

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ**

Аннотация

Обеспечение качества сварных соединений силовых конструкций из титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой

Пояснительная записка 145 с., 67 рис., 23 табл., 84 источника, 4 приложения

В настоящей работе приведены результаты исследования образования специфических дефектов при электронно-лучевой сварке титановых сплавов VT20, VT23 и их влияние на качество конструкций ответственного назначения. Установлено, что дефект в виде темных полос, фиксируемый при радиографическом контроле, представляет собой цепочки субмикропор, расположенных вдоль линий сплавления, достигающих в диаметре 3-2 мкм. Возникновение субмикропор связано с наличием перед фронтом расплавленной ванны твердофазного соединения с замкнутыми полостями заполненными капиллярно-конденсированными загрязнениями. Наличие специфического дефекта приводит к усталостному разрушению сварных соединений.

Abstract

Quality assurance of welded joints of power structures made of titanium alloys by electron beam welding

Explanatory note 145 p., 67 pic, 23 tabl., 84 sources, 4 enclosures

This paper presents the results of a study of the formation of specific defects in electron beam welding of titanium alloys VT20, VT23 and their impact on the quality of structures for responsible purposes. It is established that the defect in the form of dark bands, apparent under radiographic control, is a chain submicropores along the lines of the fusion, reaching a diameter of 3-2 microns. The appearance of submicropores is associated with the presence of a solid-phase connection with closed cavities filled with capillary-condensed impurities in front of the molten bath. The presence of a specific defect leads to fatigue failure of welded joints.

Содержание

Введение.....	7
1 Достижения в области использования электронно-лучевой сварки титановых сплавов	13
1.1 Титановые сплавы в авиастроении.....	13
1.2 Электронно-лучевая сварка.....	23
1.2.1 Установки для ЭЛС.....	25
1.2.2 Сущность электронно-лучевого воздействия и особенности формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке	27
1.2.3 Преимущества и недостатки ЭЛС	32
1.3 Теория порообразования при сварке плавлением титановых сплавов..	34
1.4 Влияние капиллярно-конденсированной влаги на поверхности стыкуемых кромок на качество сварных соединений.....	37
1.5 Дефекты, возникающие при электронно-лучевой сварке титановых сплавов	42
1.6 Выводы по главе 1.....	44
2 Анализ дефектов силовых конструкций, возникающие при ЭЛС и методика проведения исследований	46
2.1 Титановые конструкции летательных аппаратов, выполняемые ЭЛС..	46
2.2 Базовая технология изготовления титановых силовых конструкций ...	48
2.3 Характеристики электронно-лучевых установок 30Е3000 и КЛ-144....	51
2.4 Контроль качества силовых конструкций, выполненных ЭЛС титановых сплавов	54
2.4.1 Входной и визуально-измерительный контроль	54
2.4.2 Радиографический контроль силовых конструкций	58
2.4.3 Испытания механических свойств сварных соединений.....	61
2.5 Аналитическая оценка выявленных дефектов при технологическом контроле образцов спутников силовых конструкций титановых сплавов, выполненных ЭЛС	62

2.6	Методика исследований по выявлению факторов образования специфических дефектов при ЭЛС титановых сплавов	70
2.7	Методика исследований по установлению влияния режимов форсированной механической обработки на качество удаления капиллярно-конденсированных загрязнений.....	76
2.8	Выводы по главе 2.....	81
3	Влияние режимов электронно-лучевой сварки на образование специфических дефектов и изменение механических свойств сварных соединений.....	83
3.1	Радиографический контроль качества сварных соединений из сплавов BT23 и BT20, выполненных электронно-лучевой сваркой	83
3.2	Свойства сварных образцов из сплавов BT20 и BT23, выполненных ЭЛС при статических и динамических испытаниях	86
3.3	Выводы по главе 3.....	91
4	Особенности образования специфических дефектов при ЭЛС титановых сплавов	93
4.1	Выводы по главе 4.....	101
5	Исследование макро-, микроструктуры сварных соединений.....	102
5.1	Макро-, микроструктура сварных соединений	102
5.2	Изменение твердости в поперечном сечении сварных соединений	106
5.3	Выводы по главе 5.....	108
	Заключение	110
	Список использованных источников	114
	Приложение А Дефекты сварных соединений, причины образования и нормы их допуска без исправления.....	123
	Приложение Б Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава BT20 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов.....	130

Приложение В Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава ВТ23 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов.....	135
Приложение Г Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава ВТ23, толщиной 60 мм без подготовки стыкуемых кромок на установке 30E3000 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов.....	138

Введение

В авиационном машиностроении широко применяются сборные металлоконструкции, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и надежности. При этом наряду с механическими соединениями все чаще используются сварные, позволяющие значительно снизить массу конструкций вследствие отсутствия в них деталей крепления [1–5].

Титановые сплавы занимают одно из ведущих мест в перечне материалов, используемых для изготовления силовых элементов планера современной авиационной техники [6–8]. Особый интерес с данной точки зрения представляет класс высокопрочных сплавов, наиболее типичным представителями которых являются сплавы ВТ20 и ВТ23. С конца 1990-х годов в рамках проекта «ПАК ФА» ОКБ им. П.О. Сухого осуществляло разработки по созданию многофункционального истребителя пятого поколения, в котором из титановых сплавов ВТ20, ВТ23 предполагается изготовление силовых сборных конструкций с применением автоматической электронно-лучевой сварки (ЭЛС), которая является одним из наиболее востребованных методов, позволяющих соединять детали толщиной до 120 мм и более [9, 10].

Актуальность темы:

Несмотря на преимущество электронно-лучевой сварки, одним из часто фиксируемых дефектов является пористость. Изучению возникновения пор при сварке титана посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых, но о причинах и условиях порообразования до настоящего времени не было единого мнения. Обзор достижений в области исследований порообразования показал, что проблему образования макропор, достигающих 0,1 мм, исследовали А.А. Ерохин, В.В. Фролов, Г.Д. Никифоров, С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов, П.В. Бахматов и др., но с появлением современных рентгеновских аппаратов при технологическом контроле неразъемных соединений, созданных электронно-

лучевой сваркой, вдоль линии сплавления фиксируется специфический дефект – так называемые темные полосы. Установление причин возникновения специфических дефектов и их влияние на конструкции, выполняемые электронно-лучевой сваркой титановых сплавов, является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы:

Провести исследование образования специфических дефектов при электронно-лучевой сварке титановых сплавов ВТ20, ВТ23 и их влияние на качество конструкций ответственного назначения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- выявить аналитическим методом и технологическим анализом предполагаемые факторы, влияющие на образование темных полос и цепочек пор в неразъемных соединениях, выполненных ЭЛС сплавов ВТ20, ВТ23;

- установить влияние режимов механической обработки и сварки на образование пористости;

- установить выявляемость специфических дефектов радиографическим контролем;

- установить влияние режимов электронно-лучевой сварки на образование специфических дефектов и изменение механических свойств сварных соединений;

- исследованиями макро, микроструктуры и химического состава установить образующиеся дефекты сварных соединений;

- разработать рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций, выполняемые ЭЛС.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены:

1. I и II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука» (г. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2018-2019 гг.);

2. На пятой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, организуемой ПАО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» «Исследования и перспективные разработки в машиностроении»: секция «Технология материалов» (г. Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2018 г.);

3. XXI Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов: секция «Технические и химические науки» (г. Хабаровск, ТОГУ, январь 2019);

4. Конкурс студенческих научных работ в области инноваций и технического творчества XXIV ХКОФ «Студенческая весна – 2018» (г. Хабаровск, апрель 2018);

5. Конкурсе УМНИК «Инновации. Наука. Техника» (г. Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2017);

6. Конкурс студенческих научных работ в области инноваций и технического творчества XXV ХКОФ «Студенческая весна – 2019» (г. Хабаровск, апрель 2019);

7. Питч-сессия по треку TechNet GenerationS RoadShow (г. Комсомольск-на-Амуре, октябрь 2017).

Положения, выносимые на защиту:

- аналитическая оценка выявленных дефектов и предполагаемые причины их образования при технологическом контроле образцов спутников, выполненных ЭЛС титановых сплавов ВТ20, ВТ23;

- влияние режимов ЭЛС на образование дефектов и изменение механических свойств;

- факторы и особенности, оказывающие влияние на образование специфических дефектов при электронно-лучевой сварке;

- макро, микроструктура сварных соединений и изменение твердости при ЛТО;

- рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций, выполняемые ЭЛС.

Научная новизна работы:

1. Впервые установлено, что дефект в виде темных полос, фиксируемый при радиографическом контроле, представляет собой цепочки мелких пор, расположенных вдоль линий сплавления, достигающих в диаметре 3-2 мкм.

2. Выявлены закономерности образования дефектов в сварных швах, выполненных ЭЛС титановых сплавов, заключающиеся:

- В попадании в расплав замкнутых областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой (готовых зародышей пор) из твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны;

- Избирательное выплавление из-за повышенной диффузионной подвижности легкоплавкой составляющей по границам зерен: а) при неточном позиционировании электронного луча, либо недостаточной температуре для общего плавления стыкуемых кромок заготовок; б) пикообразования преимущественно в корневой части сварного шва из-за гидродинамической неустойчивости канала проплавления с чередующимися коллапсами кратера.

3. Установлено, что высокоскоростная механическая обработка стыкуемых кромок позволяет уменьшить количество капиллярно-конденсированных загрязнений и улучшить качество сварных соединений титановых сплавов.

Практическая значимость работы:

Практическая значимость диссертации обусловлена возможностью использования технологических решений, позволяющих обеспечить качество ответственных конструкций ЛА при электронно-лучевой сварке на филиале ПАО «Компания «Сухой» Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина».

Личный вклад автора:

Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследований, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и

написании статей по теме исследования. Автор лично производил оценку доминирующих факторов влияющих на порообразования сварных соединений, выполненных ЭЛС, анализировал литературные источники и проводил экспериментальные исследования с последующим анализом и обработкой полученных данных, проводил металлографические, физико-механические и другие виды исследований.

Публикации:

По материалам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, в том числе 4 входящих в перечень изданий рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, четырех приложений. Диссертация содержит 145 страниц; 67 рисунков.; 23 таблицы.; список литературы, состоящий 84 наименований, 4 приложения.

Во **введении** обоснована актуальность темы применяемая к производству силовых титановых конструкций летательных аппаратов (ЛА), выполняемых электронно-лучевой сваркой и приведена общая характеристика работы. Обоснована цель работы и задачи.

В **первой главе** проведен анализ достижений в области использования ЭЛС определены основные преимущества, недостатки и достижения в области исследования порообразования при сварке плавлением титановых сплавов.

Во **второй главе** проведен анализ дефектов силовых конструкций, выполняемых ЭЛС титановых сплавов и статистической обработки по вопросу образования специфических дефектов, а также описана методика проведения исследований.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований влияния режимов электронно-лучевой сварки на образование специфических дефектов и изменение механических свойств.

В **четвертой главе** установлены особенности образования специфических дефектов при ЭЛС титановых сплавов и факторы влияющие на их образование.

В **пятой главе** приведены результаты исследований структуры сварных соединений и изменение их твердости.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и даны рекомендации по обеспечению качества особо ответственных конструкций, выполняемые ЭЛС

1 Достижения в области использования электронно-лучевой сварки титановых сплавов

1.1 Титановые сплавы в авиастроении

Широкое применение титана и его сплавов в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) началось примерно в 1965 – 1970 годах после открытия в металлургической промышленности методов изготовления и обработки полуфабрикатов с содержанием примесей водорода не более 0,006 %, так как повышенное содержание водорода приводило к охрупчиванию титановых материалов, и как следствие, к замедленному разрушению изготовленных из титановых сплавов конструкций [10].

Выбор применения титана и его сплавов в авиастроении обоснован его уникальными свойствами и высоким содержанием сырьевых запасов (по содержанию в земной коре титан занимает четвертое место среди металлов после алюминия, железа и магния – 0,63% [11]).

Важными преимуществами титановых сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами, являются: высокая коррозионная стойкость, высокая удельная усталостная прочность, повышенная жаростойкость и ряд других свойств. Титан также имеет отличную совместимость в отношении коррозионной активности и коэффициента теплового расширения с углепластиком. Это и определяет широкие возможности их применения для летательных аппаратов и авиадвигателей.

Титан обладает высоким коэффициентом поверхностного натяжения: при 1600 °С $\sigma_{\text{нат}} = 1,7 \text{ Дж/м}^2$. В области точки плавления $\sigma_{\text{нат}}$ титана в 1,5 раза выше, чем у алюминия. Это свойство обеспечивает благоприятное формирование корня шва при сварке титана и его сплавов на весу.

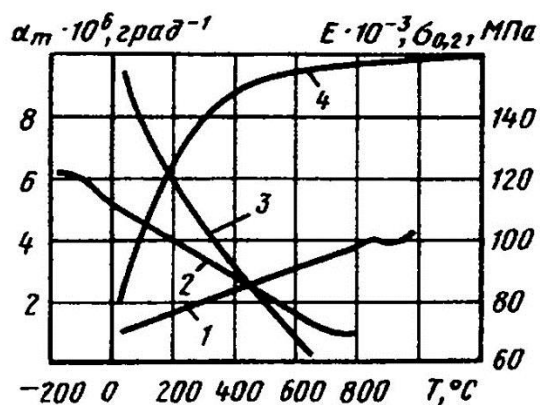
Титан относится к числу химически активных металлов, однако он обладает высокой коррозионной стойкостью, так как на его поверхности образуется стойкая пассивная пленка TiO_2 , прочно связанная с основным металлом и исключая его непосредственный контакт с коррозионной

средой. Толщина этой пленки обычно достигает 5 – 6 нм. Благодаря оксидной пленке, титан и его сплавы не корродируют в атмосфере, в пресной и морской воде, устойчивы против кавитационной коррозии и коррозии под напряжением, а также в кислотах органического происхождения. В восстановительных средах он довольно быстро корродирует из-за разрушения защитной оксидной пленки.

Один из недостатков титана – его низкий модуль упругости (в два раза меньше, чем у железа и никеля), поэтому в некоторых случаях для получения более жестких конструкций необходимо увеличение сечения отдельных элементов. С повышением температуры модуль упругости понижается по линейному закону (рисунок 1.1), легирование же титана заметно повышает его значение. Коэффициент линейного расширения титана интенсивно возрастает с повышением температуры до 400 °С.

Механические свойства титана в большой степени зависят от содержания примесей водорода, кислорода, азота и углерода (рисунок 1.2), которые повышают прочность титана и в разной степени снижают пластичность и вязкость [12, 13]. Примеси ухудшают технологические свойства титана при обработке (главным образом его свариваемость).

Различают примеси внедрения – кислород, азот, углерод, водород и примеси замещения, к которым относятся железо и кремний. Хотя примеси повышают прочность, но одновременно резко снижают пластичность, причем наиболее сильное отрицательное действие оказывают примеси внедрения, особенно газы. Особенно вреден водород, вызывающий водородную хрупкость титановых сплавов. Водород попадает в металл при плавке и последующей обработке, в частности при травлении полуфабрикатов. Водород малорастворим в α -титане и образует пластинчатые частицы гидрида, снижающего ударную вязкость и особенно отрицательно проявляющегося в испытаниях на замедленное разрушение.



1 – дилатометрическая кривая; 2 – модуль упругости; 3 – предел текучести; 4 – коэффициент линейного расширения

Рисунок 1.1. – График зависимости физико-механических свойств чистого титана от температуры

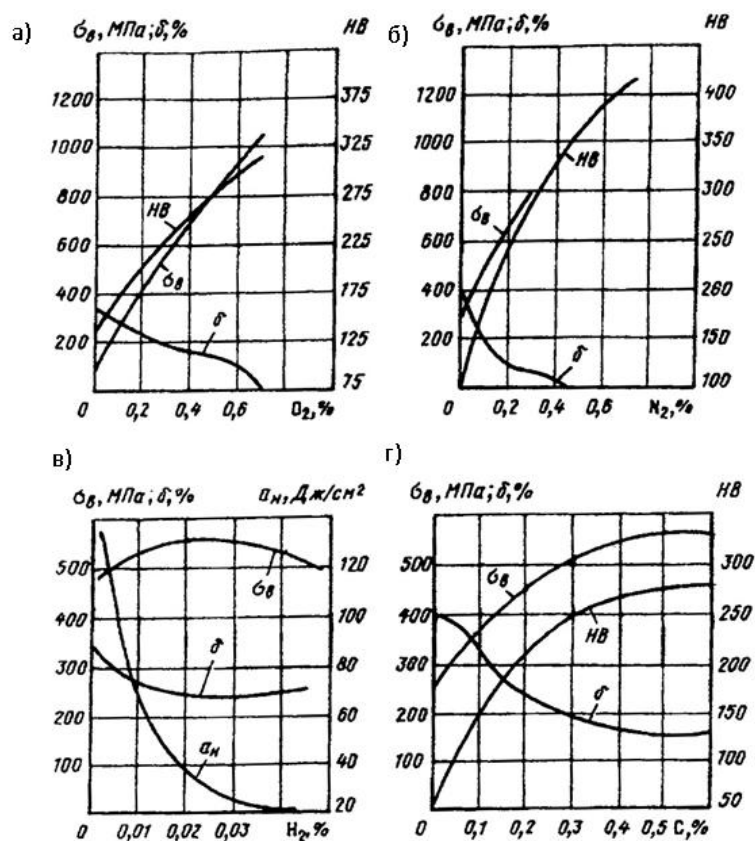


Рисунок 1.2 – Графики влияния кислорода (а), азота (б), водорода (в) и углерода (г) на механические свойства титана

Холодная пластическая деформация технического титана изменяет его механические свойства, полный возврат которых происходит после отжига выше температуры рекристаллизации (600...700 °С) (рисунок 1.3).

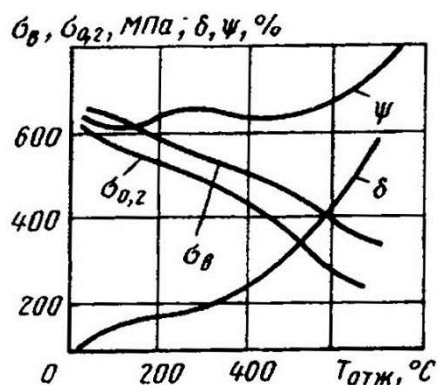


Рисунок 1.3 – Графики зависимости механических свойств титана, наклепанного на 70 %, от температуры отжига

Титан и титановые сплавы поддаются всем известным методам обработки давлением, но их обработка резанием затруднена, так как они сохраняют высокую прочность даже при 500...600 °С. При 300...350 °С они на порядок прочнее алюминиевых и магниевых сплавов, кроме того, имеют, высокую удельную прочность и коррозионную стойкость (рисунок 1.4).

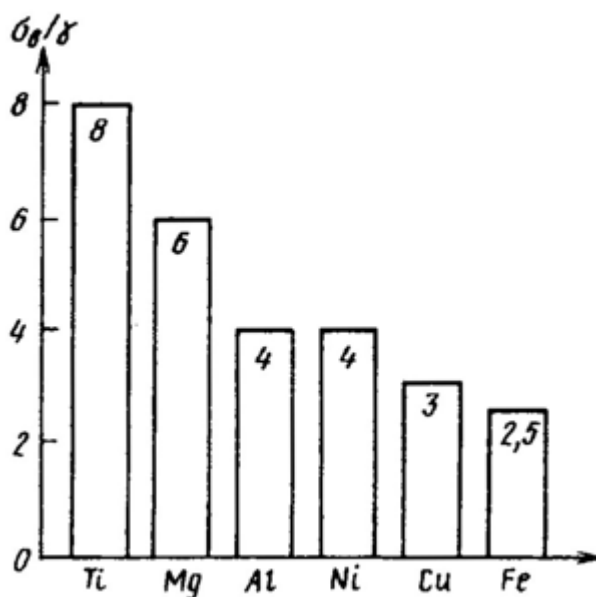


Рисунок 1.4. – Удельная прочность (σ_B/γ) ряда конструкционных металлов

Легирование титана различными элементами позволяет получить сплавы более высокой прочности и коррозионной стойкости по сравнению с техническим титаном. Существенно изменяются и другие свойства титана:

уменьшаются теплопроводность до 7,0...8,8 Вт/(м·К) и коэффициент термического линейного расширения – до $(7,8...8,5) \cdot 10^6$ К⁻¹; удельная теплоемкость существенно не меняется, в то время как удельное электросопротивление сплавов титана $((100...165) \cdot 10^8$ Ом·м) в 2,0...2,5 раза повышается [14].

Фазовый состав титановых сплавов зависит от легирующих элементов и их количества [14, 15, 16]. Действие легирующих элементов характеризуют по их влиянию на температуру полиморфного превращения титана. По этому признаку легирующие элементы делятся на три группы.

I группа – элементы, повышающие температуру полиморфного превращения титана и называемые α - стабилизаторами, – алюминий (основной легирующий элемент), кислород, азот, углерод (примеси). В сплавах, содержащих только α - стабилизаторы (в определенных концентрационных пределах), при нормальной температуре существует одна α -фаза.

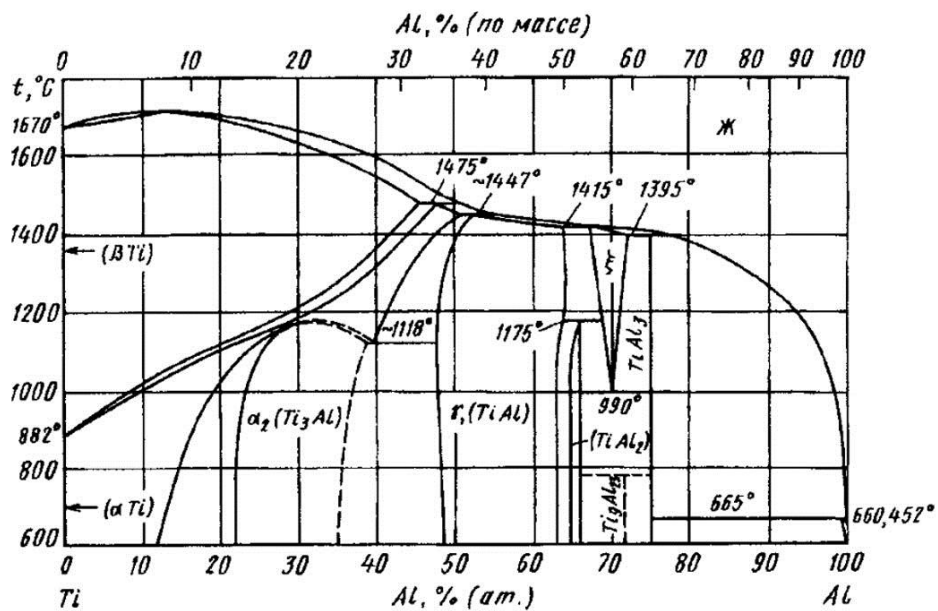


Рисунок 1.4 – Диаграмма состояния системы алюминий – титан

II группа – более обширная группа легирующих элементов. К ней относятся β - стабилизаторы – молибден, ванадий, ниобий, тантал, железо,

хром, марганец, медь, никель, кремний, кобальт, водород (примесь). Они понижают температуру $\alpha \leftrightarrow \beta$ - превращения в титане. Первые четыре из них образуют с титаном непрерывный ряд твердых растворов (изоморфные β - стабилизаторы). Остальные способствуют эвтектоидному распаду β - фазы. Все β - стабилизаторы ограниченно растворимы в α - фазе.

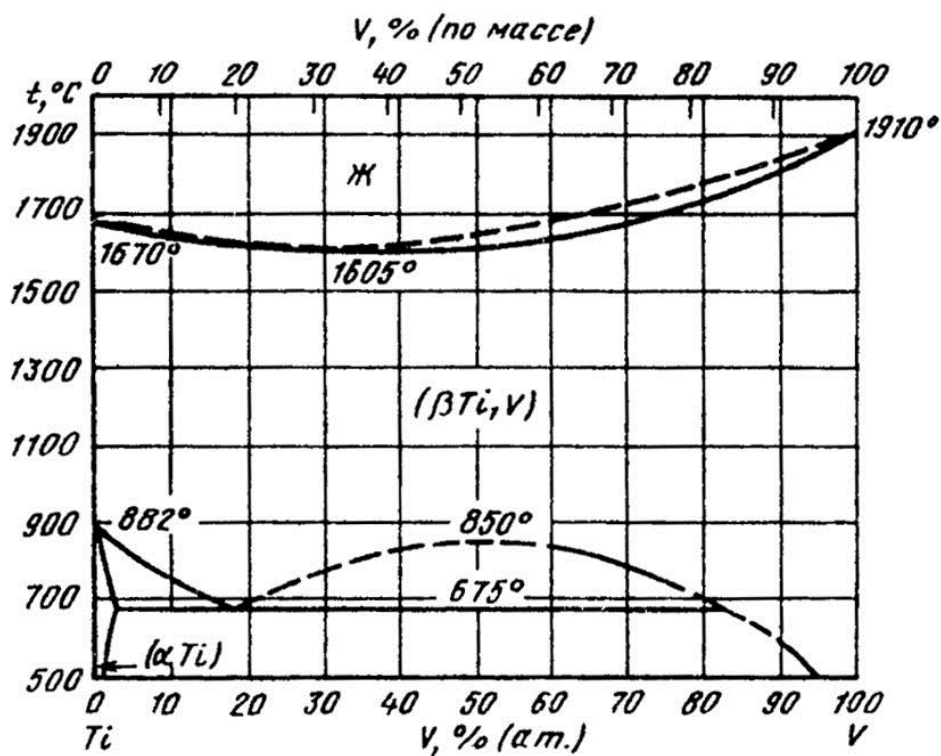


Рисунок 1.5 – Диаграмма состояния системы титан – ванадий

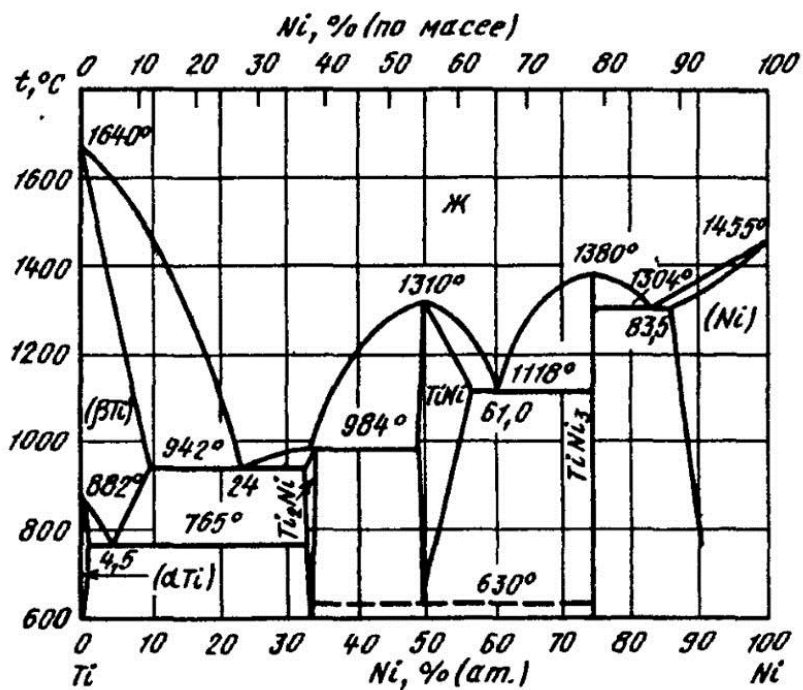


Рисунок 1.6 – Диаграмма состояния системы никель - титан

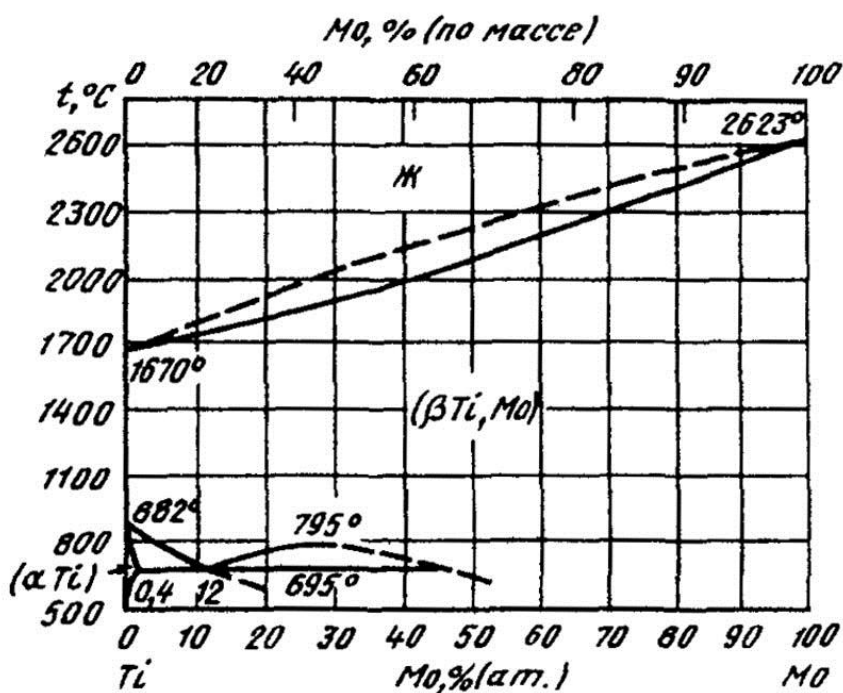


Рисунок 1.7 – Диаграмма состояния системы титан – молибден

III группа легирующих элементов (олово, цирконий, гафний) – это нейтральные упрочнители. Они практически не влияют на температуру полиморфного превращения. Олово вызывает эвтектоидный распад α -фазы

титана, а цирконий и гафний неограниченно растворимы как в α -, так и в β -модификациях титана.

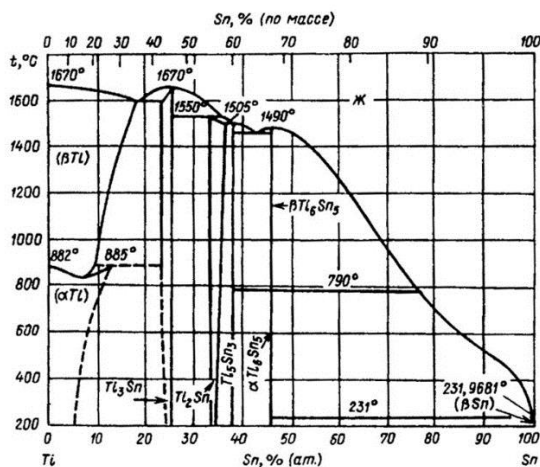


Рисунок 1.8 – Диаграмма состояния системы олово – титан

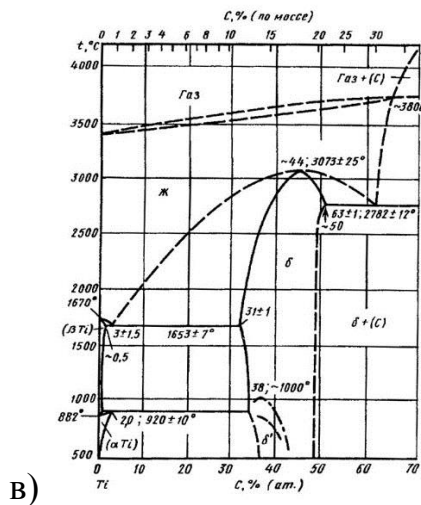
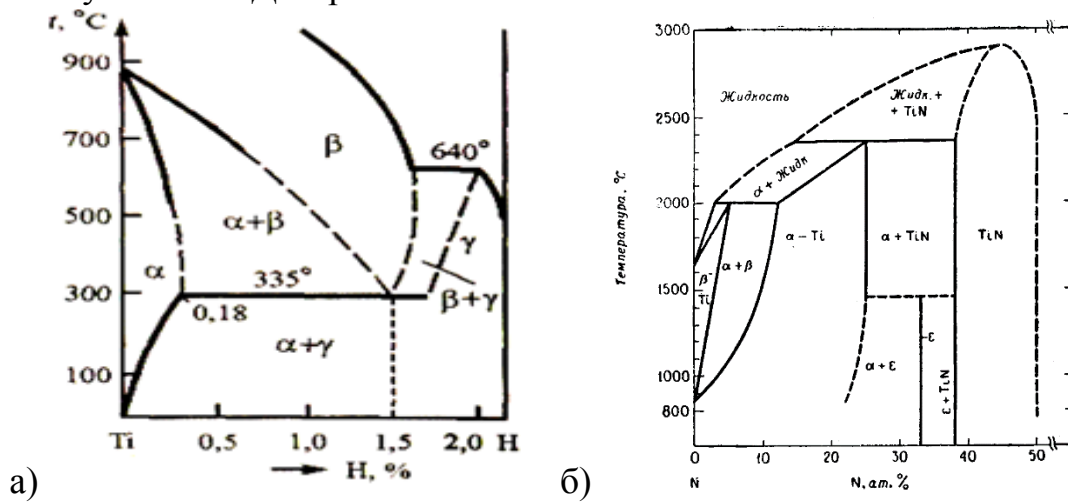


Рисунок 1.9 – Диаграммы состояний систем: а – титан-водород; б – титан-азот; в – титан-углерод

К α - сплавам относятся сплавы, легированные α - стабилизаторами и нейтральными упрочнителями. Упрочнение вызвано легированием α - твердого раствора. Термическая обработка не упрочняет α -сплавы и применяется лишь для снятия нагартовки (отжиг при 600...700 °С) или устранения остаточных напряжений, вызванных, например, сваркой (неполный отжиг при 550...650 °С). Сплавы этого типа имеют высокую термическую стабильность, хорошо свариваются и коррозионностойки.

