - Т. 29, № 4. - P. 38 – 41.

120. Halsted, A.S. Electrostatic and magnetic pinch effect in beam-generated plasmas / A.S. Halsted // Journal of appl. phys. - 1966. - Т. 37, № 4. - P. 710–720.

121. Назаренко, О.К. Влияние рабочего расстояния сварочной электронной пушки на геометрию сварочного шва [Текст] / О.К. Назаренко, В.И. Загорников // Автоматическая сварка. 2010. №5. - С. 32–35.

122. Rai, R. Modeling of heat transfer and fluid flow in keyhole mode welding / R. Rai // Ph.D.Disseration. The Pennsylvania State University. 2008.

123. Казаков, Ю.В. Сварка деталей с большой разницей толщин [Текст]: монография / Ю.В. Казаков. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2013. – С 108-117.

124. Медовар, Б.И. Сварка аустенитных хромоникелевых сталей [Текст] / Б.И. Медовар. – М.: Машгиз, 1958. – 337 с.

125. Каховский, Н.И. Сварка нержавеющей сталей [Текст] / Н.И. Каховский. – Киев: Техника, 1968. – 309 с.

126. Прохоров, Н.Н. Горячие трещины при сварке [Текст] / Н.Н. Прохоров. - М.: Машгиз, 1952. -224 с.

127. Будкин, Ю.В. Электронно-лучевая сварка тонкостенных конструкций из разнородных металлических материалов [Текст] / Ю.В. Будкин // Сварочное производство. – 2009. - №11. - С. 37-42.

128. Мурыгин, А.В. Контроль распределения плотности тока электронного пучка в процессе электронно-лучевой сварки [Текст] / А.В. Мурыгин // Сварочное производство. - 2006. - № 7. - С. 8–14.

129. John, C.L. Welding metallurgy and weldability of stainless steels / C.L. John, J.K. Damian // Wiley Publications. 2011.

130. Hegeman, J.B.J. Tensile properties of explosively formed 316L(N)-IG stainless steel with and without an electron beam weld / Hegeman, J.B.J., Luzginova, N.V., Jong, M., Groeneveld, H.D., Borsboom, A., Stuivinga, M.E.C. and Van der Laan, J.G. // Journal of Nuclear Materials. - 2011. - Vol. 417. - P. 770–773.

131. Драгунов, В.К. Современное развитие электронно-лучевой сварки [Текст] / В.К. Драгунов, А.Л. Гончаров // Ритм. - 2009. - № 8. - С. 28-30.

132. Драгунов, В.К. Инверторный источник питания сварочной электронной пушки [Текст] / В.К. Драгунов, О.М. Гладышев, Е.С. Беневольский // Сварочное производство. – 2009. - № 7. - С. 42-46.

133. Reddy, M. Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds / M. Reddy, G. Rao, S. Rao // International journal of advanced manufacturing technology. - 2009. - Vol. 45. - P. 675–688.

134. Саломатова, Е.С. Исследование геометрических характеристик и микроструктуры сварных швов при электронно-лучевой сварке стали 12Х18Н10Т с осцилляцией электронного пучка [Текст] / Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Т.В. Ольшанская // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2012. - Т. 14, № 3. - С. 36-42.

135. Jankowski, A.F. Grain size effect on the microhardness of BCC metal vapor deposits. TMS letters / A.F. Jankowski, J.P. Hayes, C.K. Saw, R.F. Vallier, G. Jackson and A. Bliss // Materials Science and Technology. – 2004. - Vol. 1, № 8. - P. 175-176.

136. Labanowski, J. Mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar stainless steel welds / J. Labanowski // Arch. mater. sci.. - 2007. - P. 27–33.

137. Жадан, В.Т. Материаловедение и технология материалов [Текст]: учебник для вузов / В.Т. Жадан, Л.И. Полухин, А.Ф. Нестеров, А.Ф. Вишняков, Б.Г. Гринберг. - М.: Металлургия, 1994. - 624 с.

138. ГОСТ 14019-2003 Металлы и сплавы. Методы испытаний на изгиб. Технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2003. – 6 с.

139. Николаев, Г.А. Сварка в машиностроении [Текст]: Справочник в 4-х томах./ редкол.: Г.А. Николаев (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1978. - Т.1. - 504 с.

140. Язовских, В.М. Влияние тока луча на его фокусировку при электронно-лучевой сварке [Текст] / В.М. Язовских, В.Я. Беленький // Сварочное производство. - 1984. - № 10. - С. 34–35.

141. Глазов, В.М. Микротвердость металлов и полупроводников [Текст] / В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М., Металлургия, 1969. - 248 с.

142. Park, J.-W. Stray grain formation in single crystal Ni-base superalloy welds / J.-W. Park, S.S. Babu, J.M. Vitek, E.A. Kenik, and S.A. David // Journal appl phys. – 2003. - Vol. 94, № 6. - P. 203-209.

143. Qian, M. The effect of annealing twin – generated special grain boundaries on HAZ liquation cracking of nickel – base superalloys / M. Qian, J.C. Lippold // Acta materialia. – 2003. Vol. 51, № 12. - P. 351-361.

144. Зубченко, А.С. Марочник сталей и сплавов [Текст] / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под общей ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., доп. и испр.. - М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.

145. Dance, B. G. I. Welding the unweldable: electron beam welding of crack-sensitive alloys / B. G. I. Dance. TWI Connect, 2000. № 106. – 94 p.