Псевдо α -сплавы имеют в основе α -структуру и небольшое количество β -фазы (до 5 %) из-за дополнительного легирования β -стабилизаторами (см. таблицу 1.1). Они хорошо свариваются и отличаются высокой технологичностью.

$\alpha + \beta$ - сплавы имеют смешанную двухфазную структуру: твердые растворы на основе α - и β -модификаций титана. Они упрочняются термической обработкой (закалка с последующим старением). Эта группа включает сплавы как средней прочности, имеющие предел прочности 750...1000 МПа (например, ВТ6с), так и высокопрочные (ВТ6, ВТ14, ВТЗ-1, ВТ22 и др.).

Первые используются главным образом в отожженном состоянии ($T_{\text{отж}} = 700...800$ °С), хорошо деформируются с подогревом, удовлетворительно свариваются. Широко применяется сплав ВТ6с, из которого изготавливают листы, поковки, штамповки, прутки, профили и другие полуфабрикаты. Сплав такого типа рекомендуется для изготовления штампованных конструкций, например емкостей высокого давления.

Свариваемость титановых сплавов средней прочности ($\sigma_B = 750...1000$ МПа) различна. Сплавы ОТ4, ВТ5, ВТ5-1, 4210 (β – сплав) обладают хорошей свариваемостью различными методами; механические свойства сварных соединений также близки к механическим свойствам основного металла. Сплавы АТЗ, ВТ4, АТ4, СТ5, ВТ20, ОТ4-2 обладают хорошей свариваемостью, однако прочность и пластичность сварных соединений

снижаются на 5...10% по сравнению с прочностью и пластичностью основного металла. Сплав ВТ6с обладает удовлетворительной свариваемостью при сварке плавлением. Предел прочности сварного соединения, выполненного сваркой плавлением не менее 90% предела прочности основного металла. Большинство высокопрочных сплавов обладает удовлетворительной свариваемостью. Сплавы ВТ16, ВТ23, ВТ15, ТС6 предназначены для применения в термически упрочненном состоянии, сплавы ВТ6, ВТ14, ВТ3-1 и ВТ22 – как в термическом упрочненном, так и в отожженном состоянии. Оптимальные свойства сварных соединений достигаются после термической обработки.

Титановые сплавы используются для обшивки самолетов, летающих со сверхзвуковыми скоростями, или изготовления наиболее нагреваемых частей – передних кромок крыла, стабилизатора, элеронов, а также основных элементов силового набора фюзеляжа, крыла, оперения [17].

Широкое применение в авиастроении получили сплавы: ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ5, ВТ20, ВТ22 и другие.

Таблица 1.1 – Химический состав некоторых титановых сплавов

Легирующий элемент	Содержание легирующих элементов, %						
	ВТ1-00	ОТ4-1	ВТ23	ВТ22	ВТ6ч	ВТ20	ОТ4
Al	0,20	2,23	5,09	5,06	6,08	6,54	1,56
Mo	-	-	2,18	4,14	-	2,38	-
V	-	-	4,52	4,73	3,92	1,78	-
Cr	-	-	1,24	1,14	-	-	-
Fe	0,06	0,22	0,8	1,11	0,14	0,17	0,08
Si	0,02	0,013	0,06	0,06	0,02	0,03	0,02
Mn	-	1,48	-	-	-	-	0,80
Zr	-	-	-	-	-	2,31	-
H ₂	0,0019	0,0024	0,0014	0,0018	0,0019	0,0015	0,0033

Процесс изготовления деталей и элементов конструкций из титановых сплавов более трудоемкий, чем из алюминиевых, в силу присущих титану технологических свойств. Высокая стоимость титановых деталей и

конструкций обусловлена следующими факторами:

- активным взаимодействием титана с газами при повышенных и высоких температурах, что приводит к необходимости защиты титана от этого взаимодействия при технологических процессах и применения в ряде случаев вакуумного отжига;

- недостаточной технологичностью при обработке давлением, приводящей к повышению трудоемкости производства деформированных полуфабрикатов и снижению коэффициента использования металла (для титановых сплавов коэффициент использования материала – КИМ – часто равен 0,1...0,2); малой производительностью механической обработки (примерно 15 % от производительности механической обработки алюминиевых сплавов);

- высокой чувствительностью механических свойств титановых сплавов к типу и параметрам микроструктуры, обуславливающей строго регламентированные требования к технологическим параметрам для получения благоприятной структуры.

Сварка – один из наиболее распространенных технологических процессов при создании сложных деталей и узлов, поэтому свариваемость титановых сплавов – наиболее важный фактор, определяющий целесообразность его применения [6; 7].

1.2 Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) явилась одним из перспективных и быстро развивающихся способов соединения различных металлов, в первую очередь тугоплавких. Химически активных и разнородных качественных сталей, высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана. Также этот способ сварки обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм. При этом обеспечивается максимальная пластичность и вязкость сварных соединений [18].

Наиболее перспективным является соединения деталей из термически упрочненных материалов, когда затруднена или невозможна последующая термическая термообработка. Максимальная пластичность и вязкость сварных соединений, минимальные сварочные деформации позволяют также успешно использовать ЭЛС при изготовлении изделий после завершающей механической обработки [19].

Электронно-лучевая сварка основана на использовании тепла, которое выделяется при торможении остросфокусированного потока электронов, ускоренных до высоких энергий. Благодаря развитию вакуумной техники и электронной оптики источник нагрева сфокусированным лучом получил широкое применение сначала в сварочной, а затем в металлургической технике. Толчком, послужившим поиску новых способов получения неразъемных соединений материалов, являлась трудность получения сварных соединений таких сплавов как молибден, тантал, ниобий, вольфрам, цирконий которые обнаружались в середине 60-х гг. прошлого века. Эти металлы составляют группу трудносвариваемых, так как обладают высокими температурой плавления и химической активностью. Это предполагает использование высококонцентрированных источников тепла и серьезной защиты зоны сварки [20].

Электронный луч как источник сварочного нагрева по своей удельной энергетической мощности и прецизионности превосходит все источники, известные ранее. Электронно-лучевая сварка, производимая в вакууме порядка $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст, позволяет сохранить исходную чистоту свариваемого металла.

Возможности концентрации большой мощности в электронном луче и управления ею в широких пределах в сочетании с высоким вакуумом в рабочем объеме обеспечили электронно-лучевой сварке определенные преимущества перед иными методами сварки плавлением (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики основных источников сварочного нагрева

Источник	Наименьшая площадь поперечного сечения, см ²	Наибольшая плотность мощности, Вт/см ²
Кислородно-ацетиленовое пламя	10 ⁻²	5*10 ⁴
Электрическая дуга	10 ⁻³	10 ⁵
Электронный пучок	10 ⁻⁴	5*10 ⁷
Лазерный луч	10 ⁻⁶	10 ⁹

1.2.1 Установки для ЭЛС

Установки для ЭЛС по степени защиты сварочной ванны от воздействий атмосферных газов делятся на три класса: для сварки в высоком и промежуточном вакууме, а также для вневакуумной сварки.

Установки для сварки в высоком вакууме обеспечивают практически полную защиту металла шва, большие рабочие расстояния и острофокусированные электронные пучки. Такие установки используются для микросварки и размерной обработки в радиоэлектронике, приборостроении, точной механике, а также для сварки изделий малых, средних и крупных габаритов в ядерной энергетике, авиастроении и ракетной технике.

Установки для сварки в промежуточном вакууме (10⁻¹...10⁻²) отличаются от предыдущих упрощенной откачной системой сварочной камеры и меньшим временем ее откачки от рабочего давления. Качество сварных соединений конструкционных сталей, алюминия, меди при этом вполне удовлетворительное.

Установки с выводом пучка в атмосферу не имеют сварочной камеры. Электронный пучок через лучепровод сварочной пушки с мощной ступенчатой откачной системой выводится в атмосферу или защитную газовую среду, где и производится сварка. Установки этого класса отличаются рассеянием электронного пучка в газовой среде и, как результат – малым рабочим расстоянием. Для установок с выводом пучка в атмосферу применяются только высоковольтные (175...200 кВ) энергетические комплексы.

По габаритам сварочные камеры установок ЭЛС подразделяют на следующие:

- микросварки и размерной обработки;
- сварки малогабаритных изделий;
- сварки изделий средних размеров (универсальные и специализированные);
- сварки крупногабаритных изделий.

Установки для ЭЛС любого типа состоят из двух основных комплексов: энергетического и электромеханического. Отдельно следует выделить узлы, получившие название сварочных блоков. В их состав кроме сварочной пушки входят устройства для ее ориентации относительно свариваемого стыка, механизм подачи присадочного материала, устройства для наблюдения и освещения и, при необходимости, вакуумные насосы для дифференциальной откачки из области эмиссионной системы сварочной пушки.

К энергетическому комплексу относится аппаратура для формирования пучка электронов с заданными параметрами, управления его мощностью и положением относительно свариваемого стыка.

Для расширения технологических возможностей электронных пушек широко используется отклонение электронного пучка от оси симметрии пушки с помощью электромагнитной отклоняющей системы. В частности, таким образом осуществляется точное совмещение пучка со стыком, поиск стыка, сканирование пучка в процессе сварки, изменение диаметра пучка, предшествующая и послесварочная термообработки и т.д.

Важной проблемой для ЭЛС является поиск стыка в процессе сварки. Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины к ширине шва требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью свариваемого стыка. Требуемая точность зависит от толщины свариваемых изделий, но обычно должна быть не ниже $\pm 0,1$ мм. Возможность точного визуального позиционирования, непосредственно через иллюминаторное окно, через

оптическую систему либо с помощью телевизионных систем наблюдения, ограничены явлением металлизации иллюминаторов и выходных оптических устройств, а также из-за высокой яркости свечения сварочной ванны на фоне плохо освещенной прилегающей поверхности изделия.

Чтобы иметь возможность контролировать и этот фактор, для определения истинного положения пучка используют явление вторично-электронной эмиссии от металлической поверхности, облучаемой остросфокусированным пучком электронов. При пересечении стыка пучком электронов изменяются интенсивность потока отраженных электронов и ее распределение в пространстве. Как только первичный пучок начнет перекрывать линию стыка, отраженный ток уменьшится. Эти сигналы регистрируются датчиком, происходит их сопоставление с заранее заданным уровнем и, как результат, корректируется движение пушки. На основе использования вторично-эмиссионного сигнала от стыка построен ряд широко применяемых устройств позиционирования сварочного пучка: растровых телевизионных приборов «Рефлектрон» или «Прицел» (представляют собой упрощенный вариант растровых телевизионных систем), систем с предварительным обучением.

Электромеханический комплекс установок ЭЛС предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, выполнения всех сварочных, установочных и транспортных перемещений свариваемого изделий и электронной пушки. В состав электромеханического комплекса входят: сварочная камера, откачная система, сварочные манипуляторы, системы наблюдения, устройства подачи присадочных материалов, вспомогательные устройства и механизмы, а также системы управления этими механизмами и устройствами.

1.2.2 Сущность электронно-лучевого воздействия и особенности формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке

Электронный луч – поток электронов, разогнанных в поле высокого напряжения до больших скоростей и сконцентрированных электромагнитными линзами до необходимой плотности энергии.

Для получения работоспособного электронного луча необходимо:

- обеспечить наличие большого количества свободных электронов;
- довести свободные электроны до обрабатываемой поверхности, разогнав их до необходимой энергии, обеспечивая при этом регулирование мощности;
- сконцентрировать энергию до нужной плотности;
- управлять объектом вложения энергии свободных электронов.

Все вышеназванные задачи осуществляются специальным устройством – электронно-лучевой пушкой.

Для ограждения потока электронов от взаимодействия с молекулами воздушной среды используются камеры высокого вакуума.

Современные электронно-лучевые пушки позволяют получать в пятне нагрева плотность мощности до 19^8 Вт/см², уступая по этому показателю только лазерному излучению. Используя фокусировку – концентрацию электронов при помощи магнитных полей, можно изменять диаметр пятна нагрева и производить термическую обработку стыкуемых кромок перед сваркой, а также получать швы с так называемым «кинжальным проплавлением». В начале 1960-х годов Н.А. Ольшанский и О.К. Назаренко одни из первых предложили теорию кинжального проплавления: электронный луч образует конус проплавления деталей, на передней стенке которого происходит равномерное распределение энергии. Перемещение луча относительно детали приводит к непрерывному плавлению металла и переносу его в сторону, противоположную лучу. По этой теории образование глубокого проплавления представляется как стационарный процесс [18].

Фокусировка электронного луча имеет значительное влияние на геометрические параметры сварного шва. Выбор неоптимальной точки фокусировки или её дрейф может привести в процессе сварки к

специфическим дефектам сварного шва, появлению корневых трещин и несоответствию геометрических параметров, отсутствие контроля фокусировки может привести к снижению качества сварного шва до значений, не соответствующих заявленным для технологического процесса ЭЛС [21].

Принципиальная схема установки электронно-лучевой сварки показана на рисунке 1.10. Электронная пушка представляет собой устройство, с помощью которого получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии. Пушка имеет катод 1, который нагревается до высоких температур. Катод размещен внутри прикатодного электрода 2. На некотором расстоянии от катода находится ускоряющий электрод (анод) 3 с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электрод имеет форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом на пути к аноду, приобретают значительную скорость и энергию.

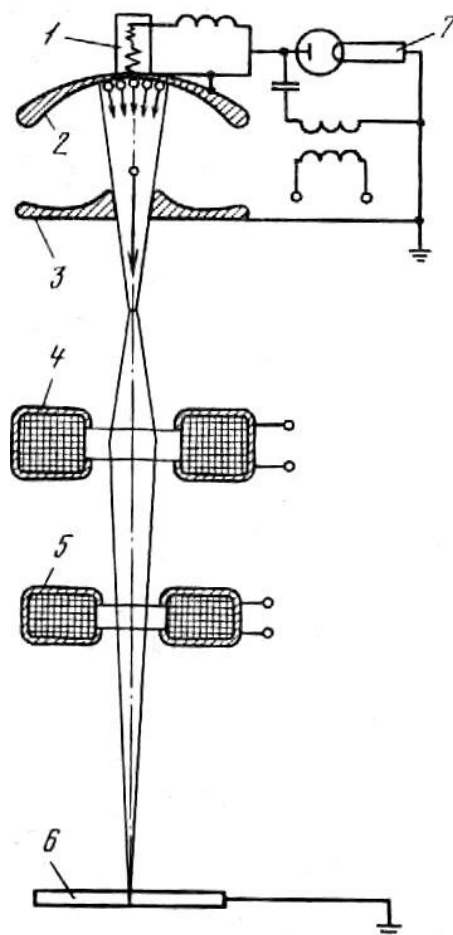


Рисунок 1.10. – Схема установки для сварки электронным лучом
 После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Пушка получает питание электрической энергии от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны, имея одинаковый заряд, отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

Для увеличения плотности энергии в луче, электроны, выйдя из первого анода, фокусируются магнитным полем в магнитной линзе 4 в плотный пучок и ударяются с большой скоростью о поверхность изделия 6. При этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения в веществе превращается в тепло, нагревая металл до высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию и настройки его на стык предполагаемо свариваемого шва на пути электронов устанавливается магнитная отклоняющая система 5.

И.В. Зуевым и Н.Н. Рыкалиным, установлено, что процесс внедрения электронного луча в металл с образованием канала проплавления происходит за счет периодического выброса вещества вследствие взрывообразного испарения (вскипания металла) [22].

Кинетическая энергия электронов при соударении с материалом полностью переходит в тепловую, которая расходуется на нагрев, плавление и испарение металла. Глубина проникновения электрона зависит от рода металла и энергии электронов.

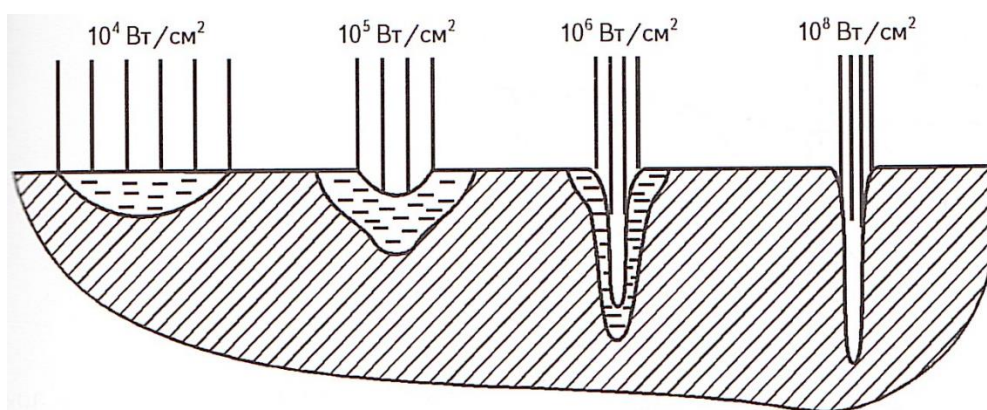
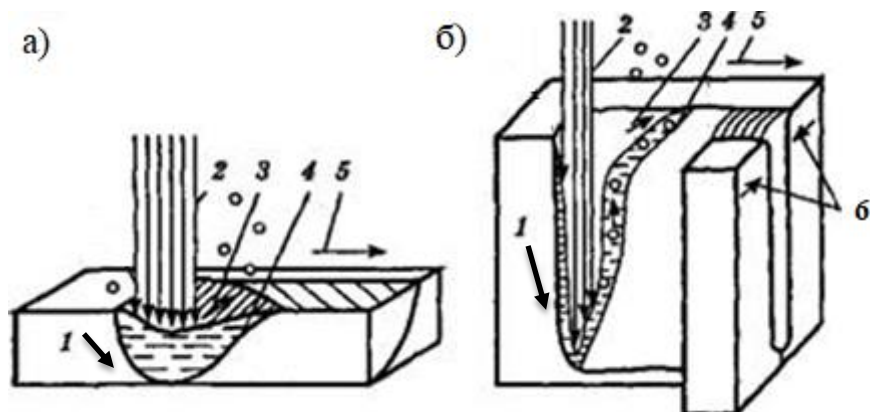


Рисунок 1.11 – Формирование кратера в сварочной ванне с возрастанием плотности энергии

При значениях плотности 10^4 Вт/см² вся энергия электронного луча расходуется на нагрев поверхности металла. Сварочная ванна имеет вид полусферы (рисунок 1.11). С увеличением плотности тепловой энергии до 10^6 Вт/см² и выше ширина зоны разогрева уменьшается, а глубина проплавления увеличивается, образуя кратер. По мере заглубления луча уменьшается интенсивность его воздействия на дно кратера. Следует отметить, что диаметр кратера в 2-4 раза больше диаметра пучка.

При перемещении электронного луча по свариваемым кромкам канал кратера и слой расплава принимают несколько иной, деформированный вид (рис 1.12). На передней стенке канала кратера идет основная отдача энергии электронного луча. Металл плавится и за счет динамических сил (реакции испаряемого металла и сил смачивания) в сварочной ванне перетекает вокруг луча на заднюю стенку канала в зону кристаллизации. Величина жидкой

прослойки на передней и боковых стенках кратера не превышает десятых долей миллиметра. Перетекание металла с передней стенки кратера на заднюю осуществляется за счет действия двух сил: реакции пара и капиллярной силы.



1 – направление испарения металла 2 – пучок электронов; 3 – направление выноса металла в верхней части сварочной ванны; 4 – фронт кристаллизации; 5 – направление перемещения изделия; 6 – поперечная усадка металла сварного шва

Рисунок 1.12 – Схема ЭЛС металлов малой (а) и большой (б) толщины

В движущейся ванне пучок электронов воздействует на переднюю стенку, где образуется максимальная температура, а следовательно, и более высокая реакция пара, которая выдавливает жидкий металл в заднюю часть ванны.

Капиллярная сила также связана с градиентом температур. На передней стенке в связи с более высокой температурой уменьшается сила поверхностного натяжения, и за счет образовавшейся разницы в силах металл перетекает в заднюю часть кратера.

При использовании ЭЛС титановых сплавов металл сварного соединения отличается значительным градиентом температур. На участке длиной всего в несколько миллиметров происходят значительные изменения в структуре от литой к перегретой в β -области и равновесной мелкозернистой структуре основного металла [6].

Одной из характерных особенностей сплавов на основе титана является их низкая теплопроводность, что обуславливает большие градиенты

температур и напряжений в области сварного соединения [1]. Применение локальной термической обработки (ЛТО) электронным лучом в вакууме является весьма эффективной и экономически оправданной операцией. При использовании ЛТО снижается уровень сварных напряжений, улучшается структура и свойства сварных соединений, снижается вероятность образования трещин. [23]

В настоящее время активно изучается процесс ЭЛС с глубоким проплавлением, а также исследуются возможности контроля процесса формирования сварного шва при ЭЛС [24-29].

1.2.3 Преимущества и недостатки ЭЛС

Благодаря высокой концентрации энергии в луче, минимальному вводу тепла и высокой скорости охлаждения зона термического влияния при ЭЛС имеет существенно меньшую протяженность, а снижение свойств в ней относительно небольшое. Особое значение это имеет для аустенитной стали, сплавов циркония, молибдена и других металлов, склонных при нагреве к значительному росту зерна и снижению коррозионной стойкости.

Глубокое проплавление металла при малой погонной энергии, имеющее место при ЭЛС, обуславливает значительно большую скорость отвода тепла от зоны сварки, что обеспечивает увеличение скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла.

Ввод значительно меньшего количества тепла при ЭЛС, особенно на импульсном режиме, по сравнению с дуговой сваркой дает возможность во много раз уменьшить деформацию изделий. Большая концентрация энергии в малом поперечном сечении луча и перенос энергии лучом на значительное расстояние от катода дают возможность использовать электронный луч при сварке в узкую щель, когда методы дуговой сварки не могут быть использованы [30].

Ранее для производства силовых конструкций ЛА, использовалась сварка вольфрамовым погруженным электродом (СПВЭ). Неотъемлемым преимуществом СПВЭ являлось отсутствие пор в металле шва при коэффициенте формы проплавления менее 1 [31].

В последующем для создания силовых конструкций ЛА была заложена электронно-лучевая сварка (ЭЛС).

Процесс ЭЛС имеет ряд преимуществ перед другими методами сварки:

- более надежная защита зоны сварки от газов атмосферы;
- малая ширина зоны термического влияния и малая ширина шва;
- возможность однопроходной сварки больших толщин;
- при ЭЛС рабочее расстояние «электронная-пушка – изделие» можно

изменять в значительных пределах без существенного изменения параметров шва. Рабочее расстояние выбирается в пределах 50...120 мм для низковольтных пушек и 50...500 мм – для высоковольтных. При этом изменение рабочего в процессе сварки на 1...5 мм не оказывает существенного влияния на качество соединения; отклонение потока электронов в магнитном поле осуществляется практически безинерционно, что дает возможность перемещать электронный луч по сложным контурам по программе, с использованием электронно-вычислительной техники;

- существенное (в 8...10 раз) снижение энергетических затрат по сравнению с другими дуговыми методами;

- возможность локальной термической обработки расфокусированным лучом непосредственно после сварки.

Основными недостатками ЭЛС являются:

- сложность и высокая стоимость оборудования;
- необходимость наличия вакуумных камер, что ограничивает размеры свариваемых изделий;
- вредное рентгеновское излучение в процессе ЭЛС;
- необходимость высококвалифицированного персонала;

- из-за специфики образования сварного шва при ЭЛС возникают сложности по исключению пористости [32].

1.3 Теория порообразования при сварке плавлением титановых сплавов

Большой теоретический и практический вклад в решение проблемы порообразования в условиях сварки, в том числе и при сварке цветных металлов, внесли отечественные ученые, представляющие разные научные школы и направления в изучении этой проблемы: А.А. Алов, В.К. Любавский, А.А. Ерохин, В.В. Фролов, Г.Д. Никифоров, Л.С. Сапиро, В.В. Баженов, И.К. Проходня, С.М. Гуревич, Д.М. Рабкин, И.Р. Пацкевич, Г.Ф. Деев, В.Н. Замков, М.А. Абралов, В.В. Подгаецкий, И.И. Фрумин, Г.Л. Петров, Ф.Е. Третьяков, А.И. Горшков, Б.А. Калачев, Л.Я. Ищенко, В.И. Рязанцев, Е.Г. Антонов, А.Н. Хатунцев, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов, П.В. Бахматов и многие их ученики. Среди зарубежных ученых необходимо выделить Д. Андреа, У. Масахира, М. Махинара, Д. Митчела, С. Ямомото и др.

Процесс порообразования относится к сложным физико-химическим явлениям, развитие которого обусловлено не только свойствами свариваемого металла, но и особенностями сварочного процесса. Природа пор коренным образом отличается от природы других дефектов, возникающих при сварке: трещин, включений, подрезов и др. Поэтому процесс порообразования и проблема борьбы с порами требуют цельного рассмотрения и глубокого изучения. Попытка решить односторонне и эмпирически привела к многообразию представлений о наиболее вероятных источниках газов, формирующих пузырьки и механизме их возникновения.

Ключом к решению существующей проблемы борьбы с порами при сварке плавлением цветных металлов и их сплавов является комплексное всестороннее исследование всех стадий процесса порообразования, систематизация и обобщение существующих знаний и на этой основе

разработка научно обоснованных путей и технологических рекомендаций по предотвращению пористости.

Основной причиной порообразования, по данным отечественных и зарубежных ученых

В работе [33] удалось наиболее полно и обоснованно сформулировать основные закономерности образования пор при сварке плавлением титана и его сплавов.

Физико-химический процесс порообразования при сварке титана включает стадии:

- 1) возникновение зародышей пузырьков;
- 2) развитие их в объеме ванны;
- 3) пузырьковую дегазацию ванны;
- 4) образование пор;
- 5) диффузию газов около пор при остывании металла шва.

Стадия возникновения зародышей пузырьков является важнейшей при решении проблемы порообразования, поскольку определяет условия и механизм образования зародышей, и наиболее вероятный источник газа, формирующего эти зародыши.

В работе [34] приводится аналитическая оценка вероятности возникновения пузырьков газа, выделяющегося из расплава при сварке. Было показано, что появление пузырьков критического размера зависит от того, протекает ли процесс в объеме жидкой фазы (гомогенное образование зародыша) либо на границе твердой и жидкой фаз (гетерогенное зарождение).

В работе [35] экспериментально доказано отсутствие пор в металле при проплавлении целой пластины при искусственном увеличении концентрации газа (водорода) в твердом растворе.

Расчеты, проведенные в работах [35, 36] показали, что при определенных углах смачивания и геометрическом параметре становится возможным образование зародыша в дефекте без затраты энергии. Такие

дефекты являются готовыми зародышами газовой фазы пузырьков. Наибольшее стимулирующее действие на зарождение пузырьков могут оказывать дефекты цилиндрической формы. Там же было показано, что в случае хорошего смачивания жидкостью поверхности дефектов, что более реально в условиях сварки [35], зарождение пузырьков в объеме рассматриваемых дефектов становится менее вероятным, чем на плоской поверхности раздела и даже в гомогенной среде [37].

Результаты экспериментов [35] и термодинамического анализа [34] условий гомогенного и гетерогенного возникновения пузырьков газа показывают, что в расплаве химически активных тугоплавких металлов гидрогрупп титана и ванадия отсутствуют газовые флуктуации критического размера, плохо смачиваемые поверхностью, раздела. Поэтому маловероятно возникновение пузырьков, выделяющихся из раствора водорода в объеме ванны. Для этого требуются готовые зародыши газовой фазы.

Готовыми зародышами газовой фазы при расплавлении могут быть дефекты торцовой поверхности свариваемых кромок с наличием в объеме их адсорбированных газов, паров воды и загрязнений, способных разлагаться с образованием газов [35].

Влага, находящаяся в объеме дефектов торцовой поверхности свариваемых кромок, оказывает определяющую наиболее важную роль как активатора зарождения пузырьков.

Суммируя результаты многочисленных исследований, можно перечислить наиболее вероятные причины порообразования: загрязненность поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки; загрязненность защитной атмосферы; зарождение газовых пузырьков на базе наследственных дефектов; резкое увеличение скрытого давления нерастворимых в расплавленном титане газов; выделение водорода; водород, образующийся в сварочной ванне, в результате разложения влаги; обезуглероживание металла в сварочной ванне углеродосодержащих и кремнесодержащих веществ, адсорбированных поверхностью торцов; захват

аргона в процессе кристаллизации при плохой подготовке кромок; образование твердофазного соединения в стыке кромок перед сварочной ванной, приводящее к завариванию дефектов торцов кромок и образованию газосодержащих замкнутых полостей.

1.4 Влияние капиллярно-конденсированной влаги на поверхности стыкуемых кромок на качество сварных соединений

Существует множество версий о вероятном источнике пор и механизме их образования, но наиболее достоверной гипотезой, теоретически и практически неоднократно подвергаемой, является теория В.В. Редчица и Г.Д. Никифорова о влиянии дефектов обработки торцовой поверхности свариваемых кромок и адсорбированной на ней влаги и других загрязнений на появление пор в сварных швах титановых сплавов. Теория порообразования [38] заключается в образовании твердофазного соединения в стыке кромок перед сварочной ванной, приводящее к завариванию дефектов торцов кромок и образованию газосодержащих замкнутых полостей.

Приведенный в работе [39] анализ основных технологических операций изготовления титановых конструкций показывает, что все они связаны с механическим, электрофизическим и тепловым воздействием на заготовку, т.е. различными разделительными операциями и последующим нагревом до определенной температуры, как до, так и в процессе пластической деформации, сварки и термообработки. Все эти операции не гарантируют исключение газонасыщения поверхности даже при использовании защитных газов, вакуумного оборудования и др. и требуют постоянного контроля за поверхностным содержанием, особенно водорода в технологическом процессе изготовления изделий.

Используемые в металлургическом производстве титановых сплавов [31, 32, 40] методы определения содержания газов вакуумным нагревом, вакуум-плавлением, спектральным изотопный и др., несмотря на высокую

чувствительность 0,0001%, в технологическом цикле изготовления деталей практически не пригодны, поскольку не дают возможности послойного определения водорода с поверхности и в глубь для оценки поверхностной насыщенности водородом. Кроме того, малопроизводительны (5-6 проб в смену), трудоемки (требуют изготовления специальных проб).

В работах [41-44] показано существенное различие во влиянии разделительных операций на насыщенность поверхности заготовок водородом и в последующем на дефектность металла шва при сварке плавлением.

В работах [45-48] – дуговая плазма предполагалась однокомпонентной, т.е. содержащей атомы и ионы только защитного газа, то в работе [49] численный анализ характеристик производился уже для многокомпонентной плазмы столба и анодной области стационарной электрической дуги с тугоплавким катодом (W) и испаряющимся анодом (Fe) при ее горении в инертном газе (Ar). Исследования проводились с целью оценки эффективности дугового нагрева свариваемого металла, т.е. глубины проплавления.

В работе [50], произведена количественная оценка насыщенности поверхности титановых заготовок по содержанию водорода в плазме ЭИР в зависимости операций при технологическом цикле изготовления титановых конструкций

Установлено, что на содержание водорода в плазме ЭИР существенное влияние оказывает влага, адсорбируемая поверхностью титановых сплавов в зависимости от условий обработки и хранения.

Из данных рисунка 1.13 видно, что при внесении титановых сплавов из холода в тепло, независимо от марки сплава и условий формирования поверхности, на поверхности в плазме ЭИР наблюдается максимальное содержание водорода, превышающее 0,05 %. Значительное снижение водорода в плазме наблюдается уже после выдержки 2 часа в тепле при комнатной температуре, при этом выявляется уже зависимость не только от

марки материала, но и от вида формирования поверхности, максимум у образцов, подвергнутых электроэрозионной обработке.

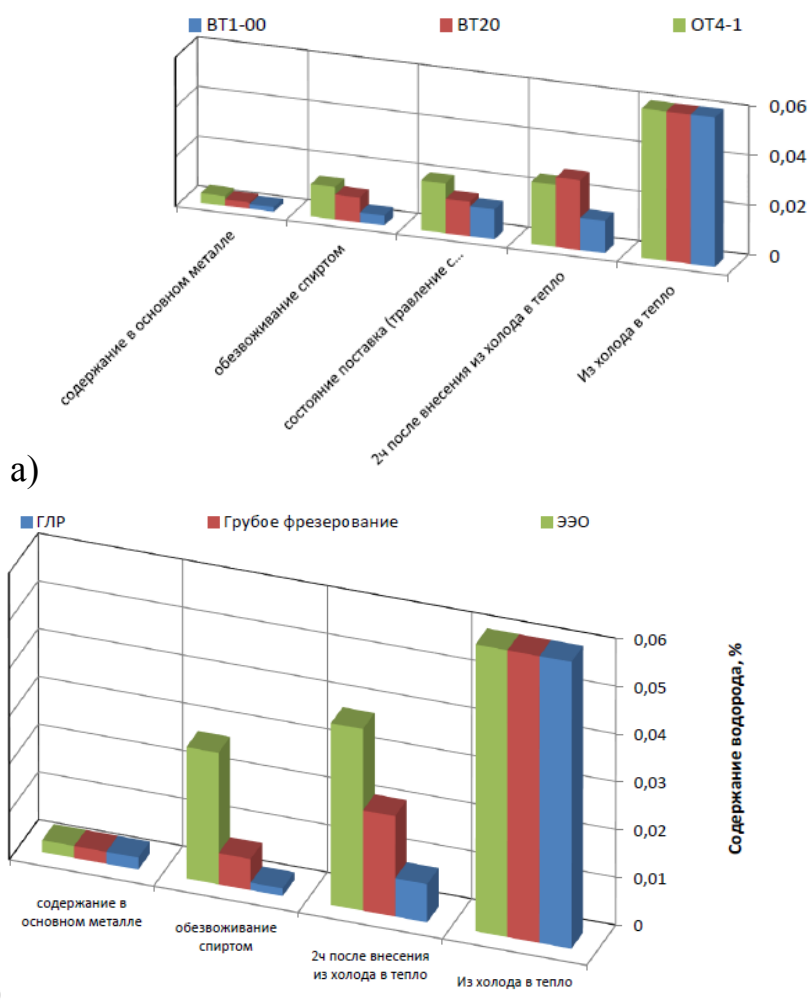


Рисунок 1.13 - Гистограмма изменения содержания водорода в плазме ЭИР (глубина кратера 0,05 мкм) в зависимости от условий хранения и обработки (а) листов из сплавов: VT1-00; VT20; OT4-1; б лист VT20 после раскроя: ЭЭО; грубое фрезерование и ГЛР в азоте

После обезвоживания образцов в спирте т.е. после удаления поверхностно-конденсированной влаги существенная разница в содержании водорода в плазме ЭИР при возбуждении ее с поверхности и в сердцевине т.е. основном металле для образцов, полученных грубым фрезерованием, травлением и особенно электроэрозионной обработкой. Последнее объясняется трудноудаляемой капиллярно-конденсированной влагой для этих видов обработки поверхности образцов.

Высокотемпературный нагрев при штамповке листовых заготовок с электроконтактного нагрева и последующие виды обработки (удаление

оксидно-нитридной пленки – травлением, опескоструиванием и т.д.) и вид отжига для снятия остаточных напряжений приводят к существенному различию содержания водорода в плазме ЭИР (рис. 3) на поверхности.

Минимальное содержание водорода в плазме ЭИР наблюдается после горячей обработки (рисунок 1.14. Предварительная обработка), что объясняется образованием оксидно-нитридной пленки на поверхности титановых сплавов, препятствующей наводороживанию поверхности при нагреве в воздушной атмосфере.

Повышение температуры штамповки приводит к незначительному увеличению содержания водорода (от 0,0096 до 0,0158 %) в плазме ЭИР на поверхности титановых сплавов по сравнению с исходным состоянием (0,0081 %), при этом отжиг в вакууме снижает содержание водорода в поверхностном слое по сравнению с отжигом в воздушной атмосфере.

Последующие операции очистки поверхности от оксидно-нитридной пленки приводят к увеличению водорода в плазме ЭИР, на поверхности, особенно, после опескоструивания, меньше при травлении, еще меньше после гидрообработки опескоструенной поверхности. Такая закономерность объясняется внесением прибывшихся частиц к поверхности капиллярно-конденсированной влаги, легко удаляемой гидрообработкой.

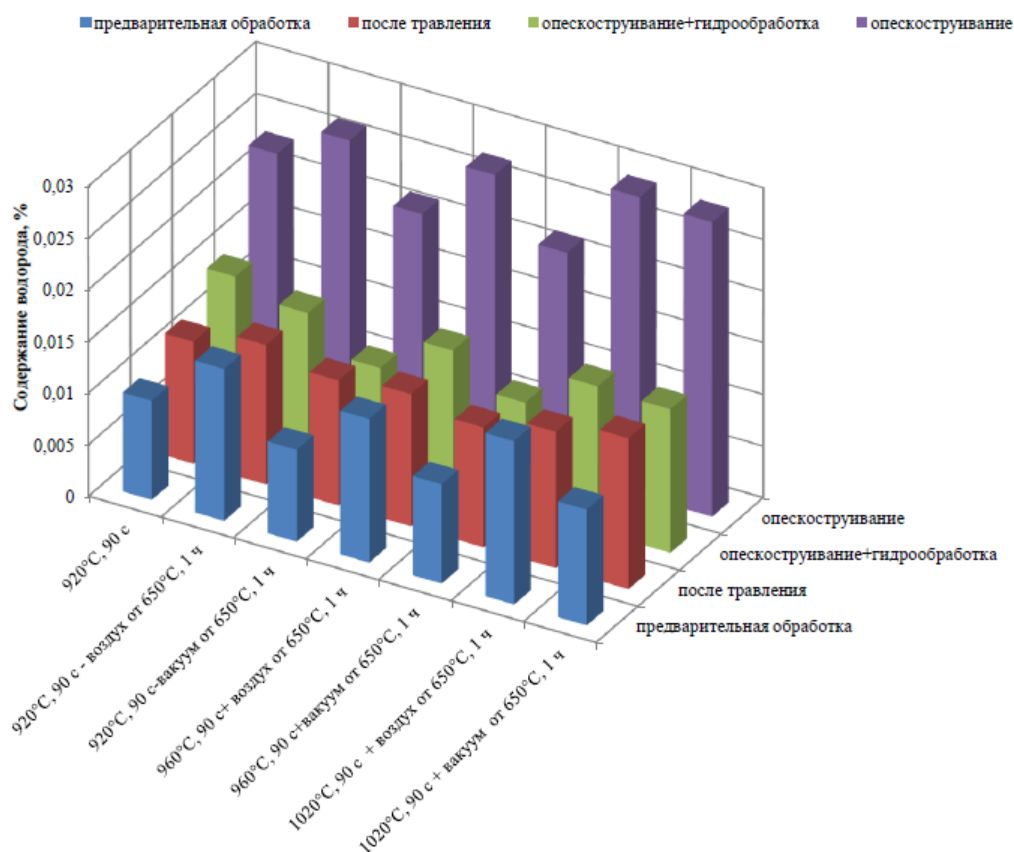


Рисунок 1.14 - Гистограмма изменения содержания водорода в плазме ЭИР возбуждаемого на поверхности образцов из сплава ВТ 20 (лист 2 мм) после различных видов операций штамповки, отжига и последующей доводочной обработки

Операции отжига, как в вакууме, так и в воздушной среде титанового сплава ВТ 20 после травления (рисунок 1.15) приводят к значительному снижению содержания водорода в плазме ЭИР на поверхности по сравнению с таким содержанием на травленной поверхности, что связано с удалением капиллярно-конденсированной влаги. Последующая выдержка титановых заготовок в условиях окружающей среды приводит к увеличению содержания водорода в плазме ЭИР на поверхности заготовок, причем тем больше, чем больше выдержка и особенно после вакуумного отжига. Это связано с тем, что окружающая среда способствует конденсации влаги на поверхности титановых заготовок, причем отжиг в вакууме активизирует, а в воздушной среде дезактивирует процесс конденсации влаги.

Дополнительные операции: сушка при 150 °С, 3 ч или обезвоживание в спирте приводят к значительному снижению водорода в плазме ЭИР на

поверхности титановых заготовок, что связано с удалением с поверхности поверхностно-конденсированной влаги.

■ в первые 8 ч ■ 3-е суток ■ 3 мес ■ прогрев 150°C, 3 ч ■ Обработка спиртом

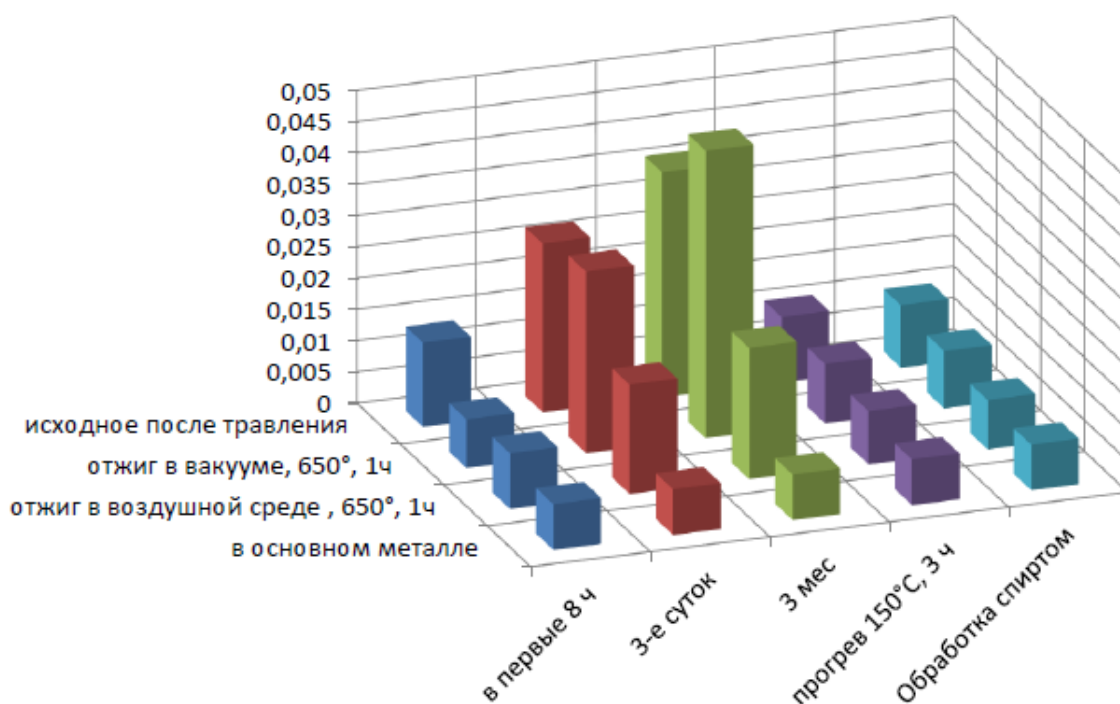


Рисунок 1.15 - Гистограммы изменения содержания водорода в плазме ЭИР возбуждаемого на поверхности листов из сплава ВТ 20 в зависимости от вида обработки

1.5 Дефекты, возникающие при электронно-лучевой сварке титановых сплавов

Процесс сварки плавлением заключается в образовании сварочной ванны плавлением свариваемых кромок и присадочной проволоки под действием источника тепла (электрическая дуга, электронный луч и др.) и последующей кристаллизацией жидкой фазы расплавленного металла [51]. При этом в объеме сварочной ванны температура неравномерная, максимальная до 2300°C. В головной части и минимальная в хвостовой части – зона закристаллизовавшегося металла. Из-за разницы скоростей теплоотвода и диффузионных процессов, в металле шва наблюдается зональная и дендритная ликвация, тем большая чем меньше выдержка сварочной ванны в расплавленном состоянии. Высокий градиент температур

между основным металлом и металлом сварного шва в процессе охлаждения вызывает структурные изменения (фазовые превращения) в околошовной зоне – от зоны сплавления до исходного состояния основного металла, а также значительные сварочные напряжения. В работе [32] приведены изменения сварочных напряжений по величине прогиба образцов из титановых сплавов в зависимости от режимов сварки. В работах [52, 53] приведена кинетика изменения напряжений в течении всего цикла от начала сварки до полного охлаждения сварочного соединения. Показано, что появление максимума напряжений связано с фазовыми превращениями при охлаждении сварной конструкции. В работе [54] рентгенографическими исследованиями и исследованиями макро- и микроструктуры установлено, что между вольфрамовым включением и металлом шва наблюдается четкая граница, а для нерасплавленной проставки такой границы не существует. В самой нерасплавленной вставке видны поры, что свидетельствует о начале плавления металла по границам зерен. Интенсификация перемешивания погруженным электродом [31; 55; 56] при применении СПВЭ на установке ГСПД-2 позволило увеличить проплавляющую способность и исключить порообразование. В работах [56-58] показано, что при импульсном электрическом разряде на поверхности титанового сплава происходит разогрев металла в зоне контакта с последующим плавлением и взрывом с выбросом из точки плавления расплава и охлаждением исходной кромки в которой не наблюдается расплавление её. Образуется так называемый наплыв. Наплывы – выплеск и кристаллизация на холодной подложке.

Наряду с известными особенностями сварки плавлением, электронно-лучевой сварке (ЭЛС) присущи такие специфические дефекты, как неравномерное проплавление корня шва, корневые дефекты, глубокие кратеры и крупные раковины [59–63]. Самым распространенным дефектом при ЭЛС является пористость, которая может привести к усталостному разрушению сварных образцов. При этом поры имеют преимущественно малый размер (0,1...1,2 мм). В большинстве случаев пористость фиксируется

вблизи зоны сплавления. Известно [64], что микропористость, не выявляемая рентгеновским контролем, оказывает заметное влияние на предел усталостной прочности соединений.

Из приведённого анализа формирования зоны сплавления при сварке плавлением титановых сплавов следует, что при прочих дефектах присущих сварному шву существуют при недостаточной проплавляющей способности может образоваться дефект в виде непровара вызывающий пористость в зоне сплавления, а также дефект в виде наплыва, вызванный кристаллизацией расплавленного металла на поверхности нерасплавленной холодной кромки металла.

1.6 Выводы по главе 1

1. Титановые сплавы являются перспективным материалом для многих областей применения в авиакосмической технике благодаря их высокой удельной прочности, сопротивлению усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости.

2. Фокусировка электронного луча имеет значительное влияние на геометрические параметры сварного шва. Выбор неоптимальной точки фокусировки или её дрейф может привести в процессе сварки к специфическим дефектам сварного шва, появлению корневых трещин и несоответствию геометрических параметров, отсутствие контроля фокусировки может привести к снижению качества сварного шва до значений, не соответствующих заявленным для технологического процесса ЭЛС.

3. При использовании ЭЛС титановых сплавов металл сварного соединения отличается значительным градиентом температур. На участке длиной всего в несколько миллиметров происходят значительные изменения в структуре от литой к перегретой в β -области и равновесной мелкозернистой структуре основного металла.

4. Наиболее распространенными дефектами при ЭЛС титановых

сплавов является мелкая пористость и корневые дефекты.

5. Вероятными причинами порообразования являются: загрязненность поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки; загрязненность защитной атмосферы; зарождение газовых пузырьков на базе наследственных дефектов; резкое увеличение скрытого давления нерастворимых в расплавленном титане газов; выделение водорода; водород, образующийся в сварочной ванне, в результате разложения влаги и углеродосодержащих и кремнесодержащих веществ, адсорбированных поверхностью торцов из-за образование твердофазного соединения в стыке кромок перед сварочной ванной, приводящее к завариванию дефектов торцов кромок и образованию газосодержащих замкнутых полостей готовых зародышей пор.

2 Анализ дефектов силовых конструкций, возникающие при ЭЛС и методика проведения исследований

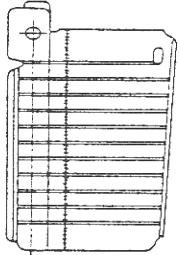
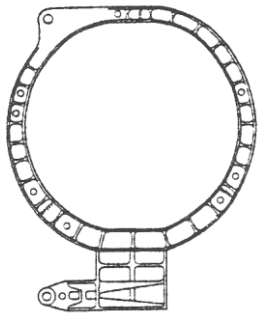
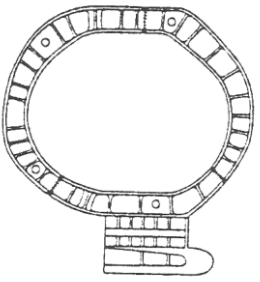
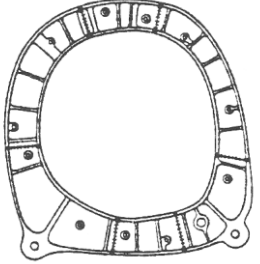
2.1 Титановые конструкции летательных аппаратов, выполняемые ЭЛС

Детали основной номенклатуры силовых конструкций из титановых сплавов современного ЛА представляют собой сложные пространственной формы заготовки, изготовление которых практически невозможно без использования таких технологических операций, как штамповка, сварка и термообработка (таблица 2.1).

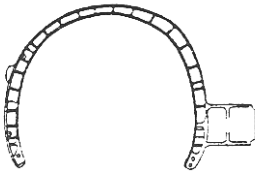
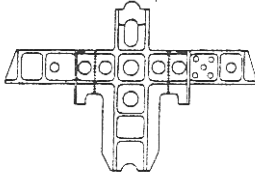
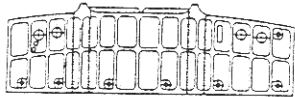
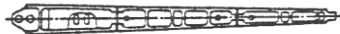

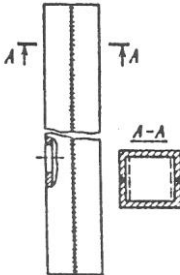
Для изготовления титановых заготовок применяют традиционные раскройные операции – механическая обработка резанием, рубка на гильотинных ножницах, штамповка, электроэрозионный раскрой [65], а также современные – плазменный и газолазерный раскрой [66].

Технология вырезки заготовок из титановых сплавов не позволяет исключить нарушение химического состава и сплошности, изменения структуры и свойств, и как результат – возникновение таких дефектов, как расслоение, разрыхление, окисление, обезлегирование, возникновение остаточных напряжений. Дефекты, возникающие в кромках заготовок, обусловлены тем или иным типом и режимами применяемой технологии.

Таблица 2.1 – Номенклатура основных штамповарных титановых силовых конструкций, выполняемых ЭЛС летательных аппаратов

Наименование	Материал, его толщина (мм), соединение, способ сварки	Эскиз конструкции
1	2	3
Задняя панель	ВТ20, 30+30, стыковое, ЭЛС	
Шпангоут	ВТ20, 64+64, ЭЛС	
Шпангоут	ВТ20, 54+54, ЭЛС	
Шпангоут	ВТ20, 44+44, ЭЛС	

Продолжение таблицы 2.1

Верхняя арка шпангоута	BT20, 40+40, ЭЛС	
Шпангоут	BT20, 29+29, ЭЛС	
Панель шпангоута	BT20, 54+54, ЭЛС	
Лонжерон	BT20, 30+30, стыковое, ЭЛС	
Лонжерон	BT20, 30+30, стыковое, ЭЛС	
Балка	BT22, 18+18, стыковое, ЭЛС	

2.2 Базовая технология изготовления титановых силовых конструкций

Традиционно для филиала ПАО «Компания «Сухой» «КНААЗ им. Ю.А. Гагарина» сборка и сварка силовых элементов в виде шпангоутов производится на электронно-лучевых установках КЛ-138 и КЛ-144. Подготовку к сварке, сварку и контроль сварных швов выполняют в соответствии с ПИ 1.4.1898-2003.

Типовая технология изготовления шпангоута заключается в следующем:

- первоначально производится зачистка поверхности стыка в зоне сварного шва с пяти сторон и выводные планки с трех сторон на участке шириной 20 мм, используя металлические щетки;

- после зачистки поверхности прилегающих зон обезжириваются ацетоном техническим ГОСТ 2768-84 и обезвоживаются спиртом этиловым техническим ГОСТ 18300-87;

- производится прихватка АрДЭС выводных планок к силовому элементу, используя вольфрамовый электрод СВИ-1 Ø3, присадочный материал из сплава ВТ1-00. Расход аргона: 7 – 9 л/мин. Требуемая сила тока – 120 А (рисунок 2.1).

- выполняется визуально-измерительный контроль на отсутствие внешних дефектов;

- открывается камера электронно-лучевой установки (ЭЛУ), выкатывается тележка с приспособлением для фиксации силового элемента и устанавливается защитный экран;

- силовой элемент фиксируется в приспособлении и производится закатка тележки в электронно-лучевую установку КЛ-144;

- выставляются сварочные стыки в горизонтальной и вертикальной плоскости, совмещая ось электронной пушки со свариваемым стыком, достигая отклонения вертикальных и горизонтальных плоскостей не более 0,2 мм;

- устанавливается требуемое рабочее расстояние от поверхности стыка до торца пушки – 200 мм;

- подготавливается программное обеспечение ЭЛУ;

- производится перемещение пушки в положение 0 и проверяется ход пушки по стыку в режиме эмуляции (рисунок 2.2);

- закрывается камера ЭЛУ, откачивается воздух;

- выставляются требуемые режимы чистки и сварки согласно технологическому процессу (таблица 2.2);

- производится чистка стыкуемых кромок расфокусированным лучом, согласно таблице 2.3;

- производится сварка горизонтальным лучом, используя программу сварки;

- открывается ЭЛУ, производится выкатка силового элемента, закрепленного в приспособлении;

- выполняется ВИК на отсутствие прожогов, кратеров, непроваров, выхода луча относительно разметочных рисок.

Таблица 2.2 – Режимы электронно-лучевой сварки элементов различных толщин

Толщина материала (мм)	Ток сварки (мА)	Ток фокусировки (мА)	Ускоряющее напряжение (кВ)	Скорость сварки (мм/с)
5-7	50-150	600-640	60±1	24-26
10-12	150-250	590-630	60±1	18-22
15	200-300	590-630	60±1	15-19
20-25	220-320	590-630	60±1	15-19
29	250-350	580-620	60±1	13-17
38-40	330-430	580-620	60±1	13-17
44-47	400-500	580-620	60±1	10-14
50-54	400-500	580-620	60±1	7-9
64-68	410-510	580-620	60±1	7-9
75-76	420-520	580-620	60±1	6-8
79-80	430-530	580-620	60±1	6-8
84-86	430-530	580-620	60±1	6-8
90-94	430-530	580-620	60±1	6-8
97	430-530	580-620	60±1	6-8
105-108	430-530	510-550	60±1	6-8
110-118	430-530	510-550	60±1	6-8

Примечание: рабочее давление в камере $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.; расстояние от торца пушки до детали 200 ± 5 мм

Таблица 2.3 – Режимы электронно-лучевой чистки стыкуемых кромок

Параметр	Значение
Кол-во проходов	1
Ускоряющее напряжение U , кВ	60
Ток сварки I , мА	10
Давление в камере, мм.рт.ст	10^{-4}
Ток фокусировки I_f , мА	600

Скорость сварки V , мм/с	15
Ток бомбардировки, мА	0,3
Развертка луча, част/амп., Гц/мм	0,6
Расстояние от пушки до детали F , мм	200
Ток накала, мА	0,3

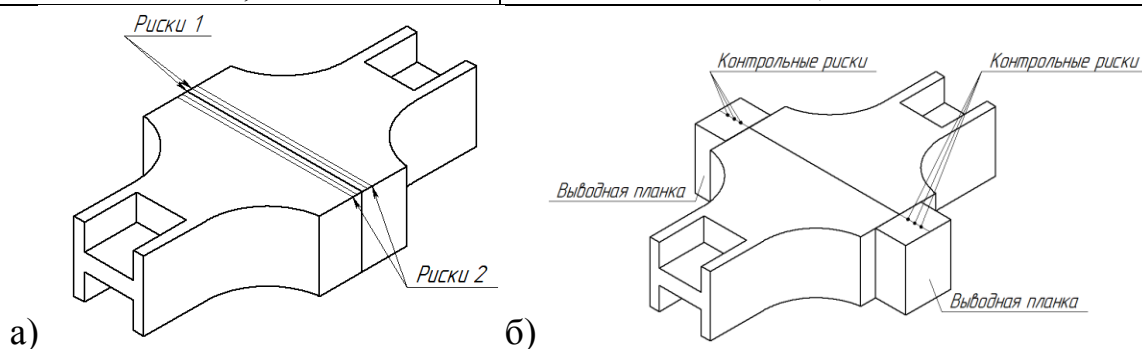


Рисунок 2.1 – Общий вид нанесения рисок и прихватки выводных планок с помощью АрДЭС:
а – вид снизу; б – вид сверху

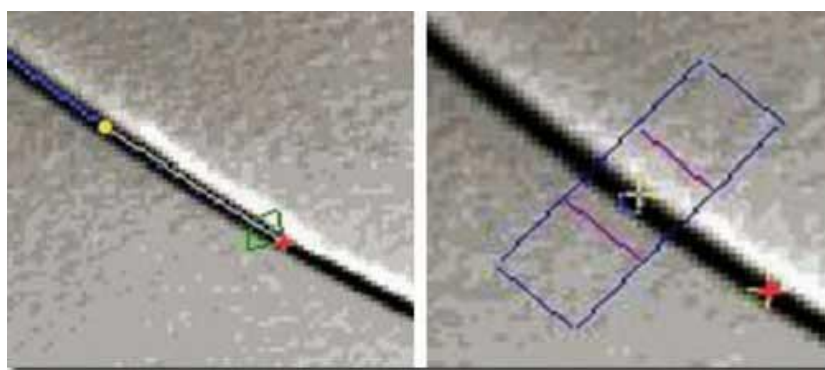


Рисунок 2.2 – Вид окна с изображением поверхности изделия на мониторе РАСТР при автоматическом обучении (слева) и при слежении за стыком (справа) (крест показывает положение пучка на изделии)

2.3 Характеристики электронно-лучевых установок 30Е3000 и КЛ-144

В 2009 г. для производства сварной балки титанового пилона российского гражданского самолета «Sukhoi Superjet 100» создана и введена в эксплуатацию установка КЛ-138 в ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина». Отличительной особенностью этой установки является наличие аппаратуры для косметического заглаживания корневой части швов, в том числе в труднодоступных удаленных местах. Для этого осуществляется поворот

пучка электронов на 90°, точность наведения пучка на стык контролируется системой РАСТР. В этом же объединении была введена в эксплуатацию установка КЛ-144 (рисунок 2.3), оснащенная двухсекционной вакуумной камерой объемом 100 м³.

За счет средств ФЦП была спроектирована и изготовлена ИЭС «имени Патона» установка ЭЛС КЛ-144, в таблице 2.4 представлены технические характеристики сварочной установки КЛ-144. Она позволяет выполнять сварку высокопрочных сталей и титановых сплавов толщиной до 150 мм и более. Зарубежные специалисты, в том числе на фирме Boeing применяют пилоны для подвески двигателей сборными на болтовых соединениях. Использование уникальной сварочной камеры, инновационной технологии сварки титана позволило выполнять силовую балку пилона на самолет SSJ-100 сварной, что снизило вес пилона и повысило его ресурс. Сварка подборок выполняется полностью в автоматическом режиме за одну установку по программе. По сравнению с установкой КЛ-138 скорость сварки увеличилась в 3,5 раза (с 30 м/с до 110 м/с), в результате уменьшилась ширина литой зоны сварного шва с 10 мм до 4,0 мм [67].



Рисунок 2.3 – Электронно-лучевая установка КЛ-144

Таблица 2.4 – Технические характеристики ЭЛУ КЛ-144

Параметры	Значения
-----------	----------

Рабочее давление в вакуумной камере, мм.рт.ст., Па	До $1 \cdot 10^{-4}$ ($133,3 \cdot 10^{-4}$)
Мощность, кВт	60
Ток пучка, мА	0,1-1000
Увеличение объекта наблюдения, крат	5

Продолжение таблицы 2.4

Внутренние размеры вакуумной камеры, мм ²		4010×2950×2950
Время достижения рабочего давления в камере, мин		25
Величина перемещения электроннолучевой пушки по координатам	X-X, мм	3000
	Y-Y, мм	1800
	Z-Z, мм	2000

В настоящее время данная установка используется для сварки особо ответственных силовых элементов в виде шпангоутов и лонжеронов летательных аппаратов.

В 2017 году для модернизации установки КЛ-138 предлагается использовать электронно-лучевую пушку от установки 30E3000. Основным преимуществом данной установки является двойное лучепреломление.

Также данная установка использовалась для проведения исследований по установлению причин образования специфических дефектов при электронно-лучевой сварке титановых сплавов. Внешний вид установки и технические характеристики приведены на рисунке 2.4 и таблице 2.5.

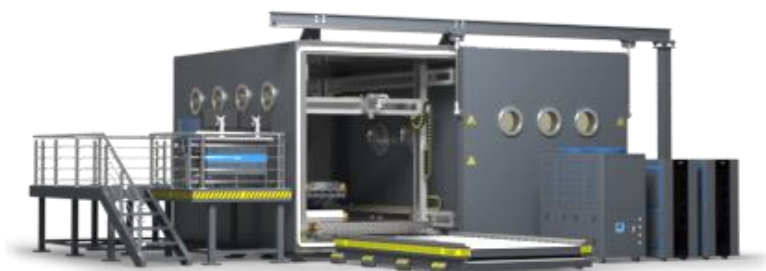


Рисунок 2.4 – Внешний вид ЭЛУ 30E3000

Таблица 2.5 – Технические характеристики установки 30E3000

Параметры	Значения
Мощность луча, кВт	30
Ускоряющее напряжение, кВ	60
Размеры вакуумной камеры, мм	4000×3000×3000

Перемещение манипулятора, мм	3000/2000/2000
Скорость перемещения, мм/с	0,1 – 50

2.4 Контроль качества силовых конструкций, выполненных ЭЛС титановых сплавов

2.4.1 Входной и визуально-измерительный контроль

Качество – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять потребности в соответствии с ее назначением. Это категория относительная и комплексная. Требования, предъявляемые к изделиям различного назначения, не могут быть одинаковыми. Качество сварных соединений оценивается совокупностью показателей: прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью, структурой металла шва и околошовной зоны, числом дефектов, числом и характером исправлений, вероятностью безотказной работы за заданное время и т.д.

Для получения качественных сварных конструкций на всех этапах их изготовления применяются различные методы контроля, обеспечивающие обнаружение дефектов и их предупреждение.

Предварительный контроль проводится до начала сварочных работ. Он включает в себя проверку качества свариваемых и сварочных материалов, техническое состояние оборудования, контроль квалификации сварщиков, дефектоскопистов и инженерно-технических работников, оценку надежности контрольно-измерительных приборов и инструментов, а также ряд других факторов.

Задача предварительного контроля - подтвердить соответствие подготовки к сварочным работам требованиям Правил, стандартов, нормативно-технической документации и прочих документов. Цель контроля на этом этапе - исключить причины, которые могут привести к возникновению дефектов в сварном соединении.

Операционный контроль выполняется в процессе производства сварочных (наплавочных) работ. Он включает в себя: проверку соответствия квалификации (аттестации) сварщика выполняемым работам, соответствия основных и сварочных материалов проектным, качества подготовки и сборки под сварку (чистота кромок, количество, расположение и качество

прихваток, отсутствие смещения и перелома, и т.д.), соответствие технологии сварки, проектной (предварительный подогрев, сварочные режимы, порядок наложения швов и т.д.). Контроль на этом этапе направлен на предупреждение дефектов в сварных швах.

Приемочный контроль проводится с целью предупреждения несоответствия качества сварного шва (наплавки) и сварного соединения, выполненных при изготовлении (монтаже, ремонте) сварных конструкций и при исправлении дефектов требованиям Правил, стандартов, тех. условий, нормативно технической документации, рабочих чертежей и др. Контроль на этом этапе включает в себя неразрушающий контроль (физические методы) или контроль с разрушением (лабораторные методы).

Методы контроля качества сварных соединений устанавливает ГОСТ 3242-79. Применение метода или комплекса методов контроля для обнаружения дефектов сварных соединений при контроле конструкций при ее изготовлении, ремонте и реконструкции зависит от требований, предъявляемых к сварным соединениям в технической документации на конструкцию. Технология и критерии контроля сварных швов любым методом должна быть установлена в нормативно-технической документации на изготовление оборудования или конструкций. Контроль качества материала, прежде всего, предусматривает проверку его соответствия требованиям сертификата завода-поставщика и имеет цель выявления внешних дефектов: трещин, расслоений, состояние поверхности (наличие окалины, ржавчины) и других нарушений.

Контроль качества неплавящегося электрода (используемого для прихватки выводных планок к силовому элементу) осуществляется в соответствии с ТУ48-19221-83 на вольфрамовый неплавящийся электрод. Этот стандарт регламентирует марки электродов, их химический состав, а также диаметры, правила приемки и методы испытаний, требования упаковки, маркировке, транспортировании и хранению.

Контроль оборудования, инструмента и оснастки осуществляется проверкой их исправности. При этом необходимо исходить из того, что источники питания сварочным током должны быть снабжены амперметрами и вольтметрами. Все приборы также периодически подвергаются проверке.