146. Keehan, E. Influence of C, Mn and Ni on strong steel weld metals / E. Keehan, L. Karlsson, H.O. Andren // Effect of nickel. sci. technol. weld. journal. - 2006. - Vol. 11, Part 1. - P. 1–8.

147. Касаткин, Б.С. Однопроходная электронно-лучевая сварка конструкционных сталей больших толщин [Текст] / Б.С. Касаткин, С.Н. Ковбасенко, В.И. Нестеренко // Автомат. сварка. - 1989. - № 4. - С. 18-27.

148. Петренко, В.Р. О возможности свободного формирования сварного шва при сквозном проплавлении в условиях электронно-лучевой сварки [Текст] / В.Р. Петренко, А.В. Башкатов, А.В. Медведев, В.П. Чумарный, В.М. Федоров // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике. – 2001. – № 3. – С. 159–162.

149. Клиновой, Д.В. Электронно-лучевая сварка со сквозным проплавлением жаропрочных сплавов на никелевой основе [Текст] / Д.В. Клиновой, Б.А. Задерий, С.С. Котенко, М.В. Буньков, Ю.Д. Панфилов, С.Ф. Воловец // Электронно-лучевая сварка: материалы конференции. – М., 1993. – Сб. 2. – С. 110–115.

150. Беленький, В.Я. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением [Текст] / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.В. Шварев // Сварка и диагностика. – 2010. - № 1. - С. 41-44.

151. Беленький, В.Я. Некоторые аспекты контроля процесса сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением [Текст] / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.В. Шварев // Сварка и диагностика. - 2010. - № 1. - С. 41-43.

152. Rai, R. Heat transfer and fluid flow during EBW of 21Cr–6Ni–9Mn steel and Ti–6Al–4V alloy / R. Rai, P. Burgardt, J.O. Milewski, T.J. Lienert, T. DebRoy // Journal appl phys. – 2009. Vol. 42, № 2. - P. 1-12.

153. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев. - М.: ИД Альянс, 2011. - 644 с.

154. Назаренко, О.К. Влияние рабочего расстояния сварочной электронной пушки на геометрию сварочного шва [Текст] / О.К. Назаренко, В.И. Загорников // Автоматическая сварка. - 2010. - № 5. - С. 32–35.

155. Петренко, В.Р. О возможности свободного формирования сварного шва при сквозном проплавлении в условиях электронно-лучевой сварки [Текст] / В.Р. Петренко, А.В. Башкатов, А.В. Медведев, В.П. Чумарный, В.М. Федоров // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике. - 2000. - № 3. - С. 159–162.

156. Гривняк, И. Свариваемость сталей [Текст] / И. Гривняк, пер. со словац. Л. С. Гончаренко; под ред. Э. Л. Макарова. - М.: Машиностроение, 1984. - 216 с.

157. Морочко, В.П. Влияние режима электронно-лучевой сварки на форму шва и свойства свариваемых соединений жаропрочных сплавов толщиной 10...15 мм [Текст] / В.П. Морочко, Л.И. Сорокин, Н.Я. Зорин // Свароч. пр-во. - 1975. - № 6. - С. 32-36.

Список условных обозначений

- АД – авиационный двигатель;
- ДСЕ – детали и сборочные единицы
- ГТД – газотурбинный двигатель;
- ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;
- ОШЗ – околошовная зона;
- МГИ – металлографическое исследование;
- НВ – неметаллические включения;
- ЗС – зона сплавления;
- РФА – рентгенофазовый анализ;
- ЦЗЛ – центральная заводская лаборатория;
- ЭЛП - электронно-лучевая пушка;
- ЭЛС — электронно-лучевая сварка;
- ЭЛТА – электронно-лучевая технологическая аппаратура;
- ЭЛУ — электронно-лучевая установка.
-
- НВ – твердость по Виккерсу;
- I_l – ток луча;
- I_ϕ – ток фокусирующей линзы;
- КСV, КСУ, КСТ, КС – ударная вязкость;
- l – рабочее расстояние от сварного шва до изделия;
- q – эффективная мощность луча;
- U – ускоряющее напряжение;
- v – скорость сварки;
- σ_b – предел прочности;
- σ_{02} – предел текучести;
- δ – относительное удлинение образца;
- ψ – относительное сужение образца.

Приложение 2

“УТВЕРЖДАЮ”

Исполнительный директор
АО “Металлист-Самара”,доктор технических наук,
профессор

Елисеев Ю.С.



АКТ

внедрения диссертационной работы Исаева С.Л.

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертации Исаева Сергея Леонидовича “Исследование и обеспечение качества сварных соединений при электронно-лучевой сварке деталей камер сгорания ракетной и авиационной техники” на соискание ученой степени кандидата технических наук внедрены в серийное производство на АО “Металлист-Самара” и используются при изготовлении камер сгорания ракетной и авиационной техники, а именно:

- параметры электронно-лучевой сварки паяных конструкций из стали 12X18H10T-ВД;
- параметры электронно-лучевой сварки средней секции из стали 06X15H6MBФБ-Ш;
- параметры электронно-лучевой сварки головки смесителя из сплава ХН67ВМТЮ-ВД;
- параметры электронно-лучевой сварки корпуса наружного из сплава ХН45МВТЮБР-ИД.

Технический директор
АО “Металлист-Самара”

A blue ink signature of A.N. Karpukhin.

Главный металлург
АО “Металлист-Самара”

A blue ink signature of S.P. Golanov.