Состояние сварочного оборудования, аппаратуры и сборочно-сварочных приспособлений должно проверяться:

- сварщиками (сборщиками) ежедневно в начале смены;
- мастерами по сварке или другими лицами, ответственными за состояние оборудования – ежедневно;
- специальными контролерами (наладчиками и электриками) - ежемесячно или согласно графику профилактического осмотра или ремонта.

К изготовлению изделия допускаются только те сварщики, которые прошли испытания в соответствии с «Правилами аттестации сварщиков», утвержденными Госгортехнадзором. Главная задача такого контроля состоит в том, проверить квалификацию сварщиков. Аттестация сварщиков осуществляется комиссией.

Правила предусматривают также дополнительную проверку знаний, которую проводят:

- периодически не реже одного раза в год;
- при длительном перерыве в работе по своей специальности;
- при переходе на новые для сварщиков способы сварки или виды работ;
- при сварке изделий из новых материалов или при существенном изменении технологии сварки.

Контроль сварных соединений осуществляется для выявления внешних и внутренних дефектов сварного шва.

На каждой стадии сварки сварные соединения подлежат внешнему осмотру и измерениям с целью выявления в них следующих дефектов: трещины всех видов и направлений, пористости наружной поверхности шва, подрезы, прожоги, незаплавленные кратеры, не прямолинейность

соединяемых элементов, несоответствия формы и размеров швов требованиям технической документации. Контроль режима сварки заключается в проверке параметров тока, их стабильности, количества проходов, мощности тока, скорости сварки.

Визуальный контроль выполняется до проведения других методов контроля. Дефекты, обнаруженные при визуальном контроле, должны быть исправлены до проведения контроля другими методами. При необходимости механической обработки визуальный контроль выполняют после мех. обработки. Измерения производятся с использованием приборов и инструментов:

- лупы измерительные;
- линейки измерительные металлические с делением 1 мм и менее;
- угольники;
- штангенциркули;
- щупы;
- шаблоны и др.

Осмотр и измерения сварных соединений должны производиться с наружной и внутренней сторон по всей протяженности швов. Ответственные за контроль: сварщики, производственный мастер, ОТК. С целью выявления в сварных соединениях внутренних дефектов используют разрушающий и неразрушающий метод контроля. Для контроля сварных швов силовых конструкций применяется рентгеновский метод контроля по ГОСТ 7512-82, и метод определения механических свойств по ГОСТ 6996-66.

В магистерской диссертации по теме «Обеспечение качества сварных соединений силовых конструкций из титановых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой» контроль качества, производится согласно ПИ 1.4.1898 – 2003, категория сварного соединения – первая, включающая в себя внешний осмотр, ренгенконтроль и механические испытания.

Перед сваркой проверяется шероховатость стыка и прилегающих зон (Ra 3.2). Производится очистка стыкуемых кромок и прилегающих к ним

поверхностей на ширину не менее 20 мм от окалины, ржавчины, краски, масла и т. п. и зачистки этих участков до блеска с пяти сторон и выводные планки с трех сторон. После очистки стыкуемых кромок производится обезжиривание ацетоном техническим ГОСТ 2768-84 и обезвоживание спиртом этиловым техническим ГОСТ 18300-87.

После закрепления и закатки тележки с силовым элементом в электронно-лучевую установку производится проверка совпадения электронного луча по стыку в режиме коррекции и режиме эмуляции по контрольным рискам.

По окончании сварки производится ВИК на отсутствие прожогов, кратеров, непроваров, выхода луча относительно разметочных рисок.

2.4.2 Радиографический контроль силовых конструкций

Рентгеновские лучи и гамма-лучи обладают ценными свойствами: способны проходить через непрозрачные предметы (металлы); действуют на фотопленку (рентгеновскую пленку); способны вызвать свечение (флюоресценцию) некоторых химических элементов, что используется при применении усиливающих экранов во время просвечивания сварных швов. Источником рентгеновских лучей служит рентгеновская трубка. Пучок лучей направляется на сварное соединение перпендикулярно оси шва. С другой стороны шва устанавливают светонепроницаемую кассету, в которой находятся рентгеновская пленка и два экрана, усиливающие изображение. Дефектные места шва - газовые поры, шлаковые включения, трещины и другие - в меньшей степени снижают интенсивность проникающих лучей, чем сплошной металл. Степень засвечивания пленки будет больше в местах расположения дефектов.

Время просвечивания (экспозиция) зависит от толщины проверяемого металла, фокусного расстояния, интенсивности излучения и чувствительности пленки. После просвечивания пленку проявляют, как это обычно делается в фотографии. На полученном негативе будут видны

отдельные, более темные участки, по которым можно судить о наличии и размерах дефектов в сварном шве или околошовной зоне.

При просвечивании рядом со швом (параллельно ему), со стороны источника излучения, устанавливают дефектометр, который служит для определения глубины залегания и величины обнаруженного дефекта. Обнаружения скрытых дефектов осуществляется путем просвечивания контролируемых объектов гамма-излучением радиоактивных нуклидов и регистрации полученного изображения на рентгеновскую пленку.

Метод просвечивания рентгеновскими лучами включает следующие основные операции:

- подготовка сварного изделия к просвечиванию;
- определения условий и режима просвечивания;
- просвечивание, фотообработка и сушка пленки;
- расшифровка рентгенограмм и оценка качества.

Рентгенографический контроль сварных швов силовой конструкции ЛА осуществляется с помощью рентгенографического комплекса ЭКСТРАВОЛЬТ-225.

В таблицах 2.6 и 2.7 представлены режимы радиографического контроля силовых шпангоутов ЛА.

Таблица 2.6 – Режимы радиографического контроля шпангоута 42

№ ПС	№ Участка	F, мм	U, кв	I, мА	τ , мин
1	1, 2	750	90	6	2
	3, 8		80	6	1,5
	5, 11		80	5	1
	4, 12		100	6	3,5
	6, 10		90	5	1
	7, 9		100	6	3,5
2	1	750	80	5	1
	2, 3		90	6	2
	4, 5		100	6	2,5
3	1	750	80	5	1
	2, 3		80	5	1
	4, 5		90	6	1
СБ	1	750	80	5	1
	2, 3		100	6	4
	4, 5		100	6	3,5
	6, 11		80	6	1

	7, 8		80	6	1
<i>Примечание:</i> F – расстояние от рентгеновской пушки до контролируемой поверхности; U – напряжение на трубке; I – ток трубки; τ – время экспозиции					

Таблица 2.7 – Режимы радиографического контроля шпангоута 38

№ ПС	№ Участка	F, мм	U, кв	I, мА	τ , мин
1	1	750	90	6	1
	2		80	5	1
	3, 4		70	5	1
	5, 6		80	5	1,5
	7, 8		100	6	1, 3
	9, 10		80	6	1
2	1	750	70	5	1
	2, 3		90	6	1
	4		80	6	1,5
3	1, 4	750	70	5	1
	2, 3		80	5	1
	5, 6		80	6	1, 5
СБ	1	750	80	5	1
	2, 3		100	6	1,5
	4, 5		100	6	3
	6		70	5	1
	7		100	6	1,5
	8, 12, 13		90	6	1
	9		90	6	1
	10, 11		100	6	1,5

Примечание: F – расстояние от рентгеновской пушки до контролируемой поверхности;
U – напряжение на трубке; I – ток трубки; τ – время экспозиции

Схемы радиографического контроля силовых шпангоутов 42 и 38 представлены на рисунке 2.5.

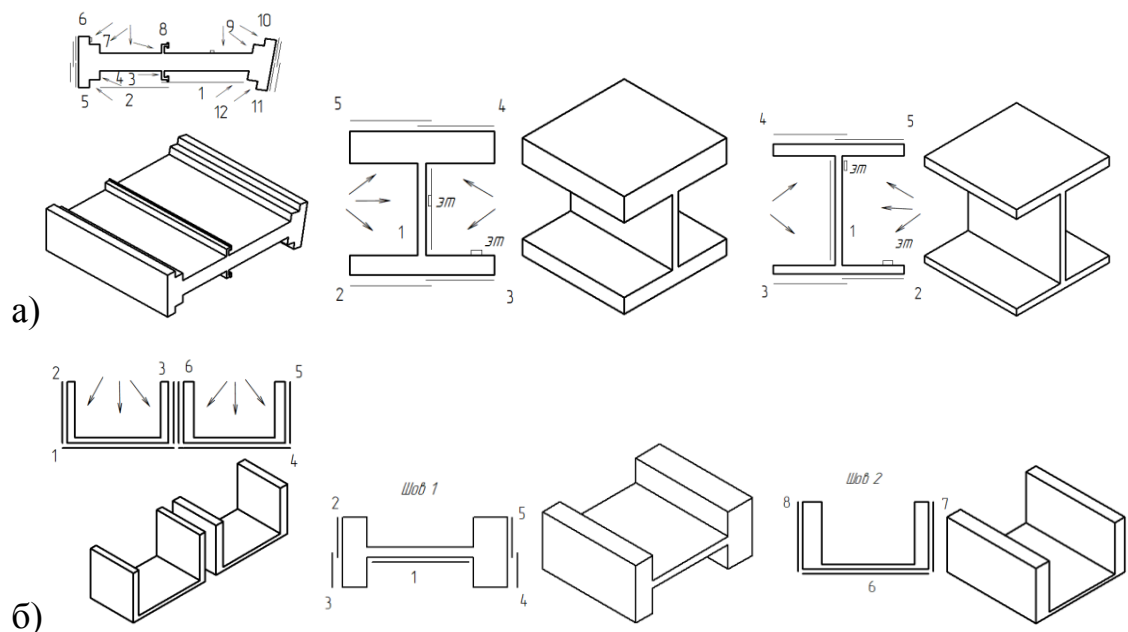


Рисунок 2.5 – Схемы контроля силовых элементов:
а – шпангоут 42; б – шпангоут 38

Оценка качества производится согласно ПИ 1.4.1898-2003 (приложение А).

2.4.3 Испытания механических свойств сварных соединений

Образцы для метода определения механических свойств отбирают из проб, вырезанных непосредственно из контролируемой конструкции или от специально сваренных для проведения испытаний контрольных изделий. В данной технологии применяются образцы свидетели 100x270 мм. Образец-свидетель после сварки отжигается вместе с силовым элементом. В данной технологии применяются испытания на:

- ударный изгиб;
- статическое растяжение;
- статический изгиб.

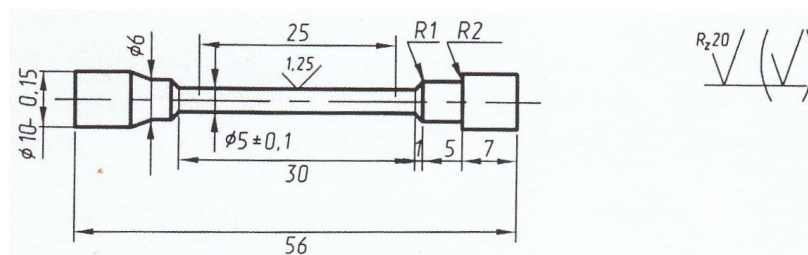


Рисунок 2.6 – Образец для испытаний на статическое растяжение

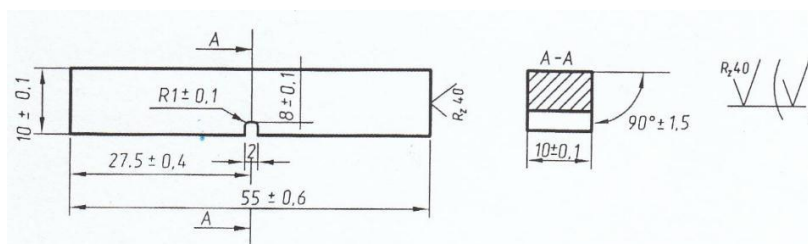


Рисунок 2.7 – Образец для испытаний на ударный изгиб

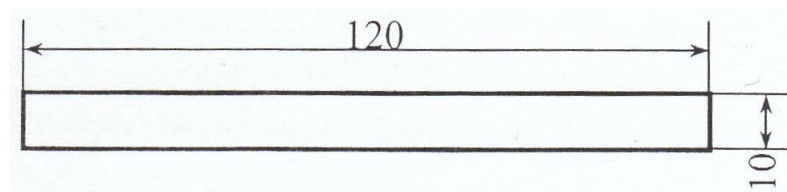


Рисунок 2.8 – Образец для испытаний на статический изгиб

Норма прочности сварных соединений согласно ПИ 1.4.1898-2003 составляет $\sigma_B = 86,5 \dots 102,5$ кгс/мм².

Испытания на статический изгиб проводят для стыковых соединений. При испытании определяют способность соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб. Эта способность характеризуется углом изгиба α , при котором в растянутой зоне образца образуется первая трещина, развивающаяся в процессе испытания. Если длина трещин, возникающих в процессе испытания в растянутой зоне образца, не превышает 20 % его ширины, но не более 5 мм, то они не являются браковочным признаком. Определяют также место образования трещины или разрушения (по металлу шва, металлу околошовной зоны или основному металлу).

Норма угла загиба согласно ПИ 1.4.1898-2003 составляет 31 град.

2.5 Аналитическая оценка выявленных дефектов при технологическом контроле образцов спутников силовых конструкций титановых сплавов, выполненных ЭЛС

В серийном производстве ЛА ЭЛС производили на установках КЛ-138, КЛ-144 [68]. Использование рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225 при контроле качества позволило выявить наряду с пористостью и несплавлением дефект в виде темных полос (рисунок 2.9).

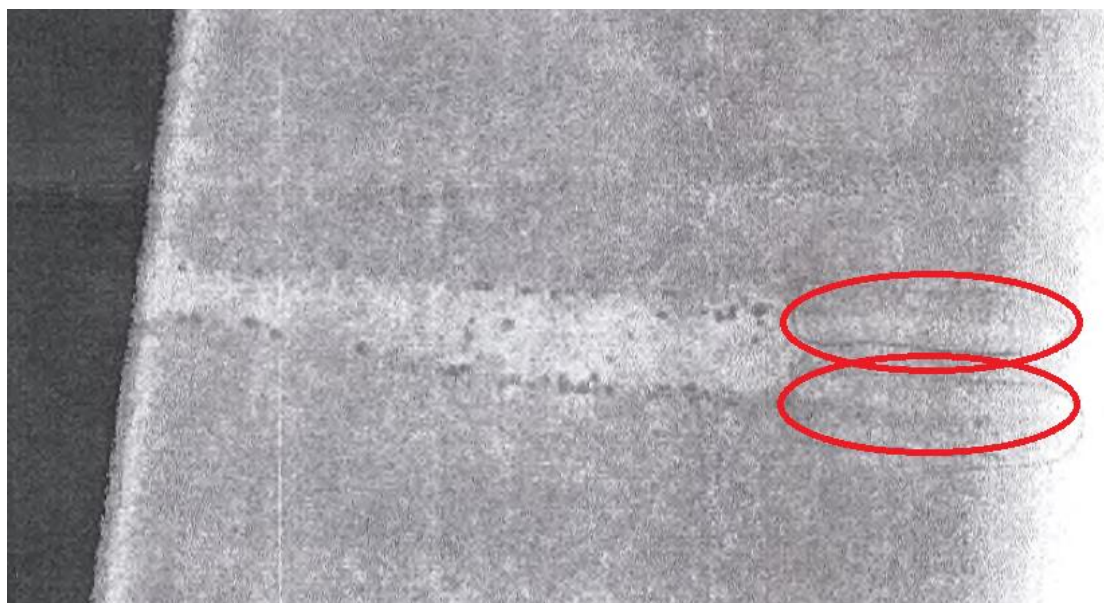


Рисунок 2.9 – Дефект в виде темных полос

Целью настоящего исследования ставилось провести аналитическую оценку выявленных дефектов в серийном производстве ЛА за двухлетний

период. Анализ проводился на сопроводительных образцах при технологическом контроле.

Общее количество образцов составило 11 шт., из них 5 выполнены из сплава ВТ23, 6 из сплава ВТ20. Толщины свариваемых стыков приведены в таблице 2.8. Контроль качества проводили с использованием рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225.

Таблица 2.8 – Толщины сварных соединений по технологическим образцам

Номер образца-спутника	Толщина стыка, мм	
	ВТ20	ВТ23
1	24	
2	29	
3	40	
4, 4'	44	44
5	54	
6	64	
7		75
8		97
9		108
10		112

Анализ видов, количества и места расположения дефектов сварных швов выполненных ЭЛС по толщинам и марке материала титановых сплавов позволил установить некоторые особенности образования дефектов

Как для сплава ВТ20, так и для сплава ВТ23 при рентгеноскопии выявили дефекты: в виде темных полос, цепочек пор, непроваров, а несплавления только у образцов из сплава ВТ23.

Максимальное количество дефектов: у образца 4, $\delta = 44$ мм из сплава ВТ20; у образца 7, $\delta = 75$ мм из сплава ВТ23 (таблица 2.8), причем доминирующим дефектом для ВТ20 является дефект темные полосы, а для ВТ23 – цепочки пор.

Из данных рисунка 2.10, видны места расположения дефектов.

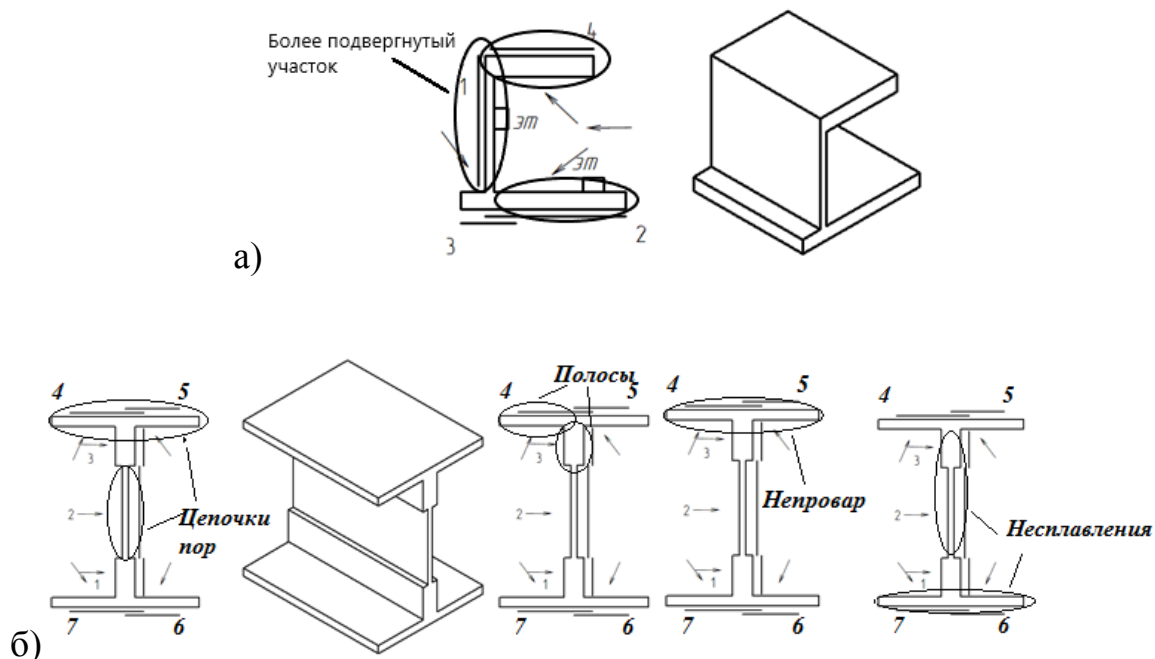


Рисунок 2.10 – Места расположения дефектов в сварном соединении:
а – сплав ВТ20; б – сплав ВТ23

В количественном отношении дефекты распределяются соответственно для сплава ВТ20 (рисунок 2.11, а), для сплава ВТ23 – рисунок 2.11, б, причем если для сплава ВТ20 общее количество доминирующего дефекта – темные полосы – 88%, то для сплава ВТ23 общее количество дефектов составило: цепочки пор – 41%, непровар 31%, несплавление 19%, темных полос зафиксировано 9%.

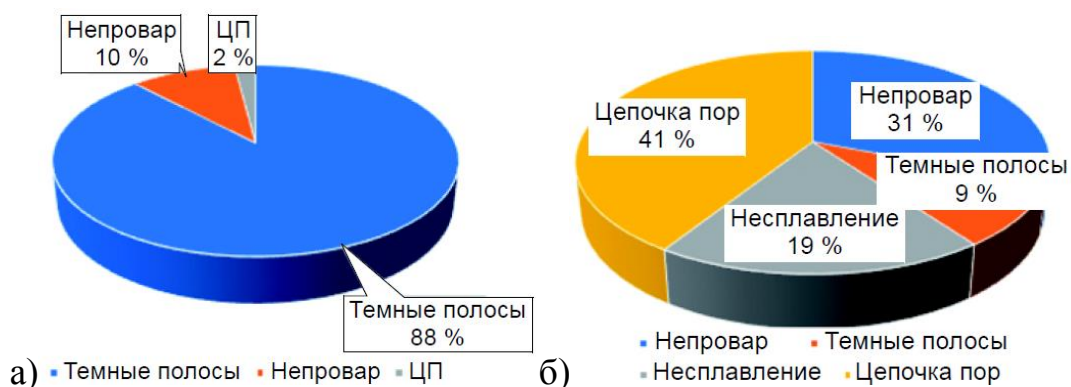


Рисунок 2.11 – Диаграммы количественного распределения дефектов ЭЛС образцов из сплавов:
а – ВТ20; б – ВТ23

Установлено, что распределение дефектов происходит по определенным участкам (рисунок 2.12).

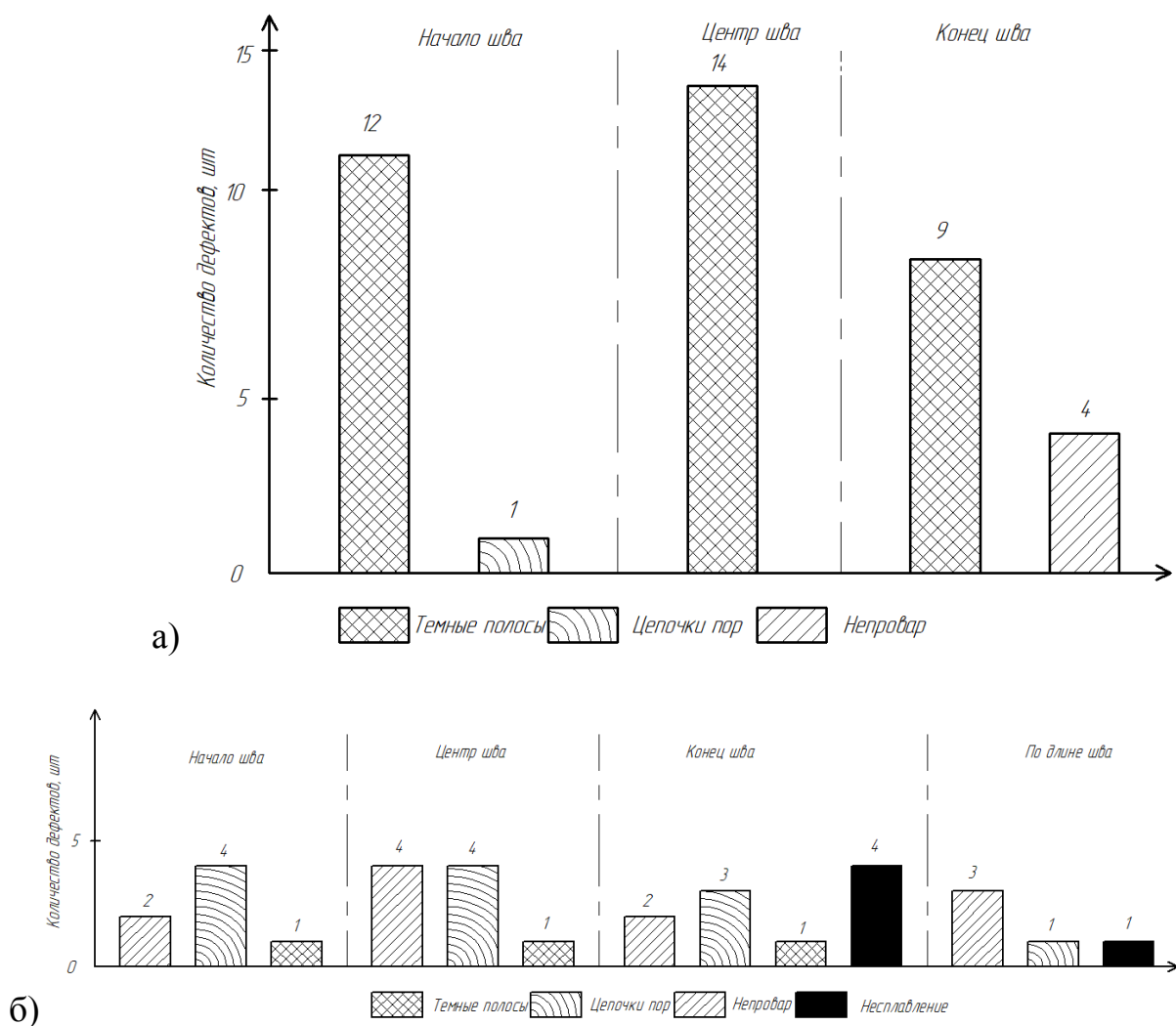


Рисунок 2.12 – Гистограммы распределения различных дефектов по участкам сварного соединения:
а – сплав VT20; б – сплав VT23

Максимальное количество дефектов расположено в начале сварного шва, как для сплава VT20, так и для сплава VT23. Для сплава VT20 доминирующий дефект темные полосы располагаются преимущественно в начале сварного соединения по глубине в центре (рисунок 2.12, а), а для сплава VT23 доминирующий дефект в виде цепочек пор располагается в основном в начале сварного соединения, непровар и несплавления преимущественно ближе к корню шва (рисунок 2.12, б).

Из общего количества проконтролированных деталей с образцами спутниками дефектных оказалось всего 7,7%.

Установленные особенности появления дефектов при ЭЛС исследуемых титановых сплавов позволяют утверждать, что их образование связано с определёнными условиями проведения тех или иных технологических операций. Например, если говорить об образовании пор, то установленный ранее факт [69] грубой обработки поверхности стыкуемых кромок с наличием капиллярно-конденсированных загрязнений. Необходимо выяснить какие операции вызывают образование темных полос, непровары и несплавления.

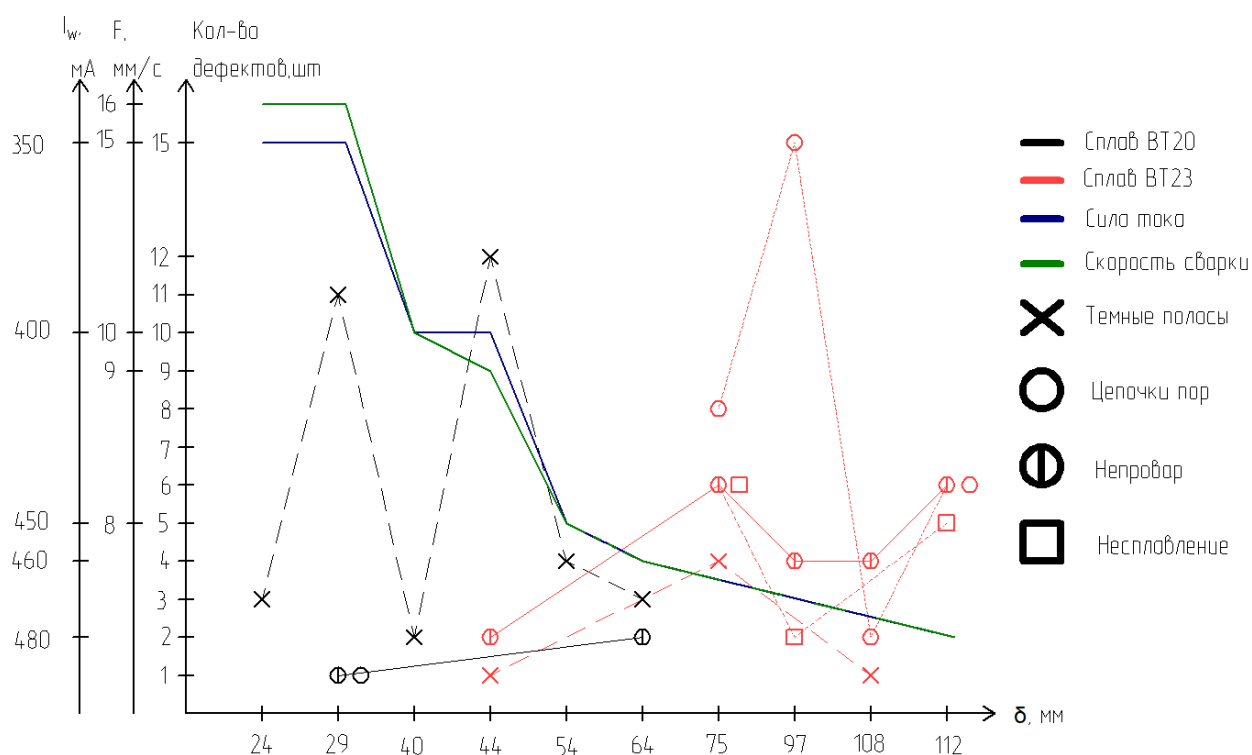


Рисунок 2.13 – Влияние режимов ЭЛС, толщины свариваемых заготовок и марки материала на образование видов дефектов и их количества

Установлено (рисунок 2.13), что при скорости сварки от 16 до 7 мм/с и толщиной стыка от 24 до 75 мм, образцы наиболее подвержены появлению специфического дефекта в виде темных полос. При скорости сварки от 6 мм/с и толщиной стыка более 75 мм, образцы менее подвержены темным полосам, но наиболее таким дефектам как цепочки пор, несплавление и непровар.

Такая закономерность связана с неравномерным распределением температурного поля по объему свариваемой заготовки и временем существования расплавленной ванны.

Эти факторы оказывают существенное влияние на удаление капиллярно-конденсированных загрязнений с поверхности стыкуемых кромок, неэффективен прогрев расфокусированным лучом зоны стыка, который составляет по скорости всего 15 мм/с, когда для удаления ККВ требуется выдержка при 300°C около часа [32]. Скорости чистки и прихватки и тепловложения при 10 мА, недостаточно чтобы полностью удалить ККВ, так же, как и при самой ЭЛС. В последнем случае при ЭЛС в начале недостаточно образование температурных сжимающих напряжений для формирования крупных замкнутых полостей заполненных ККВ, тем не менее образование частичных малых полостей с ККВ происходит.

Можно предположить, что в этом участке происходит в первоначальный момент бурное взаимодействие ККВ с расплавом металла и образующийся атомарный водород в результате диссоциации загрязнений растворяется в расплаве сварочной ванны. При кристаллизации расплава, как известно [70] образуются не только твердый раствор водорода в α -титане, но и гидрид титана TiH_2 (рисунок 2.14).

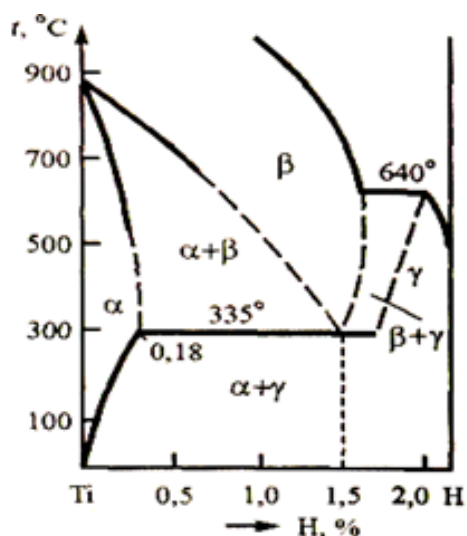


Рисунок 2.14 – Диаграмма состояния Ti-H₂

Предполагается, что растворение водорода в титане увеличивает параметр кристаллической решетки до 15%, вызывающий образование существенных внутренних напряжений, вместе с этим происходит образование гидрида титана TiH_2 , плотность которого составляет 3,76 г/см³, меньше плотности титана, что и вызывает при рентгеноскопии появление темных полос.

Факторами подтверждающими появление темных полос связанных с уменьшением плотности являются: во-первых следом за темными полосами на рентгенограмме выявляются вначале цепочки пор, а затем и поры; во-вторых темные полосы исчезают при повторном нагреве, что связано как известно [70] с обратным процессом выделения водорода из металла или его диффузионным распределением в объеме металла. С порами этого не происходит. Отсюда следует вывод необходимо исключить образование ККВ на поверхности стыкуемых кромок.

Наличие несплавлений и непроваров может быть вызвано как недостаточным тепловложением и недостаточной пробивной мощности луча [64], так и некорректным заданием хода луча по координатам. Еще до 2000-х гг. были известны и применялись такие методы управления лучом, как импульсная модуляция мощности электронного луча, колебательные перемещения фокальной мощности луча по вертикали и осцилляция луча по траекториям различного вида. Применение данных методов было направлено в основном на устранение специфических дефектов в сварных швах, таких как корневые дефекты (пикообразная глубина проплавления, наличие полостей или несплавлений), протяженные полости в объеме шва, «серединные» трещины и отклонения шва от стыка из-за остаточных или наведенных магнитных полей [19, 71-74].

Анализом подготовки заготовок под сварку и особенно выполнения зазора стыкуемых кромок было установлено, что корректировка электронного луча ведется по контрольным рискам с лицевой стороны, а

риски 1 и 2 наносятся на обратную сторону, что не обеспечивает должным образом корректный проход луча в режиме эмуляции (рисунок 2.15).

К этому необходимо добавить допуск на зазор между стыкуемыми кромками (0.2 мм), неудовлетворительная шероховатость может привести к неравномерности его величины из-за некачественной механической обработки.

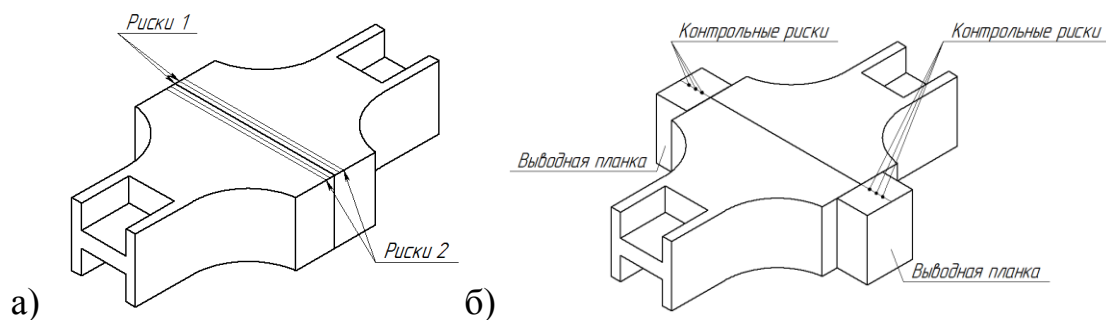


Рисунок 2.15 – Общий вид нанесения рисок и выводных планок:
а – вид снизу; б – вид сверху

Следовательно, некорректный проход луча и недостаточная пробивная мощность в зоне стыка является одной из причин образования несплавлений и непроваров в середине и корне сварного соединения. При прохождении луча, заведомо некорректно расположенного, происходит оплавление одной из кромок сварного стыка, ввиду этого происходит создание замкнутых полостей и несплавлений.

Таким образом по результатам аналитической оценки установлено следующее:

1. Преимущественное расположение дефектов их вид, место и количество свидетельствуют о влиянии технологических операций на их образование.

2. Место расположения, режимы ЭЛС позволяют предполагать, что образование темных полос связано с недостаточным удалением ККВ – прогревом расфокусированным лучом, а ЭЛС в начале не образует замкнутых полостей готовых зародышей, и ККВ взаимодействуя с расплавом непосредственно путем диссоциации и образованию твердого раствора

водорода в α -титане и гидрида титана с плотностью ниже плотности металла шва.

3. Ошибка в корректировке электронного луча, недостаточная пробивная мощность могут привести к появлению непроваров и несплавлений.

Требуются дальнейшее проведение исследований, как для уточнения причин появления дефектов, так и установление влияния на структурные изменения и свойства сварных соединений ЭЛС, кроме того необходимо разработать рекомендации по исключению появления специфических дефектов, а также уменьшению цикла изготовления сварных титановых конструкций, что позволит избежать увеличения трудоемкости за счет исключения операций удаления дефектов.

2.6 Методика исследований по выявлению факторов образования специфических дефектов при ЭЛС титановых сплавов

Первым этапом исследований являлась аналитическая оценка выявленных дефектов при технологическом контроле образцов спутников в серийном изготовлении силовых титановых конструкций, выполненных из сплавов ВТ20 и ВТ23. Определены наиболее дефектные участки сварных соединений и установлены основополагающие гипотезы, уточняющие факторы порообразования при ЭЛС титановых сплавов. Основываясь на теории порообразования авторов В.В. Фролова, Г.Д. Никифорова, Замкова В.И. предполагается что дефект в виде темных полос вызван неудовлетворительной подготовкой стыкуемых кромок под сварку и наличием на них капиллярно-конденсированной влаги и загрязнений.

Для установления причин образования специфических дефектов и уточнения причин порообразования произведена электронно-лучевая сварка темплетов из сплава ВТ23 и ВТ20. Сварка темплета из сплава ВТ23 производилась при помощи установки 30Е3000 (г. Томск) на корневую часть темплета зафиксирована технологическая подкладка, темплеты из сплава

ВТ20 выполнялись на ЭЛУ КЛ-144 (г. Комсомольск-на-Амуре). Выбор режимов ЭЛС указанных заготовок обоснован исходя из аналитической оценки появления дефектов в процессе серийного производства сварных конструкций.

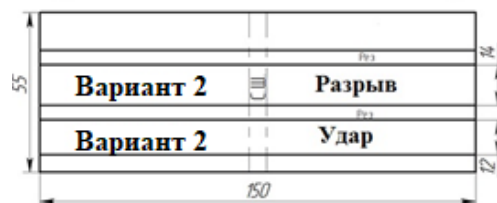
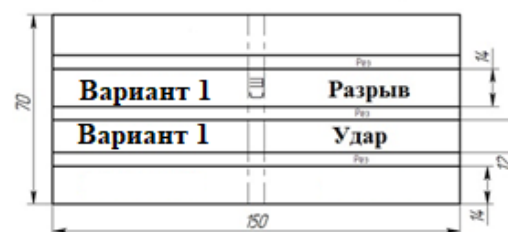
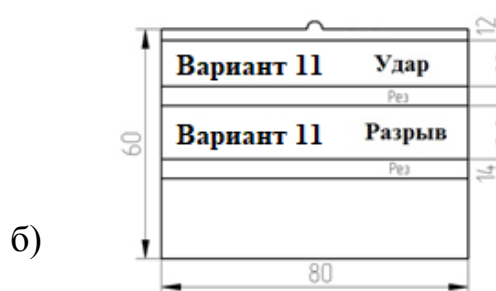
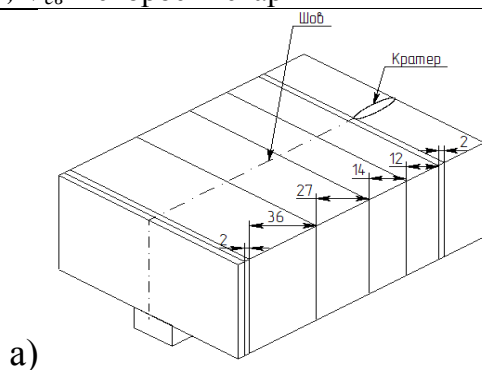
Внешний вид темплетов с указанием габаритов раскроя после сварки приведен на рисунке 2.16, режимы сварки и толщины свариваемых элементов представлены в таблице 2.9.

Подготовка стыкуемых кромок не производилась (обезжиривание, обезвоживание, прогрев расфокусированным лучом) с целью увеличения вероятности появления специфических дефектов.

Таблица 2.9 – Режимы сварки темплетов из сплавов ВТ20, ВТ23 с указанием толщин заготовок, протяженности шва и ЭЛУ

ЭЛУ	Марка сплава	Протяженность шва, мм	Толщина заготовки, мм	Режимы сварки			
				I_w , мА	I_f , мА	F, мм	$V_{св}$, мм/с
30E3000	ВТ23	130	50	415	600	200	7
КЛ-144	ВТ23	93	70	470			10
КЛ-144	ВТ20	60	60	470			10
КЛ-144	ВТ20	123	20	230			15

Примечание: I_f - ток фокусировки; I_w – ток сварки; F – расстояние от торца пушки до детали; $V_{св}$ – скорость сварки



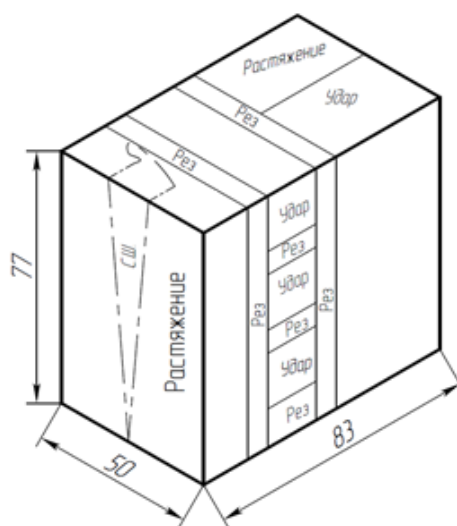


Рисунок 2.16 – Схема раскроя образцов: а – сплав ВТ23; б – сплав ВТ20

Раскрой сварных соединений производился на ленточных пилах, на установке ДАНОБАТ с охлаждающей эмульсией. Внешний вид темплета из сплава ВТ23 после сварки и раскроя представлен на рисунке 2.17. При этом сварка темплета из сплава ВТ23 ($\delta = 70$ мм) производилась при использовании технологических выводных планок, привариваемых к основному элементу с помощью АрДЭС. Сварка темплета из сплава ВТ20 производилась без выводных планок (рисунок 2.17, в).

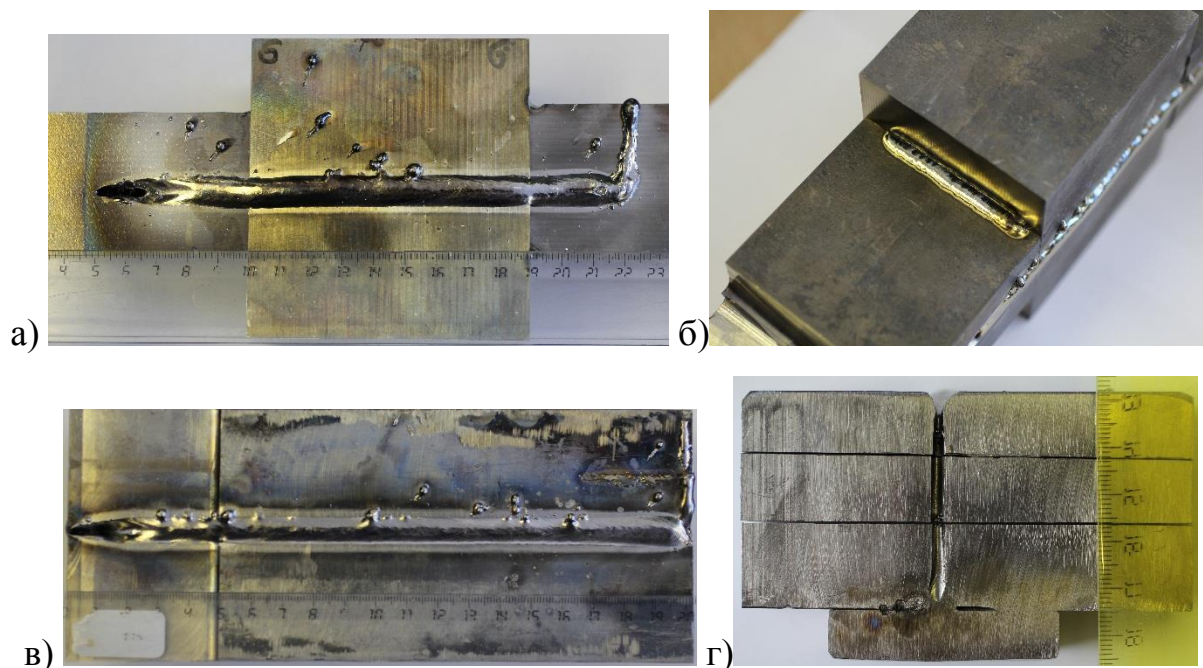


Рисунок 2.17 – Внешний вид темплетов, выполненных ЭЛС: а – темплет из сплава ВТ23 $\delta = 70$ мм; б – прихватка АрДЭС выводной планки; в – темплет из сплава ВТ20 $\delta = 60$ мм; г – раскрытый кратер на исходе электронного луча для проведения механических испытаний и анализа процессов протекающих на выходе луча

После раскроя проведен радиографический контроль полученных образцов на установке для радиографического контроля марки ЭКСТРАВОЛЬТ-225 (таблица 2.10). Максимальная чувствительность радиографического комплекса составляет 0,1 мм.

Таблица 2.10 – Технические характеристики рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225

Максимальное напряжение на трубке, кВ	225
Максимальный анодный ток трубки, мА	20
Максимальная мощность на аноде трубки, Вт	3000
Глубина просвечивания при стали, мм	76
Пределы регулировки высокого напряжения, кВ, с шагом 0.1 кВ	10...225
Пределы регулировки тока трубки, мА, с шагом 0.1 мА	0.5...20

Оценка качества полученных снимков производилась согласно ПИ 1.4.1898-2003.

Также произведена термическая обработка сварных соединений полученных образцов (сплав ВТ23), с целью выявить влияние термической обработки на качество удаления специфических дефектов – отжиг 750°C в течении 30 минут, старение в течении 10 часов при температуре 550°C.

Испытания механических свойств на статическое растяжение полученных образцов производились на испытательных машинах Instron 3382 (ФГБОУ ВО «КнАГУ») и Shimadzu AG-X (ИМиМ ДВО РАН). Динамические испытания производились на маятниковом копре JBW-300.



Рисунок 2.19 – Внешний вид универсальной испытательной машины Instron 3382

Таблица 2.11 – Технические характеристики Instron 3382

Параметр	Значение
Максимальная нагрузка, кН	100
Скорость мин, макс, мм/мин	0,05 – 500
Точность измерения напряжений и деформаций, %	0,5

Измерение твердости производились по методу Виккерса на микротвердомере Shimadzu HNV-2 (рисунок 2.20, таблица 2.12) по сечению сварного шва в зонах: основного металла, термического влияния, сварного соединения.

Общее количество вариантов для проведения испытаний механических свойств в данном комплексе исследований составило 17 шт.



Рисунок 2.20 – Внешний вид микротвердомера Shimadzu HMV-2

Таблица 2.12 – Технические характеристики микротвердомера Shimadzu HMV-2

Параметр	Значение
Диапазон нагрузок, Н	0,1 – 19,6
Разрешение, мкм	0,01

После статических и динамических испытаний произведены металлографические исследования изломов образцов на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N (рисунок 2.21, таблица 2.13) и металлографическом микроскопе Nikon MA-200 (рисунок 2.22, таблица 2.14).



Рисунок 2.21 – Внешний вид сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N

Таблица 2.13 – Технические характеристики Hitachi S-3400N

Параметр	Значение
Давление в камере, Па	До 270
Разрешение, нм	3 (глубокий вакуум) / 4 (при 270 Па)
Размер образца, мм	До 80
Наклон образца, °	От -20 до +89



Рисунок 2.22 – Внешний вид металлографического микроскопа Nikon MA200

Таблица 2.14 – Технические характеристики Nikon MA200

Параметр	Значение
Размеры предметного столика, мм	295×215
Диапазон перемещений предметного столика, мм	50×50
Электропитание, В	100 - 240
Максимальное потребление энергии, Вт	75

2.7 Методика исследований по установлению влияния режимов форсированной механической обработки на качество удаления капиллярно-конденсированных загрязнений

Ранее произведено исследование по влиянию величины числа оборотов шпинделя фрезерного станка на шероховатость поверхности плоского образца из сплава OT4-01, и содержание водорода в приповерхностном деградационном слое. Установлено, что минимальное содержание водорода в приповерхностных слоях имеет поверхность, обработанная с частотой вращения шпинделя 500 об/мин. Повышение оборотов до 1500 приводит к резкому возрастанию содержания водорода до 0,009, а дальнейшее

повышение оборотов до 3000, напротив к плавному снижению содержания H_2 в приповерхностном слое до 0,0071% (рисунок 2.23).

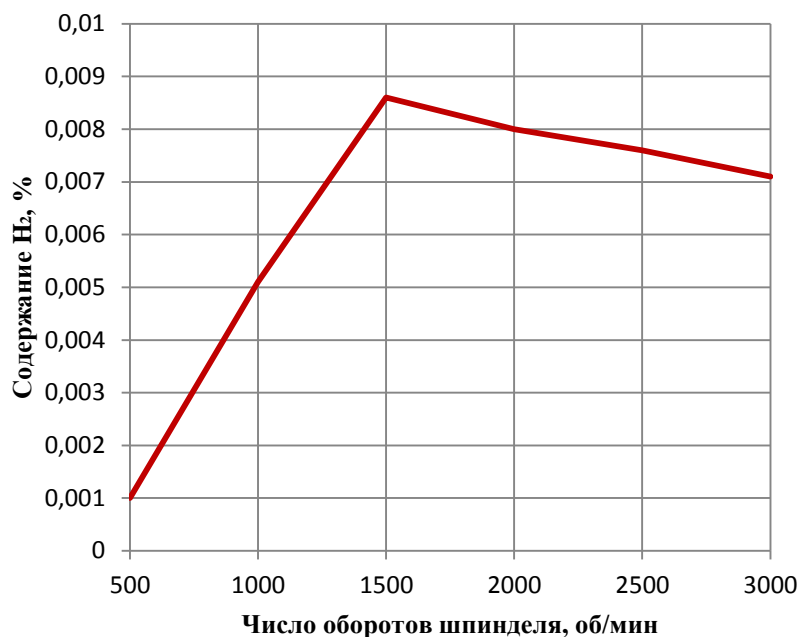


Рисунок 2.23 – Влияние числа оборотов шпинделя на содержание H_2

Таким образом сформулирована гипотеза о том, что повышенное число оборотов шпинделя позволяет минимизировать количество продуктов капиллярно-конденсированной влаги и соответственно уменьшить порообразование в сварных соединениях ЭЛС.

Для апробации данной гипотезы произведена форсированная механическая обработка 6 заготовок под сварку – 3 из сплава ВТ20, 3 из ВТ23 соответственно.

Механическая обработка кромок производилась на установках Стерлитамак S 500 (для ВТ23) и DMU 80P duoBLOCK (для ВТ20). Внешний вид установок представлен на рисунке 2.24. Фрезерование производилось при использовании фрезы диаметром 16 мм под шифром - МТ190-VBE-016Z16R0-38-H070-L150-R0-T.

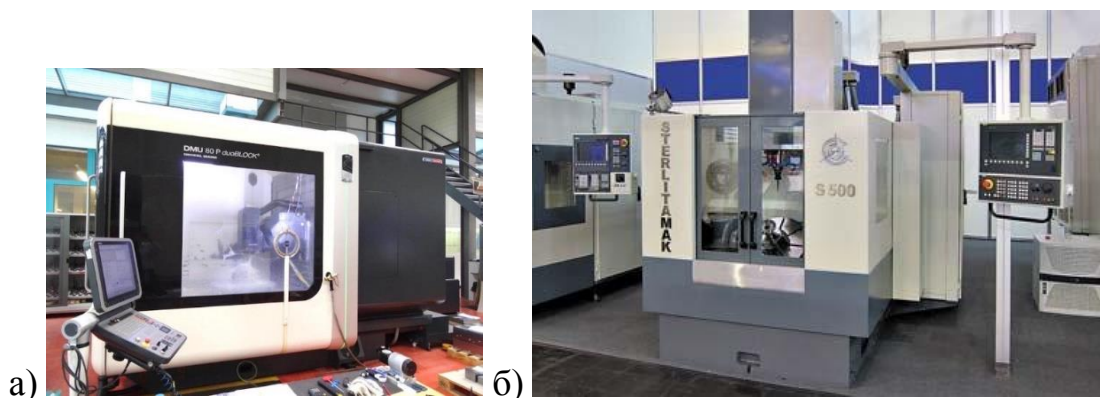


Рисунок 2.24 – Установки, используемые для фрезерования стыкуемых кромок под сварку:

а - DMU 80P duoBLOCK; б - Стерлитамак S 500

Таблица 2.15 – Режимы механической обработки стыкуемых кромок

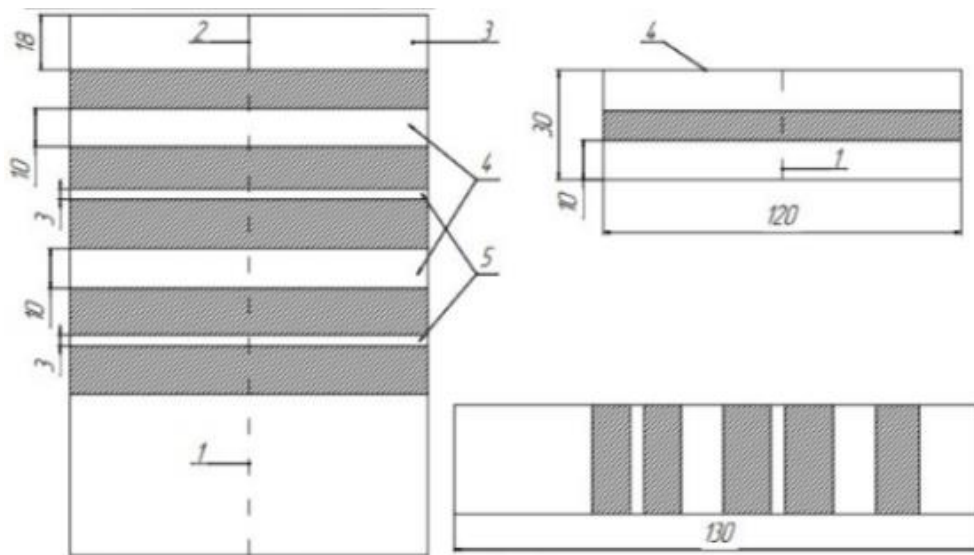
Марка материала	Толщина темплета, мм	Номер варианта	Подача; мм/мин	Обороты; об/мин
BT23	60	13	200	500
		14	400	1000
		15	1000	2500
BT20	30	3; 6	200	500
		4; 7	400	1000
		5; 8	1000	2500

После фрезерования произведено обезжиривание стыкуемых кромок ацетоном с последующим обезвоживанием спиртом. Электронно-лучевая сварка выполнялась на ЭЛУ КЛ-144, режимы сварки приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 - Режимы ЭЛС темплетов 30 и 60 мм

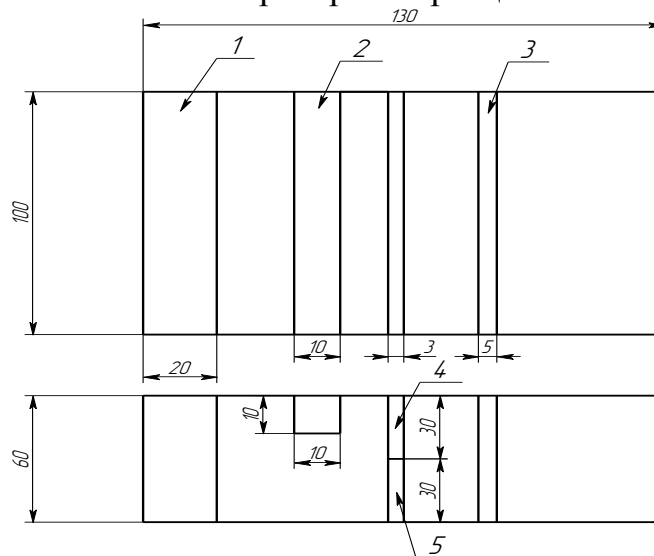
Марка материала	Толщина темплета, мм	Ток сварки, мА	Скорость сварки, мм/с
BT23	60	420	10
BT20	30	320	16

После сварки темплеты раскроены на образцы, согласно рисункам 2.25, 2.26.



1 – сварной шов; 2 – конец сварного шва; 3 – образец на излом; 4 – образцы на ударную вязкость; 5 – образцы для рентгеновского контроля

Рисунок 2.25 – Схема раскроя образца из сплава ВТ20



1 – образец для микроанализа; 2 – образец для испытаний на ударную вязкость; 3 – образец для рентгеновского контроля; 4 – образец для измерения твердости; 5 – образец для испытаний на статическое растяжение

Рисунок 2.26 – Схема раскроя образца из сплава ВТ23

Раскрой образцов производился при использовании дисковой пилы с применением охлаждающей жидкости.

Внешний вид сварных соединений после ЭЛС представлен на рисунке 2.27.

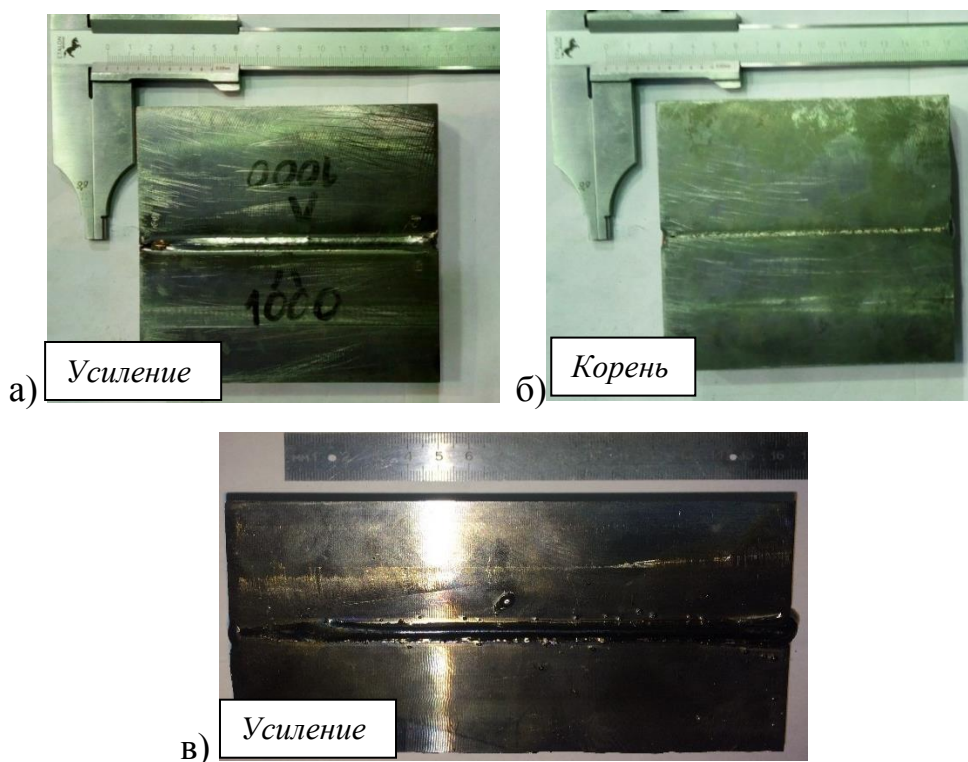


Рисунок 2.27 – Внешний вид темплетов после ЭЛС: а, б – сплав ВТ20; в – сплав ВТ23

Радиографический контроль производился согласно ПИ 1.4.1898-2003 рентгенограммы получены при помощи радиографического комплекса ЭКСТРАВОЛЬТ-225. Анализ полученных снимков производился при помощи негатоскопа НЭС 420х100-Л2. Образцы из сплава ВТ20, подверженные радиографическому контролю представлены на рисунке 2.29, для сплава ВТ23 на рисунке 2.30.

Испытания на статическое растяжение выполнялись на испытательной машине Instron 3382, на ударную вязкость на маятниковом копре JBW-300 (рисунок 2.28, таблица 2.17) согласно ГОСТ 6996-66.



Рисунок 2.28 – Внешний вид маятникового копра JBW-300

Таблица 2.17 – Технические характеристики JBW-300

Параметр	Значение
Диапазон измерения энергии, Дж	150 или 300
Момент маятника, Н*м	80,4 и 160,8
Скорость движения маятника в момент удара, м/с	5,2
Угол взвода маятника, °	150
Размер стандартного образца для испытаний на ударный изгиб, мм	10x10x55 (U-,V-образный надрез глубиной 2 мм)

Измерение твердости производилось для сплава ВТ23 по методу Роквелла в зонах: основного металла, термического влияния, сварного шва.



Рисунок 2.29 – Внешний вид образцов из сплава ВТ20 для проведения радиографического контроля ($\delta = 3$ мм)

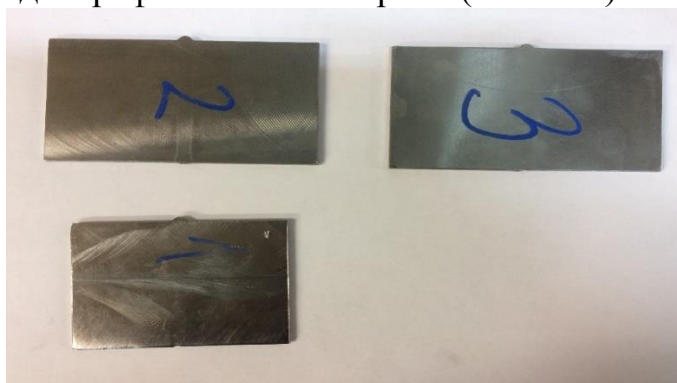


Рисунок 2.30 – Внешний вид образцов из сплава ВТ23 для проведения радиографического контроля

2.8 Выводы по главе 2

Преимущественное расположение дефектов их вид, место и количество свидетельствуют о влиянии технологических операций на их образование. Анализируя режимы ЭЛС в зависимости от толщины свариваемых заготовок и марки материала установлено:

- наиболее дефектными стыками, выполненные ЭЛС являются: 44 мм для сплава ВТ20, 75 мм для сплава ВТ23. Доминирующим дефектом для сплава ВТ20 являются темные полосы (88 %), для ВТ23 – цепочки пор (41 %);

- при скорости сварки от 16 до 6 мм/с наиболее выявляемым дефектом являются темные полосы общее количество которых составило 35 шт. (в интервале толщин от 24 до 64 мм), при скорости менее 6 мм/с и толщиной стыка более 75 мм преобладают цепочки пор, непровар и несплавление, темных полос в интервале стыка от 64 до 112 мм зафиксировано в общем количестве 7 шт.;

- темные полосы фиксируются на всех участках сварных соединений сплава ВТ20, больше всего их обнаружено в центре (14 шт.), менее в начале (12 шт.) и конце (9 шт.) сварного шва;

- в сварных соединениях сплава ВТ23 специфический дефект зафиксирован в единичных случаях на всех участках, цепочки пор располагаются на тех же участках, что и темные полосы;

- образование непроваров и несплавлений вызвано ошибкой в корректировке электронного луча и недостаточной мощностью ЭЛ.

3 Влияние режимов электронно-лучевой сварки на образование специфических дефектов и изменение механических свойств сварных соединений

3.1 Радиографический контроль качества сварных соединений из сплавов ВТ23 и ВТ20, выполненных электронно-лучевой сваркой

Анализ рентгенограмм, полученных с помощью радиографического контроля темплета $h = 50$ из сплава ВТ23, выполненного на установке 30Е3000 без подготовки стыкуемых кромок (рисунок 3.1), показал наличие специфического дефекта в виде темных полос по линиям сплавления в двух образцах № 7 и № 3 (рисунок 3.1 б, в), скопления пор в усилении СШ в образце № 2 и несплавления в образце № 4. Причем в образце № 2 присутствуют цепочки пор, переходящие в темные полосы по глубине СШ (рисунок 3.2).

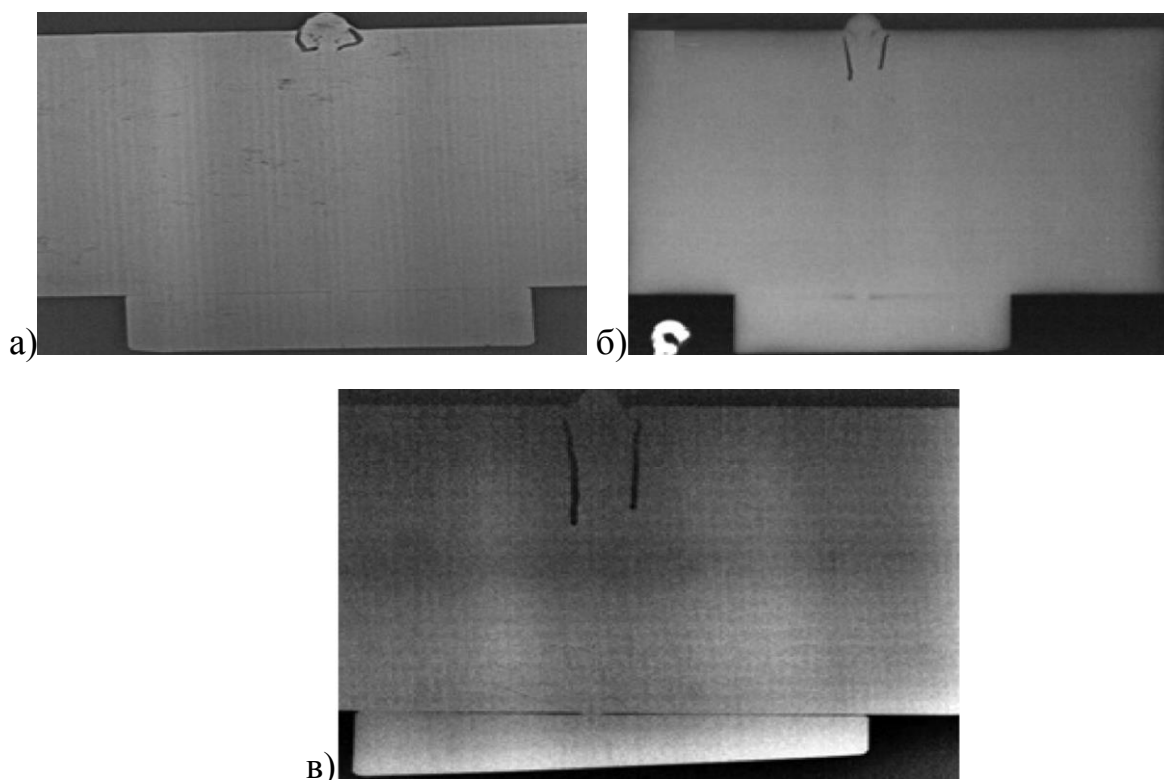


Рисунок 3.1 – Рентгенограммы выявленных дефектов на образцах толщиной 3 мм темплета из сплава ВТ23, $h = 50$ (ЭЛУ 30Е3000):
а – образец 2 – скопления пор; б – образец 3 – цепочки пор, переходящие в темные полосы; в – образец 7 – темные полосы, расположенные на линии сплавления

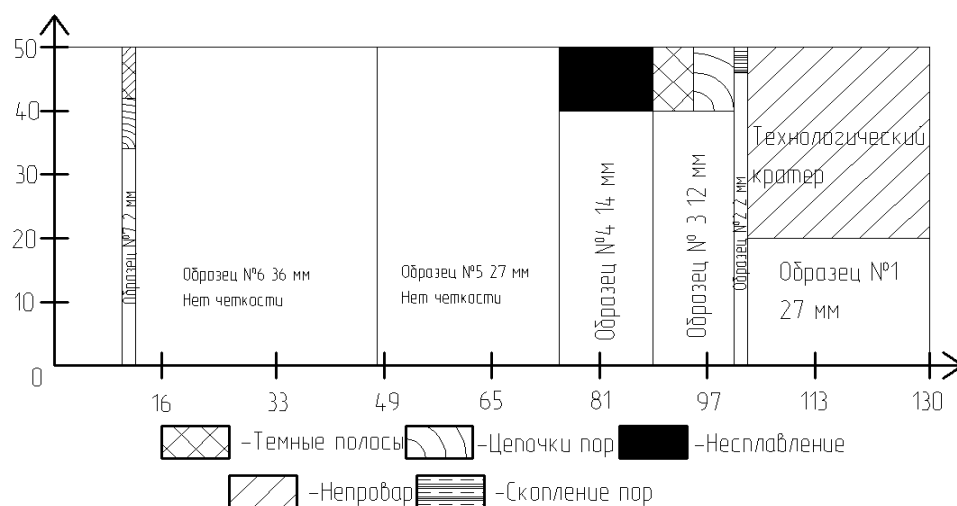


Рисунок 3.2 – Гистограмма распределения дефектов по толщине сварного шва, полученного с помощью радиографического контроля

При этом было обнаружено появление темных полос на рентгенограммах образцов с грубой механически обработанной поверхности, шероховатостью, которая составляла Ra более 12,5 мкм.

Исследование распределения дефектов по толщине СШ δ (см. рисунок 3.2) выявило наличие дефектов при $\delta = 2...14$ мм и их отсутствие при $\delta = 27$ и 36 мм из-за неэффективности выявления дефектов при рентгеноскопии больших толщин.

По результатам радиографического контроля сварных швов с форсированной механической обработкой стыкуемых кромок темплетов $h = 30$ мм и 60 мм из сплава ВТ20 и ВТ23 соответственно обнаружена пора размером 0,3 мм, расположенная у корня сварного шва (сплав ВТ20, темплет $h = 30$ мм). У рентгенограмм сварных швов, выполненных из сплава ВТ23 темных полос и иных дефектов обнаружено не было.

Рентгенограммы сварных швов, выполненных из сплавов ВТ20 и ВТ23 представлены на рисунках 3.3 и 3.4.

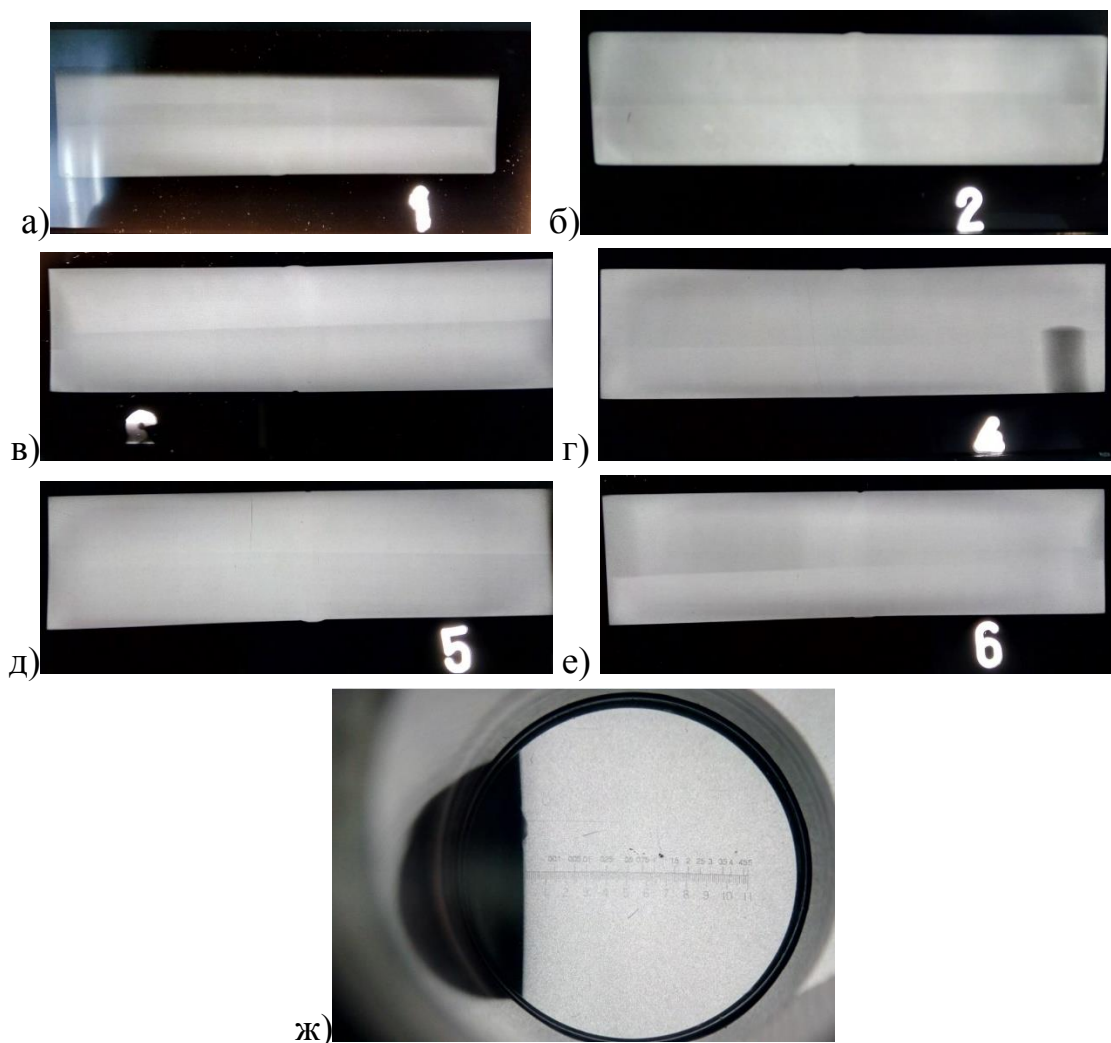


Рисунок 3.3 – Рентгенограммы темплета из сплава VT20, $h = 30$ мм (ЭЛУ КЛ-144):

а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4; д – образец 5; е – образец 6; ж – пора, обнаруженная на рентгенограмме образца 5

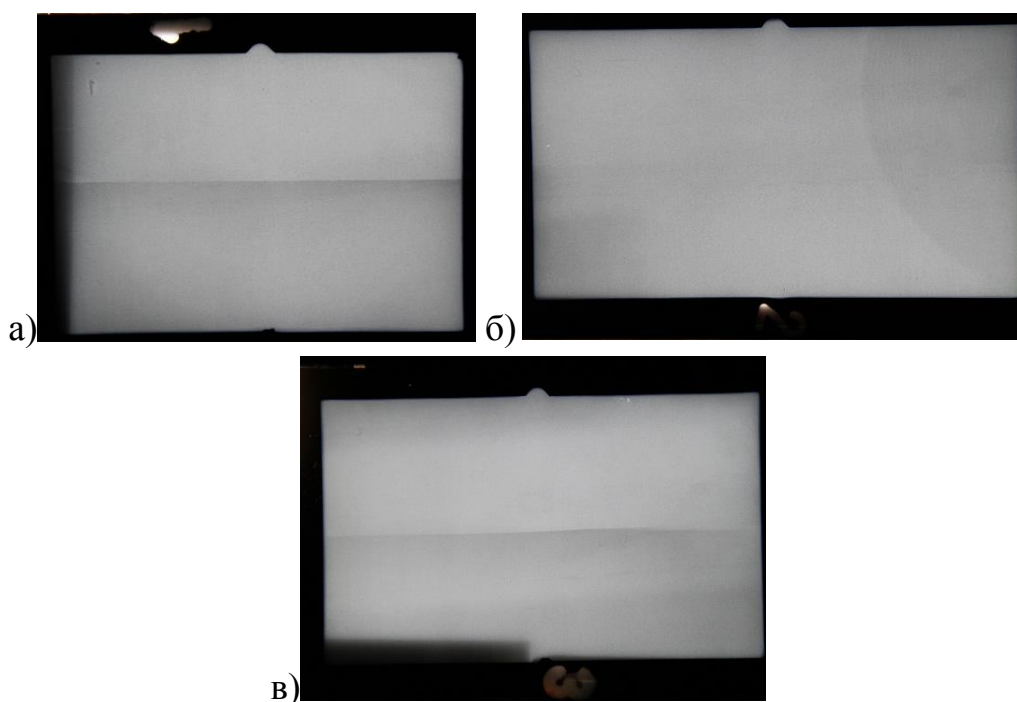


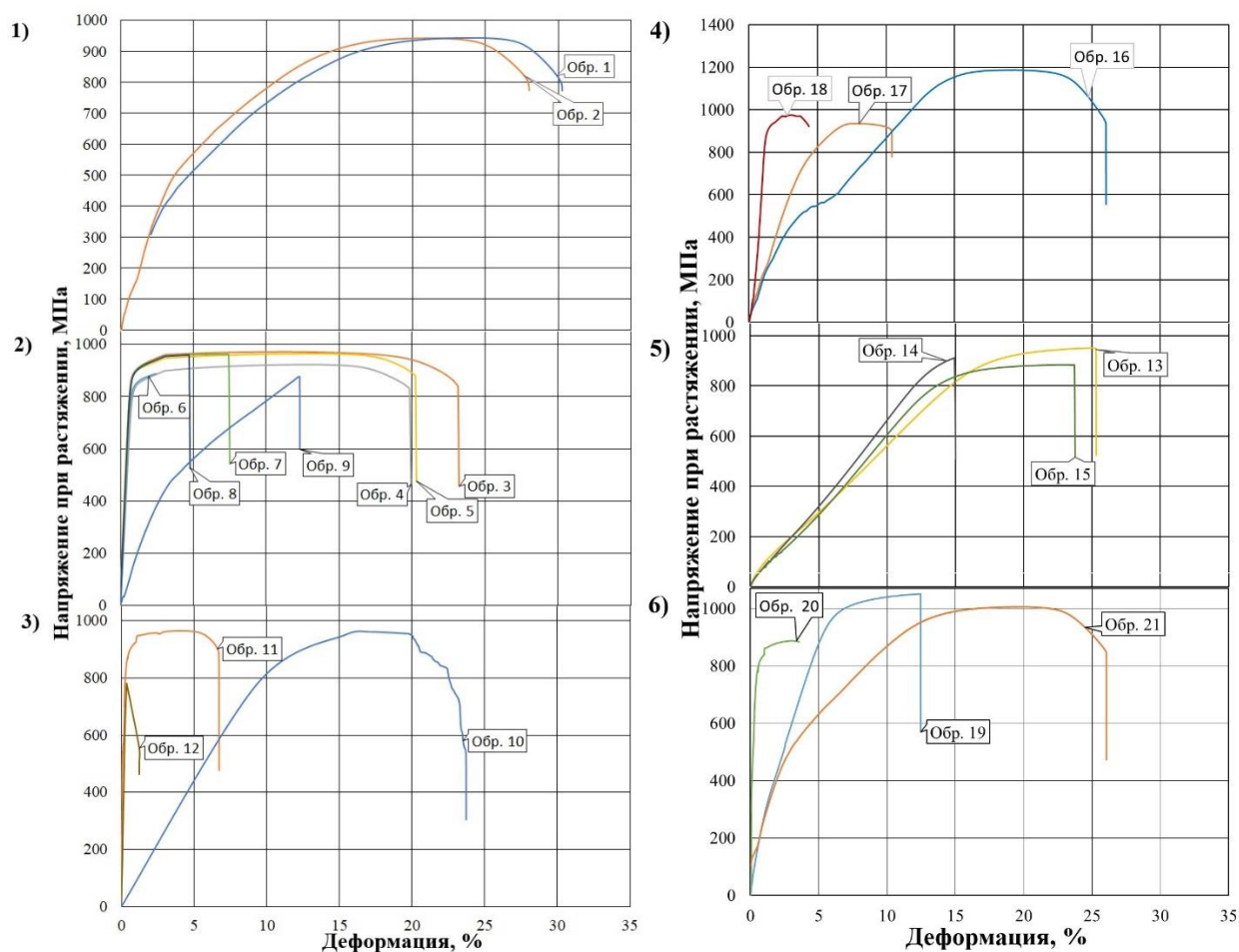
Рисунок 3.4 – Рентгенограммы темплета из сплава ВТ23, $h = 36$ мм (ЭЛУ КЛ-144):

а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

3.2 Свойства сварных образцов из сплавов ВТ20 и ВТ23, выполненных ЭЛС при статических и динамических испытаниях

Как известно [75] диаграммы деформации материалов характеризуются различными стадиями деформации, а именно упругой деформации от начала координат до предела текучести $\sigma_{0,2}$, равномерная деформация от предела текучести до предела прочности σ_B и сосредоточенная деформация от предела прочности σ_B до разрушения σ_p .

Из данных рисунка 3.5 видно, что диаграммы деформации сварных образцов из титановых сплавов зависят от размеров свариваемых темплетов, а именно от режимов сварки, и различаются не только по величине деформации (от 0,01 до 30%), а и по характеру изменения кривых величины напряжений (от 781 МПа до 972 МПа – для сплава ВТ20 и от 883 МПа до 1051 МПа для сплава ВТ23).



1 – 20 мм; 2 – 30 мм; 3 – 60 мм; 4 – 70 мм; 5 – 60 мм (VT23); 6 – 50 мм
 Рисунок 3.5 – Диаграммы деформации сварных образцов из титановых сплавов VT20 (№ 1, 2, 3) и VT23 (4, 5, 6). ЭЛС на ЭЛУ КЛ-144 – 1-5; На ЭЛУ 30Е3000 – 6

Характер деформации и разрушения сварных образцов выражается видом стадийности процесса деформации и разрушения. На стадии упругой деформации разрушился образец №12, на стадии равномерной деформации, близкой к упругой разрушились образцы № 6, 7, 8, 9, 17, 20 на стадии равномерной деформации близкой к сосредоточенной, образцы № 13, 14, 15, 19. Все стадии при разрушении выдержали образцы: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 16, 18, 21 (номера образцов приведены в таблице 3.1).

Таблица 3.1 – Изменение механических свойств сварных образцов из титановых сплавов в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и термической обработки

Тип установки ЭЛС	№ варта	Статическое растяжение				Ударная вязкость			Марка сплава, информация о темплете
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КС, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²	Угол загиба, ρ	
ЭЛС на установке КЛ-144	1	944	405	41	22	-	36	15	BT20 темплет $h = 20$ мм
	2	943	472	46	18	-	40	4	
	3 ^x	972	885	3,8	16,8	-	262	38	BT20 темплет $h = 30$ мм
	4	923	830	2,8	21,1	-	259	36	
	5	965	863	2,7	15,3	-	242	32	
	6	888	827	1,9	7,4	-	91	11	
	7	963	856	0,6	2,1	-	66	8	
	8	959	876	1,6	6	-	53	8	
	9	875	440	-	-	-	26	-	BT20 темплет $h = 60$ мм
	10	972	740	28,4	28,5	-	-	5	
	11	965	823	26,2	26,5	-	24	3	
	12	781	-	0,6	0,39	-	-	4	BT23 темплет $h = 60$ мм
	13 ^x	951	779	0,31	2,7	-	132	20	
	14	912	887	0,1	2,6	-	68	9	
	15	883	743	0,6	4,8	-	140	25	
	16 [⊗]	1186	466	22,9	20,4	-	40	3	BT23 темплет $h = 70$ мм
	17 ^{xx}	935	651	16,3	6,6	-	32	4	
	18	989	919	31	19,4	-	17	3	
ЭЛС на установке 30E3000	19	1051	852	2	4,1	30	-	7	BT23 темплет $h = 50$ мм
	20	888	754	0,3	2,8	37	-	6	
	21 ^{xx}	1071	300	29,2	8,5	-	39	5	
	22 ^{xx}	В зоне окончания сварки			Усил-е	27	-	-	
	23 ^{xx}				Корень	58	-	-	
	24	-	-	-	-	-	-	4	BT23 подкладная пластина в корне шва $h = 10$
	25	-	-	-	-	-	-	3	
26	-	-	-	-	-	-	8		

Примечание: x – основной металл; ⊗ – термически обработанный основной металл; xx – термически обработанные сварные образцы.

Как было установлено в работе [76] наряду с дислокационной теорией пластической деформации скольжением и двойникованием обоснован еще и релаксационный характер пластической деформации с перераспределением напряжений и снижение их общего уровня за счет сдвиговых процессов, которые активируют смежные объемы с зарождением новых очагов, определяя в общем автокаталитической характер, когда конечный результат

возвращает систему в исходное состояние с последующим повторением аналогичных циклов.

Исходя из этого можно предположить, что для образцов разрушившихся на стадии упругой деформации и близкой к ней (образцы первых трёх групп) не произошло в достаточной степени релаксации напряжений и возврата объема накопленной энергии в исходное состояние.

Наличие дефектов сварки непроваров, остаточных напряжений и пор в зоне сплавления, выплесков без образования соединения и др. способствуют образованию субмикротрещин, создало условия для разрушения под действием сил Пайелрса-Набарро $K = 2\sqrt{\frac{l}{r}}$, превысивших силы межатомных связей. Сдвиговые процессы привели к катастрофическому хрупкому разрушению, о чем свидетельствует отсутствие дополнительной деформации образцов с изменением размеров.

Дислокация энергии при образовании поверхности разрушения при испытании образцов на растяжение приводит к существенному различию строения излома в зависимости от режимов технологических процессов сварки.

Для образцов на стадии упругой деформации и близкой к ней, разрушение начиналось от концентратора напряжений несплавления – микротрещины (образцы 12, 6, 7, 8, 9, 17, 20) цепочек пор и сжатия в зоне плавления (образцы 13, 14, 15, 19), см. таблицу 3.1 и рисунок 3.5. По внешнему виду у этих образцов не наблюдалось деформации в зоне начала разрушения и плоскость разрушения перпендикулярна прилагаемой нагрузке (рисунок 3.6). В изломе образцов наблюдались зоны непровара переходящие в непрерывную цепочку пор (образец 12) и цепочку микропор (образец 9), слипание выплесков (образец 20) и участки расплавленной исходной поверхности (образец 7), внутренних полостей (образец 17). Наряду с указанными дефектами в изломах наблюдались ямки, напоминающие пчелиные соты, что характерно для вязкого разрушения.

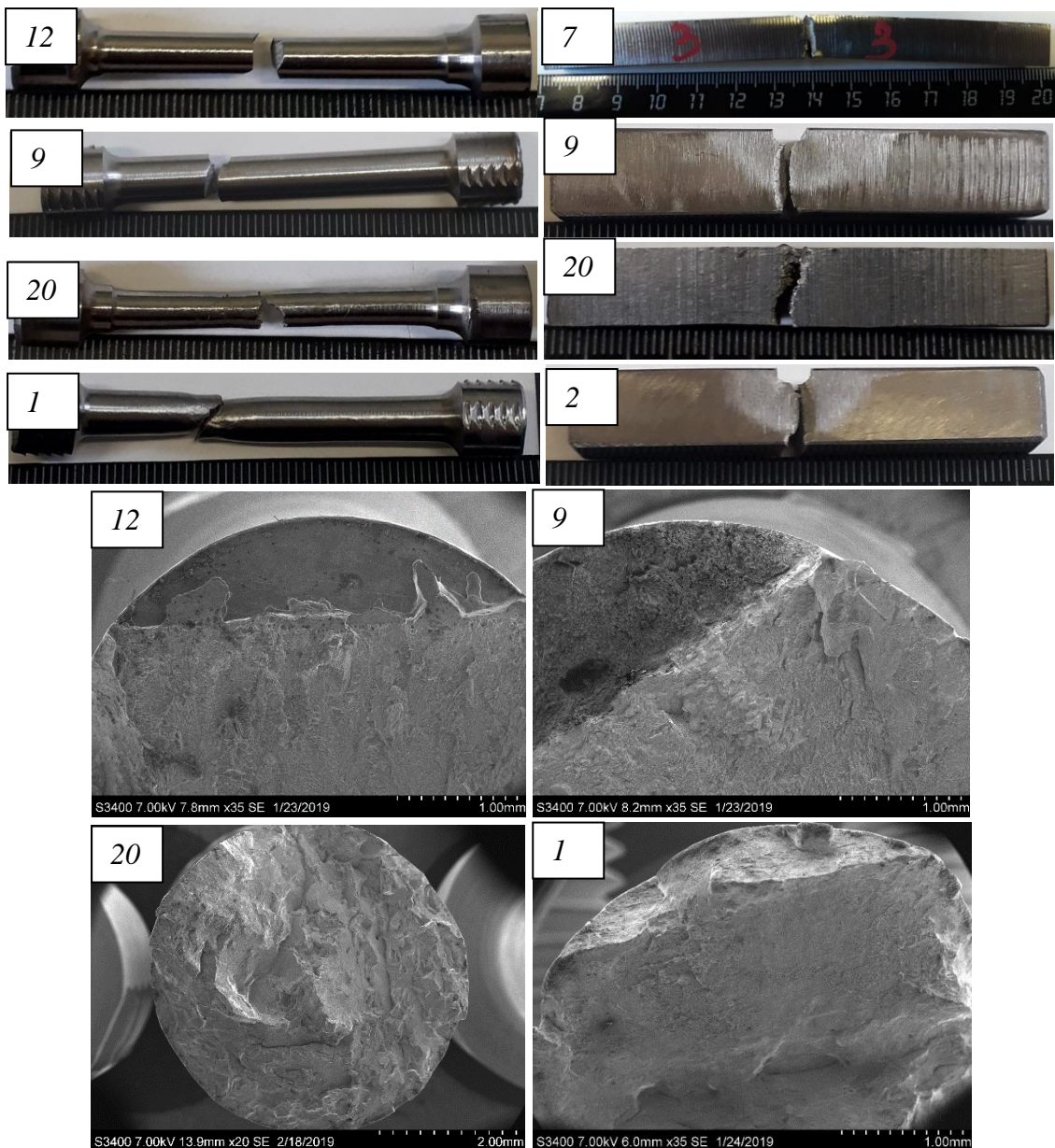


Рисунок 3.6 – Вид характерных разрушений образцов из сплава ВТ20 (12,7, 9, 1, 2) и ВТ23 (20, 16)

Особенностью разрушения образцов на стадии равномерной и сосредоточенной деформации является то, что в начале оно происходило под углом 45° и 25° (образцы 3 и 4 группы (приложения Б, В)) к прилегающей нагрузке и окончательная плоскость разрушения перпендикулярна к прилегающей нагрузке. При этом величины пластической деформации образцов третьей и четвертой групп значительно превышают таковые для образцов первой и второй групп (таблица 3.1, рисунок 3.5, приложения Б-Г).

Элементы макрорельефа изломов практически для всех образцов наряду с дефектами (плоскости непроваров, пор, выплесков без образования соединения, слипания, нерасплавленная исходной поверхности и др.). Характеризуют смешанное строение, плоскости скольжения – сколы характерные для хрупкого разрушения и ямочное – характерные для вязкого разрушения (см. приложения Б-Г).

3.3 Выводы по главе 3

Радиографическим контролем сварных соединений, выполненных ЭЛС без подготовки стыкуемых кромок под сварку установлено:

1. Наличие специфического дефекта в виде темных полос, цепочек пор, переходящих в темные полосы по глубине сварного шва, наличие скоплений пор в усилении сварного шва;
2. Чувствительности рентгеновских аппаратов недостаточно для контроля сварных соединений с толщиной более 14 мм;
3. Шероховатость поверхности более Ra 12,5 мкм приводит к неточности оценки качества сварных соединений.

Радиографическим контролем сварных соединений, выполненных ЭЛС с форсированной механической стыкуемых кромок под сварку установлено:

1. Отсутствие дефекта в виде темных полос;
2. Наличие единичной поры размерностью 0,3 мм.

По результатам статических и динамических испытаний, анализу изломов посредством растровой электронной микроскопии установлено:

1. В первой группе (образец 12) наблюдалось наличие цепочек микропористости переходящей у зоны непровара и выплеск металла;
2. Во второй и третьей группе преимущественно фиксировались несплавления, цепочки пор и микротрещины, а также плавление по границам зерен с образованием субмикропор (особенно на образце 9);
3. В четвертой группе замечены нанопоры диаметром 50 нм и менее;

4. Таким образом наличие дефектов в образцах выполненных ЭЛС приводит для первой группы (образец 12, таблица 3.1) к снижению прочности, практически к полному отсутствию таких характеристик как удлинение и сужение. Для образцов второй группы в некоторых образцах (6, 9, 20) наблюдается снижение прочности и для всех образцов значительное снижение удлинения и сужения. Для третьей и четвертой групп образцов наблюдаются удовлетворительные механические свойства. Из этой группы необходимо отметить особо образцы 16, 19, 21 прошедшие термическую обработку, результаты испытаний механических свойств показывают удовлетворительную сходимость механических свойств сварных образцов (19, 21) с образцами основного металла (16) см. таблицу 3.1.

4 Особенности образования специфических дефектов при ЭЛС титановых сплавов

Как известно [77] электронно-лучевая сварка титановых сплавов применяется в авиастроении при изготовлении сложных и ответственных конструкций толщиной до 200 мм. В последнее время все более широко ЭЛС применяют при производстве конструкций из высоколегированных сплавов титана, в том числе из термически упрочняемых двухфазных сплавов, таких как высокопрочный сплав ВТ23.

Плотность энергии электронного луча при ЭЛС достигает $5 \cdot 10^3$ кВт/мм², что в несколько тысяч раз превышает плотность энергии при дуговой сварке. В связи с этим в процессе ЭЛС происходит очень интенсивный локальный разогрев сварочной ванны с последующим образованием узкого и глубокого шва в виде клина (так называемый «кинжальный проплав»). Площадь зоны проплавления при ЭЛС в ~25 раз меньше, чем при АрДЭС, что в совокупности с высокой концентрацией энергии в луче приводит к образованию относительно узкой зоны термического влияния при высокой скорости охлаждения, что способствует формированию значительных по величине внутренних напряжений.

Поэтому неизбежно в процессе ЭЛС перед фронтом расплавленной ванны соединяемых кромок появится зона твердофазного соединения с замкнутыми полостями, заполненными капиллярно-конденсированной влагой (ККВ), т.е. готовыми зародышами пор, которые непосредственно попадут в расплав на кромках образующейся сварочной ванны.

При этом возможно в первоначальный момент из-за малых сжимающих напряжений возможно попадание ККВ непосредственно с поверхности соединяемых кромок в расплав. Предварительный прогрев расфокусированным электронным лучом (ЭЛ) соединяемых кромок особенно больших толщин не обеспечивает удаление ККВ. Этим объясняется преимущественное образование пор в начальной зоне шва, как это было отмечено в работе [78].

В работе [79] не совсем корректно названа основная причина образования пор – гидродинамические возмущения в канале проплавления, ссылаясь на то, что в объеме пор, полученных при лазерной сварке обнаружены защитные газы.

Скорее всего указанный факт более подтверждает образование пор по механизму попадания готовых зародышей в расплав ванны. Об этом свидетельствует химический анализ поверхности поры (образец 20, таблица 3.1; таблица 4.1, рисунок 4.1) и неравномерное распределение водорода по сечению сварного шва, повышенное его содержание в зоне сплавления (рисунок 4.2, 4.3). Появление пор по такому механизму выявлено в образцах после ЭЛС без подготовки поверхности под сварку на установке 30E3000 (образцы 19-26, приложение Г).

Таблица 4.1 – Изменение химического состава на поверхности сварных соединений сплава из ВТ23 без подготовки стыкуемых кромок под сварку

Легирующий элемент	Содержание, в процентах					
	№ 19		№ 20		№ 21	
	Пора	Линия сплавления	Пора	Линия сплавления	Пора	Линия сплавления
Al	7,53	5,29	4,23	4,81	6,15	5,93
				4,84	6,89	
				4,03		
N	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	
				0,00		
O	0,00	9,25	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,00	0,00	
				0,00		
Ti	76,97	75,09	82,40	85,74	82,03	84,83
				86,88	84,63	
				88,98		
Si	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				0,01	0,23	
				0,00		
V	5,24	3,33	7,43	5,21	7,57	1,62
				3,43	4,89	
				4,72		
Cr	1,59	0,00	0,54	0,98	0,00	2,98
				0,77	1,27	
				0,69		

Продолжение таблицы 4.1

Fe	0,59	2,25	1,08	1,07	0,69	0,90
				1,21	0,16	
				0,28		
Zr	3,01	1,25	0,12	0,16	0,18	1,60
				0,63	0,00	
				0,00		
Mo	4,62	3,54	1,72	2,03	3,39	2,14
				2,24	1,93	
				1,29		

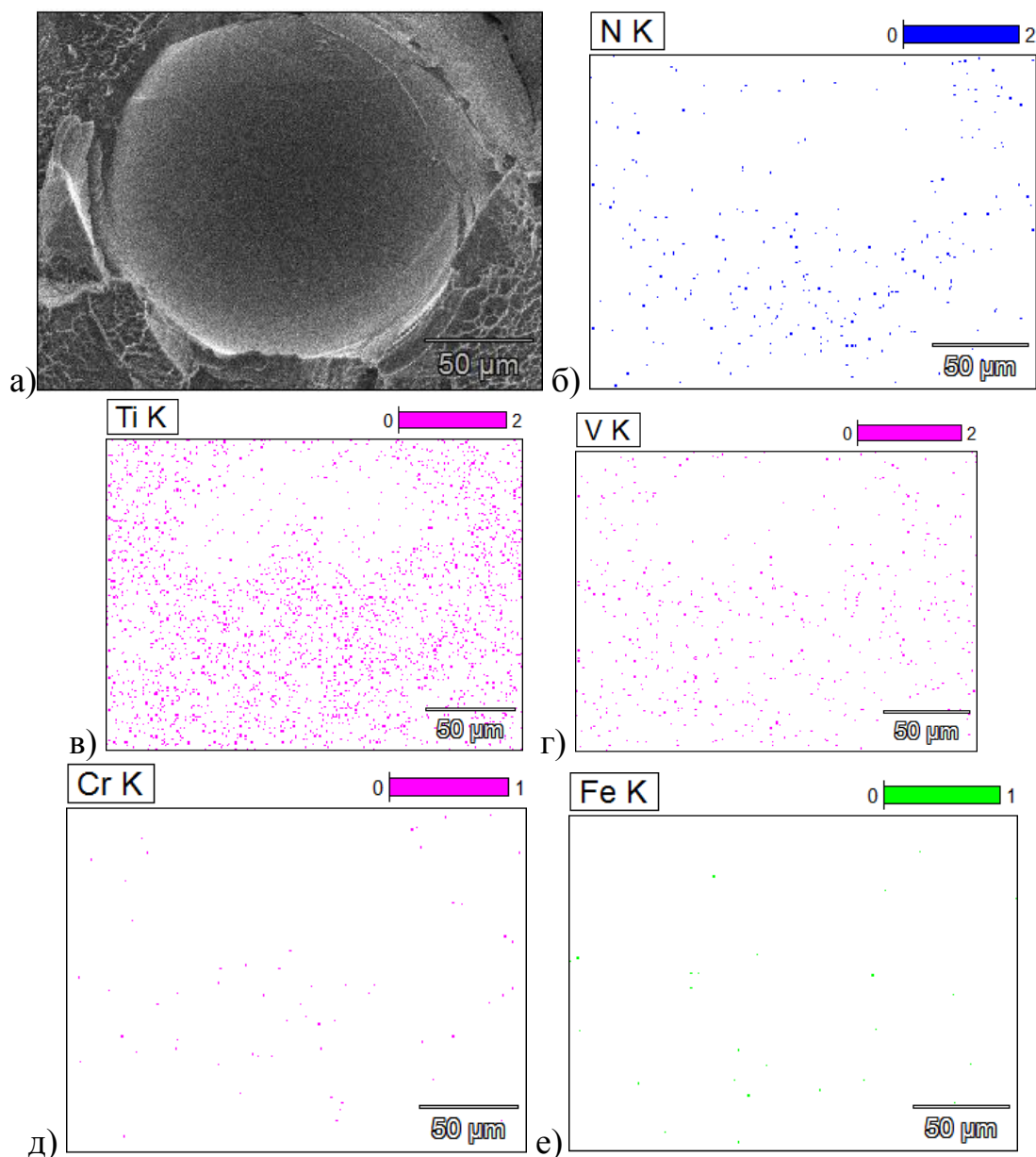


Рисунок 4.1 – Содержание некоторых легирующих элементов на поверхности поры образца 20:

а – общий вид сканируемой области; б – содержание азота; в – содержание титана; г – содержание ванадия; д – содержание хрома; е – содержание железа

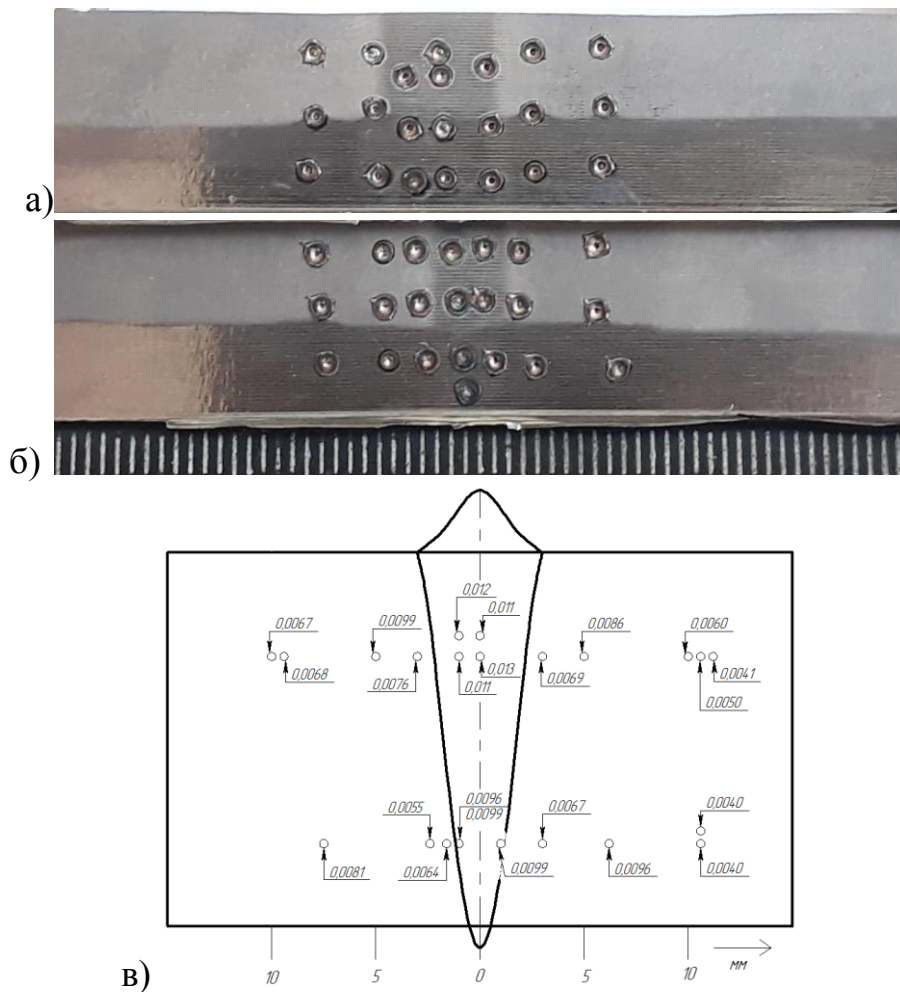


Рисунок 4.2 – Места точечного замера содержания водорода по сварному шву, зоне термического влияния и основном металле:
 а – усиление; б – корень; в – замеры содержания водорода по сечению сварного шва

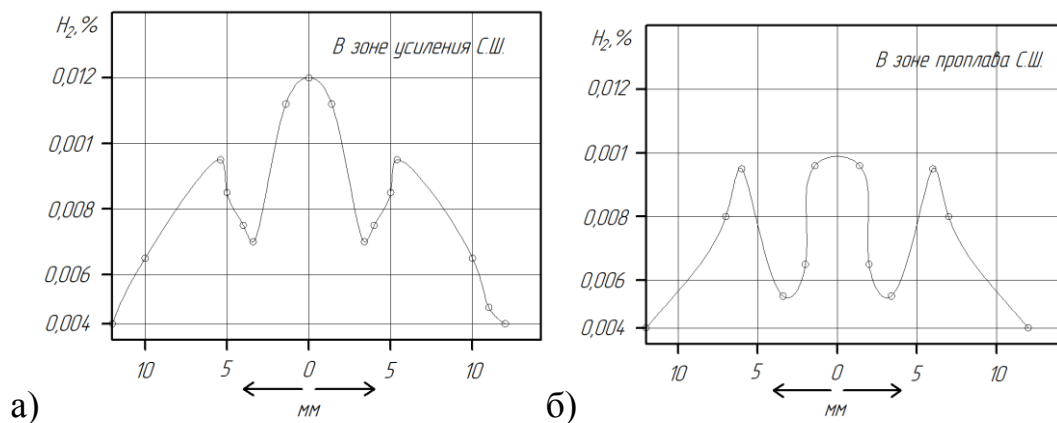


Рисунок 4.3 – Графики распределения содержания водорода по сварному шву, зоне термического влияния и в основном металле:
 а – зона усиления; б – корневая зона

При ЭЛС возможны условия, при которых не происходит образования твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны, что может

привести во первых к попаданию ККВ в дефектах поверхности заготовок непосредственно в расплав и образованию мелких пор (образец 20, приложение Г), а во-вторых к созданию температурных условий не обеспечивающих возможность равномерного плавления кромок.

Таковыми условиями являются:

- первоначальный момент ЭЛС из-за высокой концентрации энергии в луче образуется относительно узкая зона термического влияния;

- возможности фокусировки луча, поскольку зазор между свариваемыми заготовками имеет пределы $h = 0^{+0,2}$ мм, шероховатость поверхности заготовок Ra более 3,2 мкм и корректировка электронного луча должна производиться по центру между рисками, наносимыми на заготовках;

- изменение геометрии глубины и ширины проплавления из-за колебательных процессов в канале проплавления под действием мощного концентрированного пучка электронов [80].

Вышеуказанные условия приводят к неравномерному плавлению кромок из-за их пониженной температуры. Процесс плавления начинается по границам зерен, особенно в зонах схождения трёх-четырёх зёрен из-за повышенной скорости диффузионных процессов и жидкая фаза переходит в расплав, образуя субмикropоры. Подтверждением вышеуказанного служит химический состав линий сплавления на поверхности изломов образцов после динамических и статических испытаний (рисунок 4.4, 4.5).

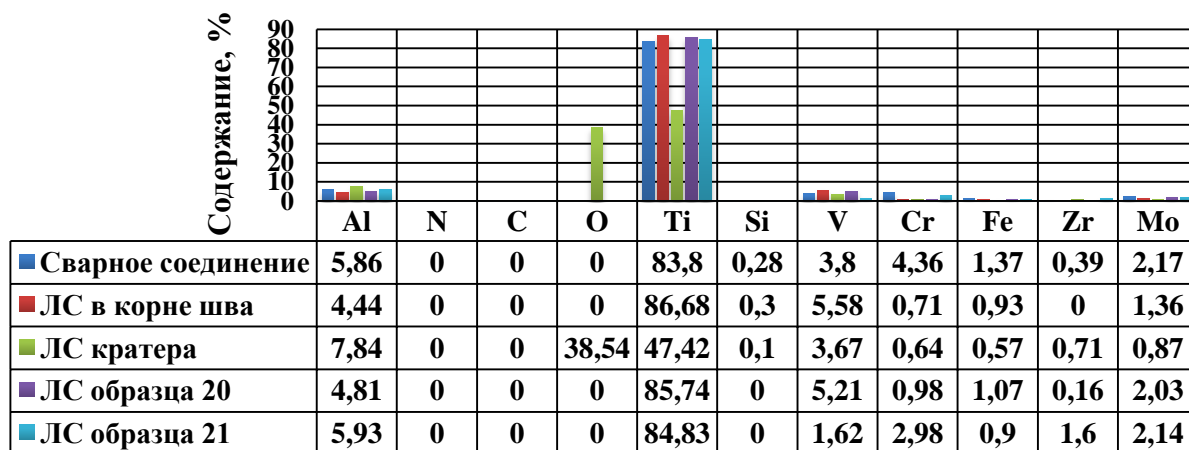


Рисунок 4.4 – Содержание легирующих элементов на линиях сплавления (ЛС)

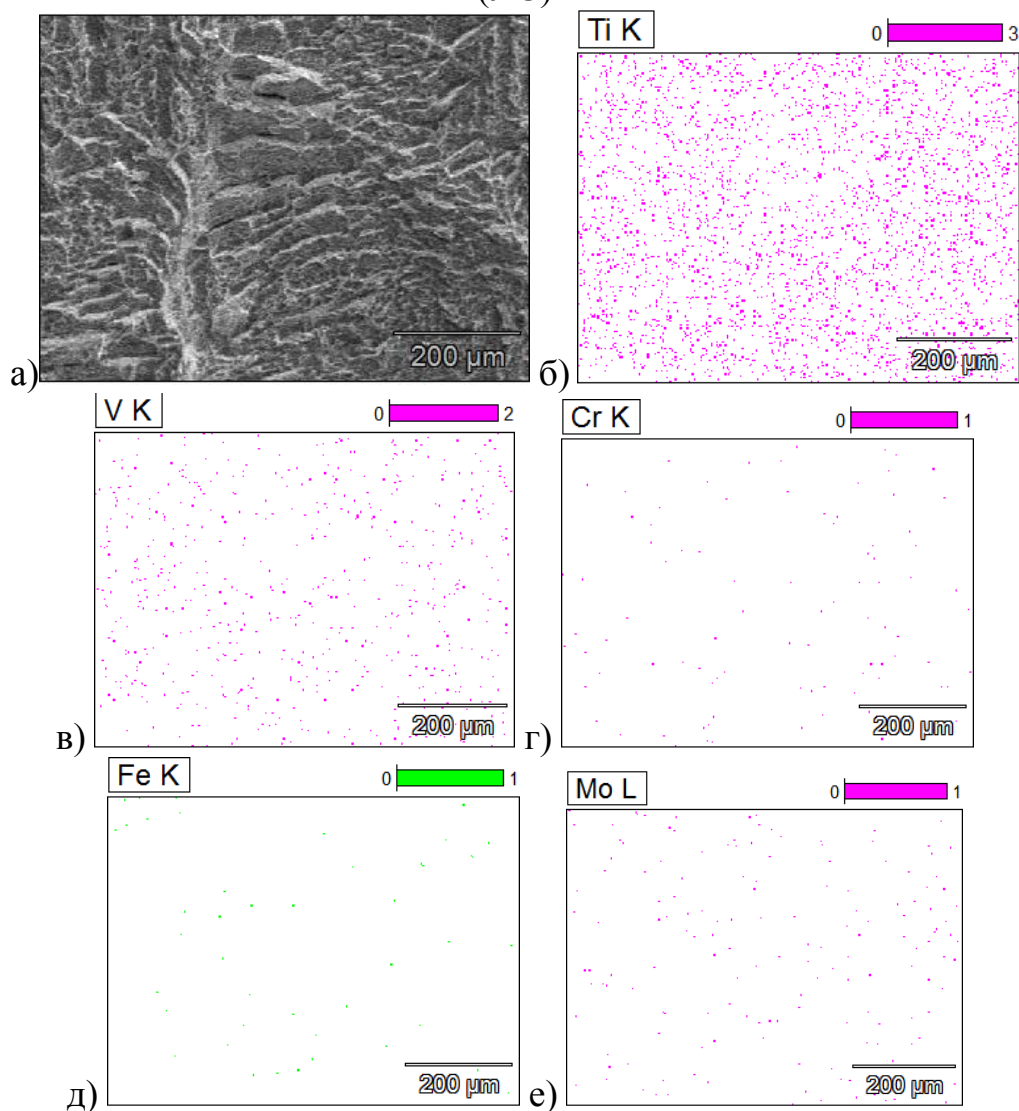


Рисунок 4.5 – Содержание некоторых легирующих элементов на поверхности линии сплавления образца 20:

а – вид линии сплавления образца 20; б – содержание титана; в – содержание ванадия; г – содержание хрома; д – содержание железа; е – содержание молибдена

Известно [80], что при ЭЛС металлов наблюдаются колебательные процессы под действием мощного концентрированного пучка электронов в канале проплавления, приводящие к изменению как геометрии глубины проплавления (пилообразное проплавление в корне шва), так и колебания геометрии по ширине.

Вскрытие излома срезом технологической пластины в корне шва из сплава ВТ23 после ЭЛС на установке 30Е3000 позволило выявить характер

изменения ширины проплавления вдоль сварного шва (рисунок 4.6), что подтверждает колебательные процессы в канале проплавления.

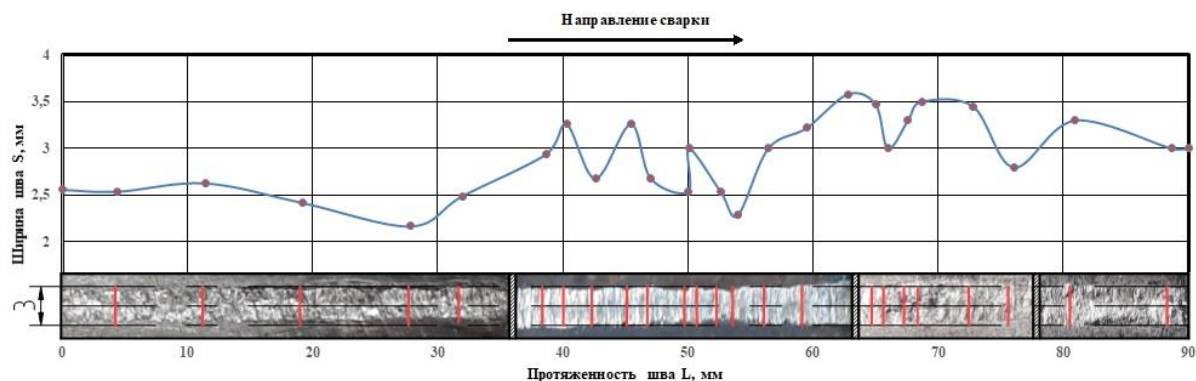


Рисунок 4.6 – Результат измерения ширины проплавления технологической пластины, зафиксированной в корневой части шва

Наряду с этим при испытании образцов технологической пластины на ударный изгиб в изломе выявились специфические корневые дефекты в виде пикообразования (рисунок 4.7, образцы 24-25 приложение Г). Электронная фрактография образцов пикообразований позволила установить характер их образования, а именно первоначально возникает полость, которая в последующем заполняется расплавом и подтверждается химическим составом пикообразования (таблица 4.2, вытек; рисунок 4.8).

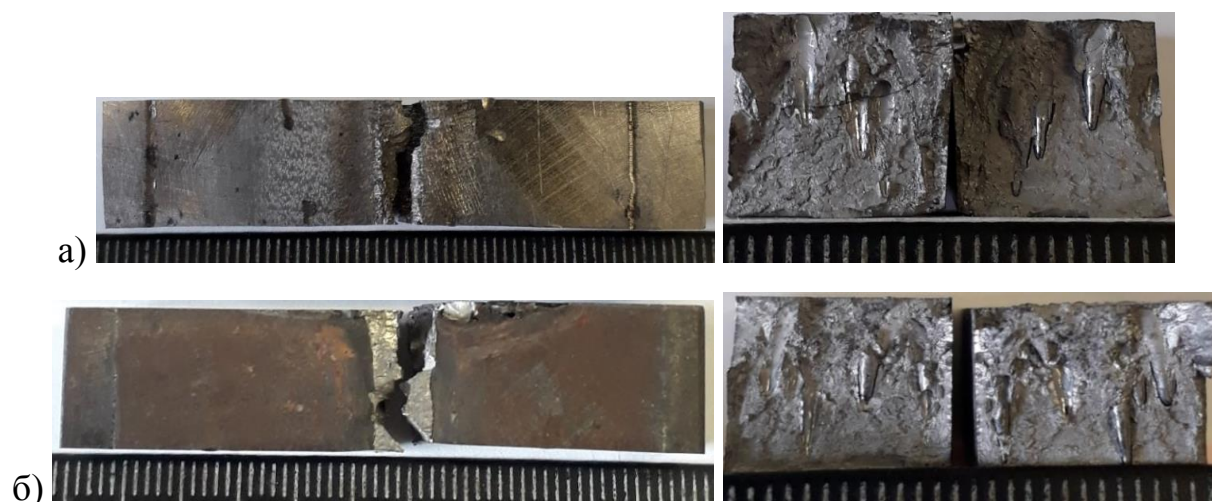


Рисунок 4.7 - Внешний вид образцов технологической подложки вариантов 24 – 25, толщиной 10 мм из сплава ВТ23 после испытаний на ударную вязкость:
а – вариант 24; б – вариант 25

Таблица 4.2 – Изменение химического состава на поверхности излома технологической подложки в корне шва

Легирующий элемент	Содержание, в процентах			
	Выплеск		Линия сплавления	Сварное соединение
	На кромке	В центре		
Al	6,40	6,21	4,44	5,86
Ti	84,84	82,50	86,68	83,80
Si	0,39	0,00	0,30	0,28
V	5,54	5,84	5,58	3,80
Cr	1,51	1,33	0,71	4,36
Fe	0,00	1,37	0,93	1,37
Zr	0,00	0,00	0,00	0,39
Mo	1,32	2,76	1,36	2,17
N	0,00	0,00	0,00	0,00
C	0,00	0,00	0,00	0,00
O	0,00	0,00	0,00	0,00

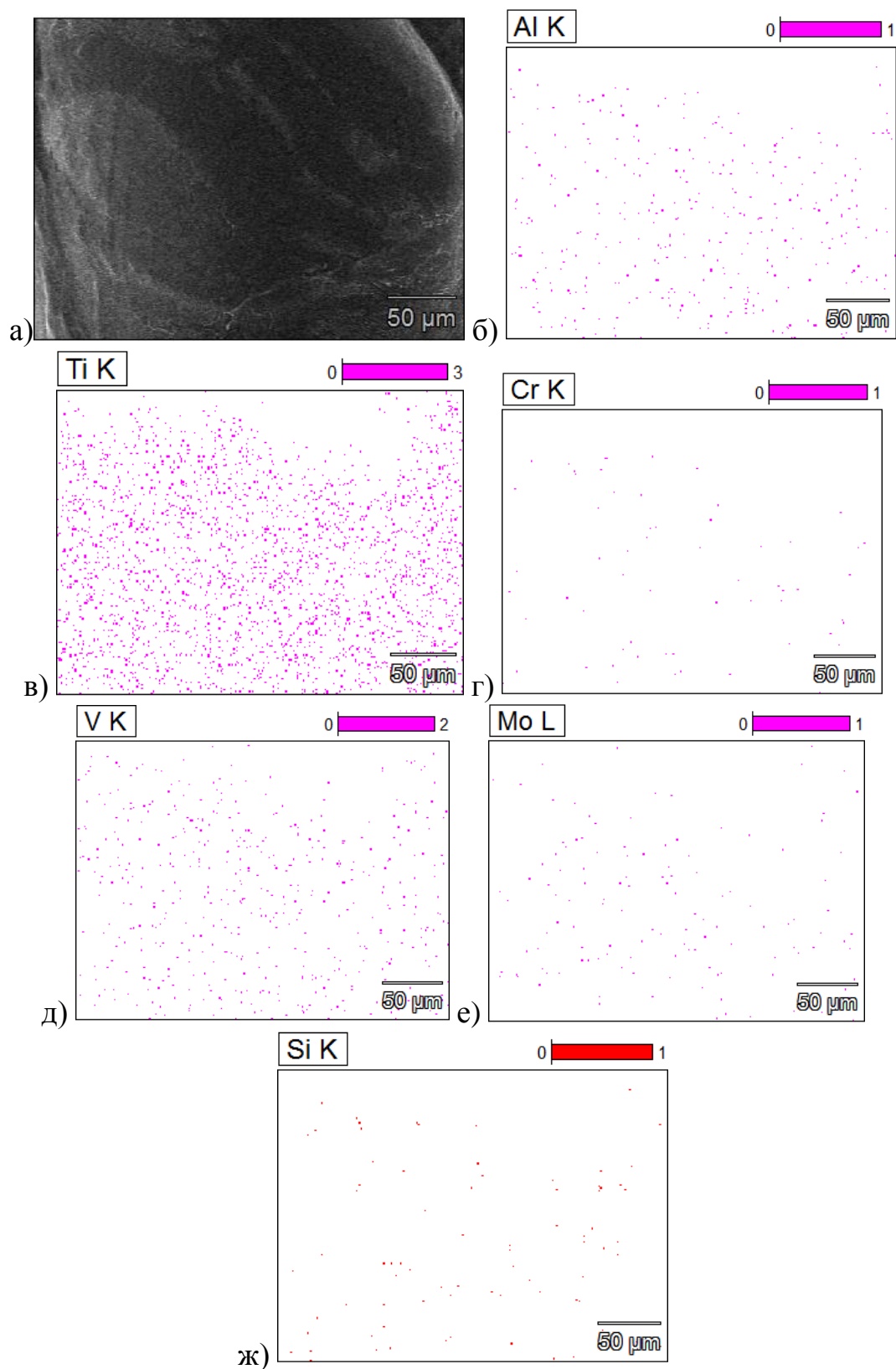


Рисунок 4.8 – Распределение легирующих элементов в технологической подложке на выплеске расплавленной ванны:
 а – внешний вид сканируемой области; б – распределение алюминия; в – распределение титана; г – распределение хрома; д – распределение ванадия; е – распределение молибдена; ж – распределение кремния

4.1 Выводы по главе 4

1. Закономерности образования дефектов в сварных соединениях, выполненных ЭЛС титановых сплавов заключаются в попадании в расплав областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой (готовых зародышей пор) из твердофазного соединения, данный факт подтверждает химический состав пор и распределение водорода в поперечном сечении сварного соединения.

2. Неточное позиционирование электронного луча приводит к колебаниям в канале проплавления (колебания электронного луча составляют ~ 0,5 мм) и могут привести к выплавлению по границам зерен из-за повышенной подвижности легкоплавкой составляющей, а также привести к образованию дефектов в виде пикообразования из-за гидродинамической неустойчивости в канале проплавления с чередующимися коллапсами кратера.

3. Колебания электронного-луча также способствуют появлению дефектов при недостаточной температуре, необходимой для общего плавления стыкуемых кромок.

5 Исследование макро-, микроструктуры сварных соединений

5.1 Макро-, микроструктура сварных соединений

Исследованиями макроструктуры поперечного сечения шва образца 5 из темплета толщиной 50 мм, выполненного на установке 30E3000 обнаружены поры, расположенные по линии сплавления по всей глубине сварного шва (рисунок 5.1). Стоит отметить расположение пор в усилении сварного шва при исправлении дефекта вогнутости усиления электронным лучом.

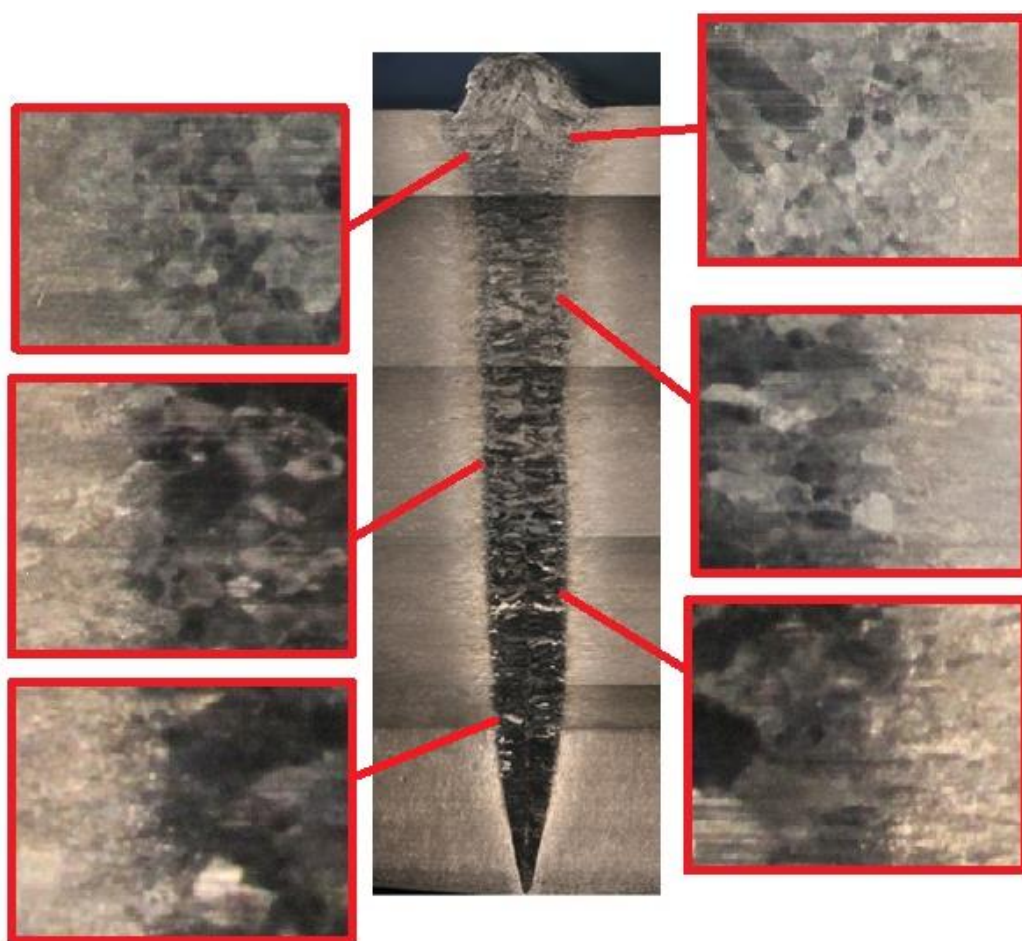


Рисунок 5.1 – Макроструктура образца 5 с распределением пор по зонам сплавления

Исследованиями оптической микроскопии установлено, что поры в основном образуются по границам зерен в зоне сплавления сварного шва (рисунок 5.2). Причем размерность некоторых пор достигает менее 0.1 мм, что практически невозможно выявить на рентгеновских снимках,

полученных на традиционно использованных рентгеновских аппаратах. Обнаружена также незаконченная коагуляция (рисунок 5.2, д), свидетельствующая о том, что высокая скорость сварки и особенности формирования парогазового канала не обеспечили выход зародышей пор из расплава сварочной ванны

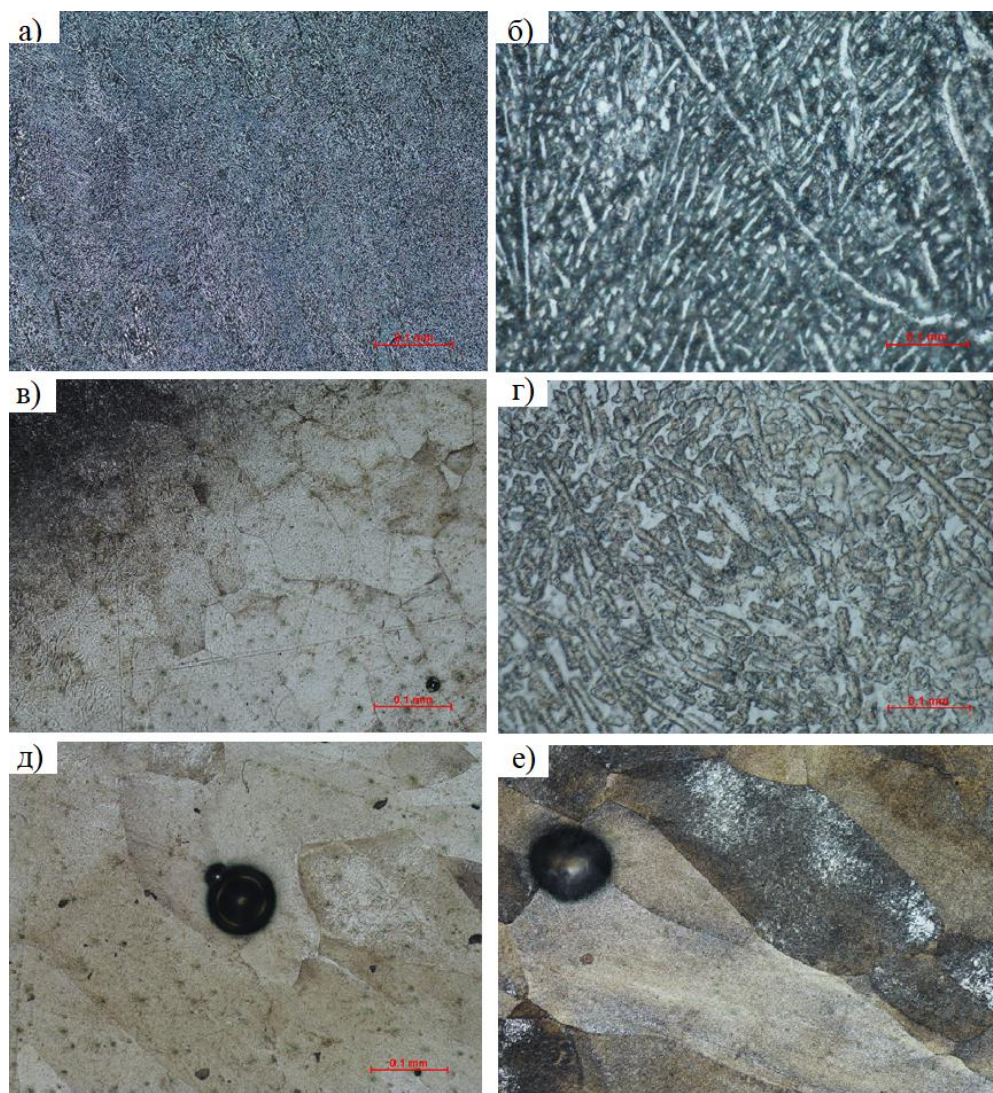


Рисунок 5.2 – Микроструктура зон:
а, б – основного металла; в, г – сварного шва; д, е – поры, расположенные по линии сплавления

Исследованиями электронной микроскопии установлено наличие мелких пор, достигающих в диаметре до 3 микрон, расположенных по линии сплавления по направлению к проплаву сварного шва (рисунок 5.3 в, г).

Пористость, как известно [81] вызывается некачественной механической подготовкой поверхности, а именно накоплением дефектов

(грубая шероховатость, закаты дефектов металлическими щетками, опескоструиванием, капиллярно-конденсированными загрязнениями). Последние в процессе сварки образуют замкнутые полости в твердофазном соединении перед фронтом расплавленной ванны и в виде готовых зародышей пор попадают в расплав и образуют поры (приложение Б, образцы 5-6).

Как видно из данных рисунка 2.12 характер распределения пор по объему сварного шва неодинаков. Поскольку ЭЛС из-за высокой концентрации энергии в луче приводит к образованию относительно узкой зоны термического влияния в первоначальный момент не образуется твердофазного соединения перед фронтом расплавленной ванны ККВ в дефектах поверхности непосредственно попадает в расплав и приводит к образованию мелких пор (приложение Г, образец 20; рисунок 5.3 в,г).

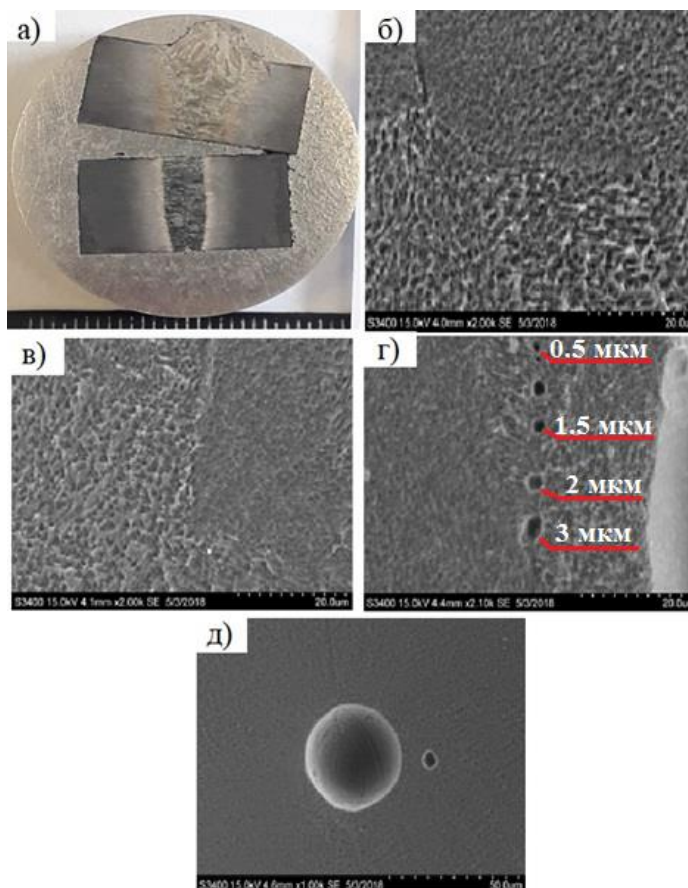


Рисунок 5.3 – Общий вид макрошлифа и растровая электронная микроскопия по зонам:

а – общий вид макрошлифа зон усиления и проплава; б, в – граница сплавления в усилении СШ; г, д – пористость линии сплавления СШ расположенные в направлении проплавления

Кроме того, пониженная температура свариваемых кромок приводит к неравномерному их плавлению. Процесс начинается по границам зерен, особенно в зонах схождения трёх-четырёх зерен из-за повышенной скорости диффузионных процессов и недостаточных температурных условий плавления зерна. Выплавленная по границам зерен жидкая фаза переходит в расплав и тем самым создаются условия для образования субмикропор, сферическая форма которых обусловлена стремлением образующейся поверхности к минимуму энергии (приложение Б, образец 9; рисунок 5.3, в,г; рисунок 5.4).

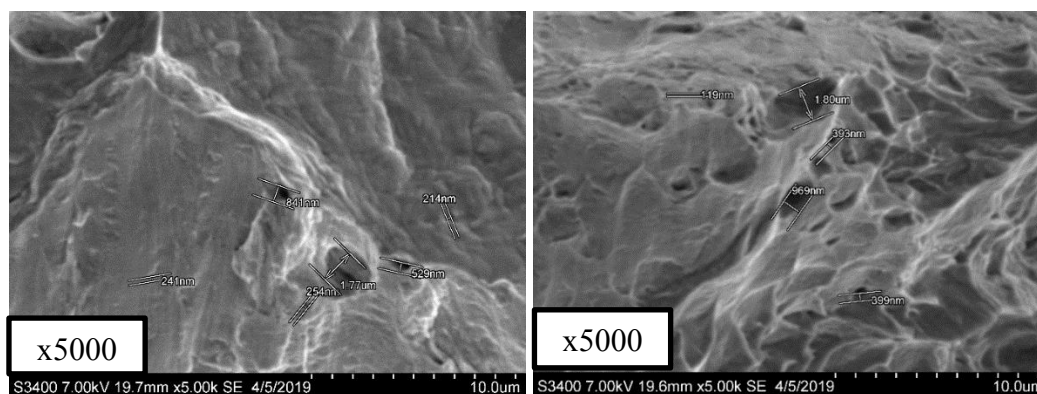


Рисунок 5.4 – Нанопоры в изломе сварного соединения варианта 3

Наряду с вышесказанными дефектами выявлены пикообразования расположенные в технологической подложке (рисунок 4.4). В поперечном сечении образца расположенного после динамических испытаний со стороны выхода электронного луча обнаружено, что разрушение произошло по линии сплавления, при этом обнаружен выплеск расплава сварочной ванны (рисунок 5.5) из технологической подложки с пикообразованиями.

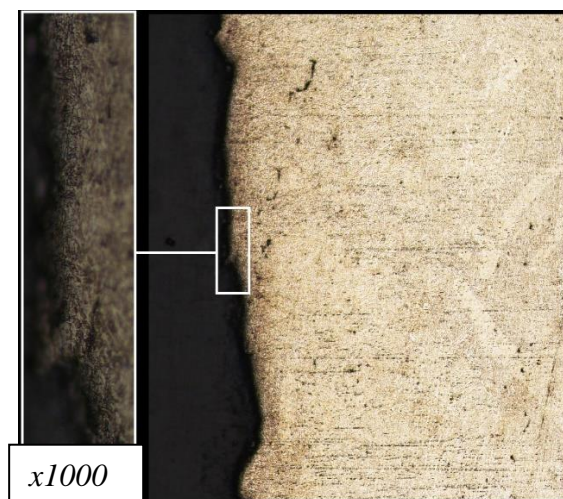


Рисунок 5.5 – Разрушение образца расположенного со стороны выхода электронного луча

Образец варианта 17 являлся цельносварным образцом, визуальным осмотром образца после разрушения установлено несплавление стыкуемых кромок сварного соединения. Микроструктурным анализом установлено, что несплавление распространяется по всей глубине сварного шва об этом свидетельствует наличие утяжины после окончания трещины при увеличении 1000 крат (рисунок 5.6).

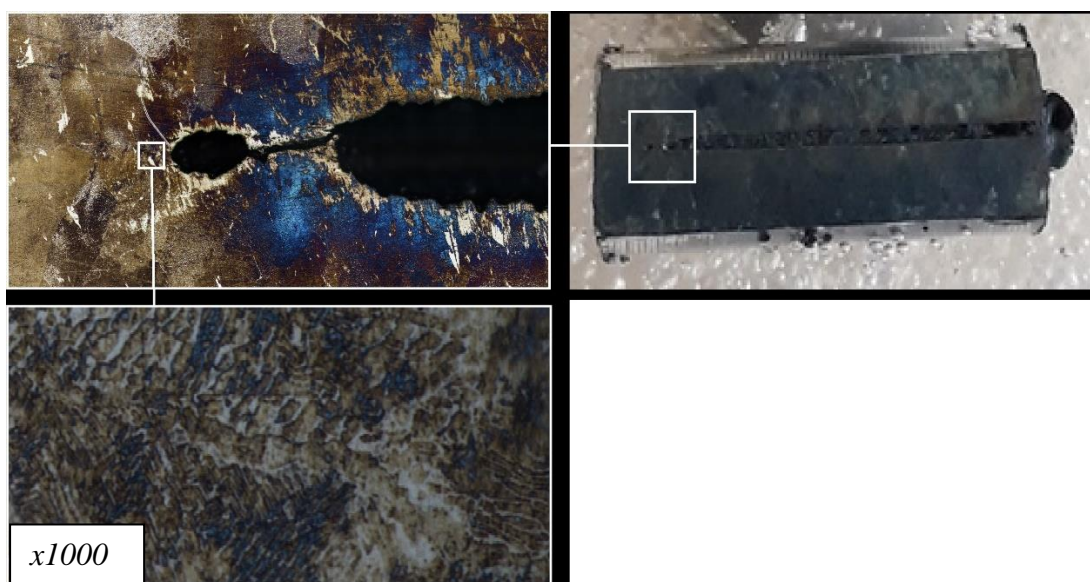


Рисунок 5.6 – Несплавление образца 17

5.2 Изменение твердости в поперечном сечении сварных соединений

Исследованием распределения микротвердости по сечению сварного шва темплета толщиной 50 мм из сплава ВТ23, выполненного на установке 30Е3000 в зонах усиления и проплава установлено, что в зоне усиления сварной шов практически идентичен основному металлу (средняя микротвердость составляет 478 НВ), в зоне проплава сварной шов по показателю микротвердости ниже практически на 20% (рисунок 5.7). Такая закономерность связана с процессами структурных изменений в процессе сварки и последующей повторной подваркой усиления шва электронным лучом при исправлении вогнутости усиления, что свидетельствует о возможности использования повторного нагрева расфокусированным электронным лучом для получения свойств сварного шва идентичного свойствам основного металла.

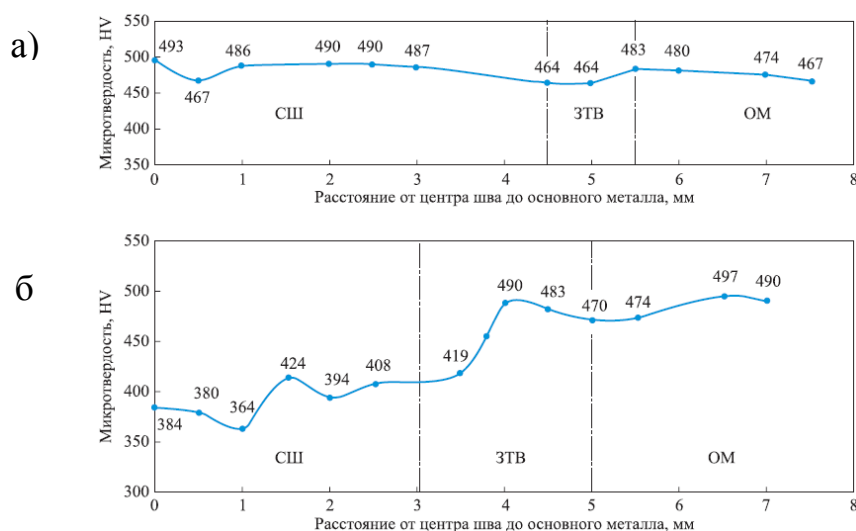


Рисунок 5.7 – Распределение твердости по зонам сварного шва темплета из сплава ВТ23, толщиной 50 мм, выполненного на установке 30Е3000

По результатам измерения твердости темплета из сплава ВТ23 толщиной 60 мм с форсированной механической обработкой стыкуемых кромок установлено, что сварной шов прочнее основного металла, что подтверждает удовлетворительные прочностные характеристики сварного шва (рисунок 5.8, таблица 5.1).

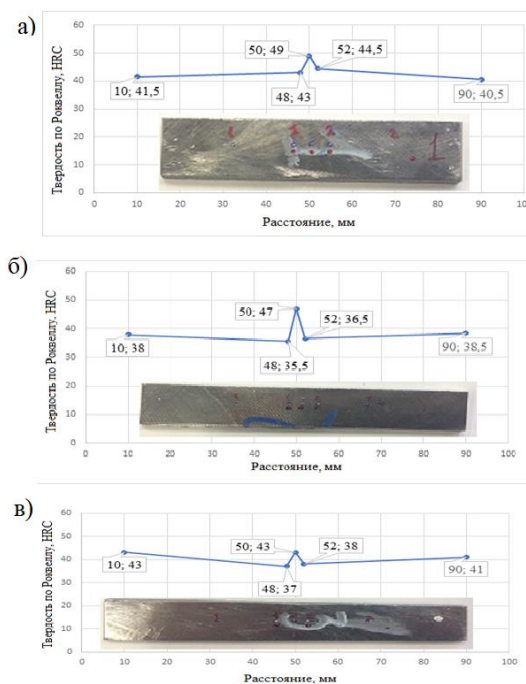


Рисунок 5.8 – Распределение твердости по зонам сварного шва темплета из сплава ВТ23, толщиной 70 мм, выполненного на установке КЛ-144:
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

Таблица 5.1 – Результаты измерения твердости темплета из сплава ВТ23, толщиной 70 мм

№	Показатель	Значение, HRC
1	Сварной шов	49
	ЗТВ 1	43
	ЗТВ 2	44,5
	Основной металл, среднее	40
2	Сварной шов	47
	ЗТВ 1	35,5
	ЗТВ 2	36,5
	Основной металл, среднее	38,2
3	Сварной шов	43
	ЗТВ 1	37
	ЗТВ 2	38
	Основной металл, среднее	42

В работе [82] установлено, что локальной термической обработкой (ЛТО) электронным лучом после ЭЛС при температуре 900°C в течении 10 минут можно улучшить пластические свойства сварных соединений и не ухудшать структуру сварного шва.

Известно, [83] что варьируя параметрами нагрева при ЛТО электронным лучом, можно не только устранить сварочные напряжения, но и влиять на скорость протекания фазовых и структурных превращений в

титановых сплавах и тем самым менять в благоприятном направлении структуру и свойства сварных соединений и обеспечивать их бездефектность.

5.3 Выводы по главе 5

1. В микроструктуре сварных соединений обнаружены цепочки субмикropористости размерностью от 50 нм до 3 мкм, а также незаконченная коагуляция, свидетельствующая о быстропротекающих процессах кристаллизации. Быстропротекающие процессы кристаллизации не позволяют готовым зародышам сформировать более крупные поры.

2. Чувствительность рентгеновских аппаратов ЭКСТРАВОЛЬТ-225 и ФИЛИН составляет 0,1 мм, что не позволяет выявлять дефекты нанометрических и микронных размерностей.

3. Гидродинамический коллапс, сопровождающийся возникновением дефекта в виде пикообразований в канале проплавления, приводит к выплеску расплава сварочной ванны.

4. Локальная термическая обработка электронным лучом после сварки позволяет получать сварные соединения близкие характеристикам твердости по сравнению с основным металлом. Твердость неразъемного соединения по шкале Виккерса после ЛТО составляет 478 НV.

5. Показатель твердости сварных соединений с форсированной механической обработкой стыкуемых кромок выше, чем показатель твердости основного металла. Средняя твердость сварных соединений по шкале Роквелла составила 46,4 НRC, основного металла 40,06 НRC.

Заключение

Титановые сплавы являются перспективным материалом для многих областей применения в авиакосмической технике благодаря их высокой удельной прочности, сопротивлению усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости.

Вероятными причинами порообразования являются: загрязненность поверхности свариваемых кромок и присадочной проволоки; загрязненность защитной атмосферы; зарождение газовых пузырьков на базе наследственных дефектов; резкое увеличение скрытого давления нерастворимых в расплавленном титане газов; выделение водорода; водород, образующийся в сварочной ванне, в результате разложения влаги и углеродосодержащих и кремнесодержащих веществ, адсорбированных поверхностью торцов из-за образование твердофазного соединения в стыке кромок перед сварочной ванной, приводящее к завариванию дефектов торцов кромок и образованию газосодержащих замкнутых полостей готовых зародышей пор.

Установлено, что преимущественное расположение дефектов их вид, место и количество свидетельствуют о влиянии технологических операций на их образование. Влияние на образование темных полос оказывают режимы ЭЛС и толщины свариваемых заготовок, наиболее подверженный появлению темных полос является сплав ВТ20 (88 %), когда сплав ВТ23 менее подвергнут специфическому дефекту, характерным дефектом для этого сплава являются цепочки пор (41 %). Темные полосы образуются при скорости сварки от 16 до 6 мм/с с толщиной стыка от 24 до 64 мм. При уменьшении скорости сварки менее 6 мм/с и увеличении толщины стыка более 75 мм количество темных полос уменьшается, но образуются цепочки пор, непровары, несплавления. Образование непроваров и несплавлений связано с некорректным позиционированием электронного луча.

Неточное позиционирование электронного луча также приводит к колебаниям в канале проплавления (колебания электронного луча составляют $\sim 0,5$ мм) и могут привести к выплыванию по границам зерен из-за повышенной подвижности легкоплавкой составляющей, а также привести к образованию дефектов в виде пикообразования из-за гидродинамической неустойчивости в канале проплавления с чередующимися коллапсами кратера.

Радиографический контроль позволил выявить в неразъемных соединениях без подготовки стыкуемых кромок, выполненных ЭЛС наличие специфического дефекта в виде темных полос, непроваров и несплавлений. Шероховатость поверхности более 12,5 мкм приводит к неточности оценки качества. В сварных соединениях с форсированной механической обработкой выявлена единичная пора 0,3 мм.

Оптической и растровой электронной микроскопией установлено наличие таких дефектов как: цепочки микропористости (от 50 нм до 3 мкм), микротрещины, плавление по границам зерен с образованием субмикропор, незаконченная коагуляция пор. Чувствительность рентгеновских аппаратов ЭКСТРАВОЛЬТ-225 и ФИЛИН составляет 0,1 мм, что не позволяет выявлять дефекты нанометрических и микронных размерностей.

Закономерности образования дефектов в сварных соединениях, выполненных ЭЛС титановых сплавов заключаются в попадании в расплав областей, заполненных капиллярно-конденсированной влагой (готовых зародышей пор) из твердофазного соединения, данный факт подтверждает химический состав пор и распределение водорода в поперечном сечении сварного соединения.

При скорости сварки от 16 до 6 мм/с ввиду быстропротекающих процессов кристаллизации не происходит коагуляции пор, что в последующем ведет к «выстраиванию» их в одну цепь по глубине сварного соединения по линиям сплавления, что при рентгеноскопии ведет к фиксации темных полос. При толщине стыка более 75 мм и скорости

сварки менее 6 мм/с формируются более крупные поры, т.к. процесс кристаллизации происходит наиболее стабильно.

Наличие дефектов в образцах выполненных ЭЛС приводит к снижению прочности и практически полному отсутствию таких характеристик как удлинение и сужение. Термическая обработка позволяет улучшить свойства сварных соединений.

Локальная термическая обработка электронным лучом после сварки позволяет получать сварные соединения близкие характеристикам твердости по сравнению с основным металлом. Твердость неразъемного соединения по шкале Виккерса после ЛТО составляет 478 НV.

Форсированная механическая обработка ведет к снижению дефектности, наличию пор в сварных соединениях и вероятнее всего к снижению капиллярно-конденсированных загрязнений. Показатель твердости сварных соединений с форсированной механической обработкой стыкуемых кромок выше, чем показатель твердости основного металла. Средняя твердость сварных соединений по шкале Роквелла составила 46,4 HRC, основного металла 40,06 HRC.

Необходимо классифицировать специфический дефект в нормативно-технической документации и разработать операции по очистке стыкуемых кромок, выявлению дефекта, его исправлению.

В настоящее время существует 2 способа по устранению «темных полос» после фиксирования их на рентгенограммах сварных соединений: 1. производят прогрев АрДЭС вольфрамовым электродом без присадочного материала линии сплавления; 2. термическая обработка сварных соединений в вакуумных печах, при повторной радиографии сварных соединений темных полос не обнаруживается, как предполагается, ввиду дегазации вредных примесей и рекристаллизации линии сплавления.

Предлагается использовать расфокусированный нагрев электронным лучом в вакуумной камере ЭЛУ, обеспечивающий оплавление стыкуемых кромок для удаления капиллярно-конденсированных загрязнений, для этого

необходимо: 1. разработать устройство для развода/свода стыкуемых кромок подборок силового элемента; 2. запрограммировать ход расфокусированного электронного луча относительно 2-х не совмещённых между собой кромок; 3. обеспечить совмещение стыка согласно производственной инструкции

Из практики механической обработки титановых сплавов известно, что для стойкости режущего инструмента операторы занижают режимы механообработки и придерживаются рабочих режимов от 600-800 оборотов/мин и подачи 60-120 мм/мин. При наблюдении процесса резания на повышенных режимах отмечается улучшение геометрической точности формы обрабатываемых кромок (отсутствует, наблюдаемое во втором режиме закругление поверхностей кромок).

Вышеуказанные обстоятельства позволяют рекомендовать принятия завышенных режимов к использованию на предприятии при чистовой обработке стыкуемых под ЭЛС кромок из титановых сплавов BT20, BT23. Для невозможности внесения корректировки в эти параметры в технологическом процессе должна присутствовать пометка о запрещении в изменении предоставленных режимов.

Вместе с тем, классический показатель качества поверхности и геометрической точности готовой детали – шероховатость обязан быть дополнен и параметром насыщенности поверхности свариваемых кромок капиллярно-конденсированной влагой и/или деградации приповерхностного слоя (это может быть определено по поперечному сечению на большом увеличении).

Такой показатель на сегодняшний день найден – процент содержания водорода, определяемый на лазерной установке оптико-эмиссионным методом [84]. Этот метод можно отнести к неразрушающему контролю, экспрессен и мобилен. В случае невозможности его применения в мобильном варианте - изготовления образца-свидетеля совместно с будущей эксплуатируемой деталью.

Список использованных источников

- 1 Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
- 2 Фролов В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов: учеб. пособие. М.: Альфа М, Инфра-М. 2011. 447 с.
- 3 Воздвиженский В.М., Жуков А.А., Постнова А.Д., Воздвиженская М.В. Сплавы цветных металлов для авиационной техники. Рыбинск: РГАТА, 2002. 219 с.
- 4 Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. М.: ВИЛС, 2000. 318 с.
- 5 Колачев Б.А., Бецоффен С.Я., Бунин С.Я., Володин В.А. Физико-механические свойства легких конструкционных материалов. М.: Металлургия, 1995. 442 с.
- 6 Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
- 7 Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
- 8 Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.11.2017).
- 9 Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
- 10 Усова В.В. Травление титана и его сплавов. / В.В. Усова, Т.П. Плотникова, С.А. Кушакович - М. : Металлургия, 1984. – 128 с.

11 Конструкционные материалы: Справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; Под общей ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

12 Ливанов В.А. Водород в титане. / В.А.Ливанов, А.А. Буханова, Б.А.Колачев – М. : Metallurgizdat, 1962. – 246 с.

13 Цвиккер У. Титан и его сплавы. Пер. с нем. – М. : Metallurgiya, 1979. – 512 с.

14 Глазунов, С.Г Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, В.И. Моисеев – М: Metallurgiya, 1974. – 386 с.

15 Еременко, В.Н. Титан и его сплавы / В.Н. Еременко – Киев: Наук, думка, 1970. – 415 с.

16 Чечулин, Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. – 248 с.

17 Колачев, Б.А. Вакуумный отжиг титановых конструкций / Б.А. Колачев, В.В. Садков, В.Д. Талалаев – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

18 Саломатова Е.С. Электронно-лучевая сварка – от изобретения до наших дней // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 1. С. 57-62.

19 Башенко В.В., Вихман В.Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки // Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки-2008: материалы I Санкт-Петербур. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: ВиТ-Принт, 2008. – 210 с.

20 Шалимов М.П., Панов В.И. История сварки. Электронно-лучевые технологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/history/h8>.

21 Мотасов М.И., Давыдов Д.А., Алексеев В.С. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 127-130.

22 Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

23 Дзунович Д.А., Панин П.В., Лукина Е.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сварных крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). С. 7.

24 Язовских В.М., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке дуговых швов // Сварка и диагностика. – 2012. - № 5. – С. 26-31.

25 Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников / В.Я. Беленький [и др.] // Вестник Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. - № 3. – С. 46-50.

26 Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавлением при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. - №1. – С. 175-181.

27 Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. - № 4. – С. 22-24.

28 Беленький В.Я. О формировании передней стенки канала проплавления при электронно-лучевой сварке // ФХОМ. – 1987. - № 1. – С. 116.

29 Структура Вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. - № 4. – С. 22-24.

30 Технологические основы сварки и пайки в авиастроении / В. А. Фролов [и др.]. М. : Интернет инжиниринг.

31 Долотов, Б.И. Сварка погруженным вольфрамовым электродом / Б.И. Долотов. – М. : Машиностроение, 2004. – 208 с.

32 Муравьев, В.И. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов – М. : Эком, 2009. – 752 с.

33 Редчиц В.В. Основные закономерности образования пор при сварке плавлением титана и его сплавов / В.В.Редчиц, Г.Д.Никифоров, В.В.Фролов, Б.А. Колачев // Сварочное производство. 1987, № 5. – С. 28-30.

34 Редчиц В.В. Аналитическая оценка вероятности возникновения пузырьков газа, выделяющегося из расплава при сварке / В.В.Редчиц, Г.Д.Никифоров. // Автоматическая сварка. 1983, № 9. – С. 32-35.

35 Редчиц В.В. Механизм зарождения в сварочной ванне пузырьков газа при сварке активных металлов / В.В.Редчиц, Г.Д.Никифоров // Сварочное производство. 1977, № 8. – С. 53-57.

36 Редчиц В.В. Сравнительная оценка склонности к образованию пор при сварке плавлением различных активных металлов / В.В.Редчиц, Г.Д.Никифоров// Автоматическая сварка. 1983. № 2. – С. 30-33.

37 Рахманов А.Д. Об условиях зарождения газовых пор при дуговой сварке / А.Д.Рахманов // Сварочное производство. 1978. № 1. – С. 53-56.

38 Бахматов П.В., Клешнина О.Н., Кузнецов А.А. Накопление водорода в поверхностном слое титановых заготовок в процессе изготовления конструкций // «Будущее машиностроения России» материалы Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов М.: МГТУ им. Баумана, 2010, с. 102-104.

39 Муравьев, В. И. Активация процессов формирования соединений из металлов и сплавов: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, П. А. Саблин. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 366 с.

40 Перспективные металлургические и технологические процессы производства, повышающие надежность изделий из конструкционных материалов: моногр. / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, А. В. Фролов. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. - 330 с. (ISBN 978-5-7765-1187-5)

41 Накопление водорода в поверхностном слое Ti-заготовок при изготовлении конструкций [Текст] / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З. Лончаков, Р. А. Физулаков // *Металлургия машиностроения*. – 2011. – № 6. – С. 24-30.

42 Влияние активации твердофазного соединения титановых заготовок перед фронтом расплавленной ванны на порообразование при сварке плавлением [Текст] / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, О. П. Логвинов, К. А. Мелкоступов // *Сварочное производство*. – 2012. – № 6. – С. 11-16.

43 Активация и дезактивация конденсации загрязнений на поверхности свариваемых заготовок из титановых сплавов [Текст] / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З. Лончаков, О. П. Логвинов // *Контроль. Диагностика*. – 2012. – № 3 – С.26-31.

44 Влияние интенсификации процесса перемешивания расплавленного металла в сварочной ванне на газонасыщение и свойства титановых конструкций [Текст] / С. З. Лончаков, В.И. Муравьев, Б.И. Долотов, П.В. Бахматов // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. - 2013. - №8. - С. 3-7

45 Низкотемпературная плазма / В. С. Энгельшт, В. Ц. Гурович, Г. А. Десятков и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – Т. 1. Теория столба электрической дуги. – 376 с.

46 Haidar J. Non-equilibrium modeling of transferred arcs // *Ibid.* – 1999. – 32. – P. 263–272.

47 Sansonnets L., Haidar J., Lowke J. J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion // *Ibid.* – 2000. – 33. – P. 148-157.

48 Computational simulation of arc melting process with complex interactions / H. Nishiyama, T. Sawada, H. Takanaet al. // *ISIJ International*. – 2006. – 46, № 5. – P. 705–711.

49 Кривцун И. В., Демченко В. Ф., Крикент И. В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким [Текст] // *Автомат. сварка*. – 2010. – № 6. – С. 3–11.

50 Определение содержания водорода в титановых сплавах в ходе технологического цикла / Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Григорьев В.В. // Сварочное производство. – 2018. № 3. – С. 14-20.

50 Metallurgy and technology of titanium and its alloys / Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. – 2-е изд., доп. и перераб. – К. : Наук. Думка, 1986. – 240 с.

51 Определение возможности расчета остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, А.А. Дебеляк // Ученые записки КНАГТУ № IV – 1(4) 2010. – С. 68-80.

52 Колачев Б.А. Физическое металловедение титана. – М. : Metallurgy, 1976. – 184 с.

53 Муравьев, В.И. Оценка качества сварных шпангоутов из сплава BT20 / В.И. Муравьев, В.Г. Шаробарин, Ю.Д. Богатов // Авиационная промышленность. – 1986. - № 5. – С.75-77.

54 Джеффи, Р.И. Основы металловедения титановых сплавов / Джеффи Р.И. // Успехи физики металлов. Т. IV; пер. с англ. - М.: Metallurgizdat, 1961. - С. 77 – 191.

55 Перемешивание металла в ванне при сварке погруженным вольфрамовым электродом / Б.И. Долотов, В.И. Муравьев, Б.Н. Марьин и др. // Сварочное производство. - 1998. - № 2. – С. 15-16.

56 Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Pletnev N.O., Develyak A.A. Influence on the stress state on the structure and properties of welded steel and alloy structures // Steel in Translation. 2016. № 4. P. 256-259.

57 Sansonnets L., Haidar J. Lowke J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion // Ibid. 2000. Vol. 33. P. 148-157.

58 Nishiyama H., Sawada T., Takanaet H. Computational simulation of arc melting process with complex interactions // ISIJ International. 2006. № 5. P. 705-711.

59 Папуша А.Г. Анализ дефектов в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой / А.Г. Папуша, А.Н. Андреев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017, т. 1, № 13, С. 424–426.

60 Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Кинетика взаимодействия частиц в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. / В.В. Новокрещенов, Р.В. Родякина // Сварочное производство. – 2012. - № 12. – С. 18–22.

61 Шевелев А.Д., Замков В.Н., Гуревич С.М. Особенности электронно-лучевой сварки сплава ВТ6 больших толщин. Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Сб. докл. 1-й Всесоюзн. конф., Киев, Наукова Думка, 1980, с. 306–310.

62 Шевелев А.Д. Однопроходная электронно-лучевая сварка листов титана больших толщин в нижнем положении. / А.Д. Шевелев, В.Н. Замков, В.Е. Локшин // Автоматическая сварка. – 1980. - № 4. – С. 69–70.

63 Fishgoit A.F., Kolachev V.A., Mamaev A.A., Shtemler Y.M. Diffusion of hydrogen during and after electron beam welding titanium alloys. *Welding International*, 1993, no. 3, pp. 230–233, doi: 10.1080/09507119309548380.

64 Братухин А.Г., ред. Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиационной промышленности. Москва, Машиностроение, 1997. 600 с.

65 Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А.Бельчук, Л.К.Демянцевич. - М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.

66 Анциферов В.Н. Порошковая металлургия и напыление покрытия / В.Н.Анциферов, Г.В.Бобров, Л.К.Дружинин [и др]. - М. : Металлургия, 1987. - 792 с.

67 От инноваций к совершенствованию конструкции самолетов: компания «Сухой» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.ur-pro.ru/library/modernization/modernization_teh/innovacii-sukhoi.html.

68 Электронно-лучевая сварка // stc-paton.com : ежедн. интернет-изд. 2013. 17 мая URL: <https://stc-paton.com/rus/equipment/ebw04> (дата обращения: 16.10.2017).

69 Муравьев, В.И., Бахматов П.В. Доминирующие факторы образования поверхности раздела, вызывающие капиллярную конденсацию загрязнений и дефектность металла шва титановых конструкций // Сварка и диагностика. – 2016. - № 3. – С. 11-16.

70 Справочник по сварке цветных металлов / Гуревич С.М.; Отв. ред. Замков В.Н. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1990. – 512 с.

71 Вихман В.Б., А.Н. Козлов, Маслов М.А. Преимущества и недостатки электронного луча при сварке по сравнению с лазером и электрической дугой // Доклады III С.-Петербург. Междунар. науч.- техн. конф., 24–26 июня 2014 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 4–19.

72 Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding // Welding and Joining Institute. – 2006. – Vol. 34. – P. 1–4.

73 Zenker R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application // La Metallurgia Italiana. – 2009. – Iss. 3. – P. 1–8.

74 Elektronenstrahlschweißen Grundlagen einer faszinierenden Technik / A. Volker [et al.]. – Munich, 2011. – 98 s.

75 Муравьев В.И. Особенности деформации и разрушения упрочненных высокоуглеродистых сталей после обработки в температурных условиях фазового превращения и превращения / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, С.З. Лончаков, А.В. Фролов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. Том 62. - №1. – С. 62-72.

76 Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А.. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск. Наука, 2008. – 328 с.

77 Ночновная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов / Н.А. Ночновная, П.В. Панин // Труды ВИАМ. – 2014. - № 5. – С. 2.

78 Григорьев В.В. Исследование возникновения специфических дефектов электронно-лучевой сварки (ЭЛС) титановых сплавов / В.В. Григорьев, В.И. Муравьев, П.В. Бахматов // Сварочное производство. – 2019. - № 4. – С. 36-42.

79 Сейдгазов Р.Д. Экспресс-проектирование технологии лучевой сварки с минимизацией порообразования / Р.Д. Сейдгазов // Международная конференция электронно-лучевая сварка и смежные технологии «Национальный Исследовательский Университет» «МЭИ» 17-20 ноября 2015 года: сборник материалов и докладов – М.: Издательство МЭИ, 2015. С. 554-565.

80 Электронно-лучевая сварка : монография / Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.Г. Колева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 374 с.

81 Пористость при сварке цветных металлов. / В.В. Редчиц [и др.]. – М.: Издательский центр Технология машиностроения, 2002. – 448 с.

82 Вржижевский Э.Л., Сабокарь В.К., Ахонин С.В., Петриченко И.К. Влияние локальной термической обработки при ЭЛС титановых сплавов с силицидным упрочнением на механические свойства металла швов // Автоматическая сварка. – 2013. - № 2. – С. 21-24.

83 Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. / В.С. Лясоцкая. – М. : Экомет, 2003. – С. 261-262.

84 Муравьев В.И., Бахматов П.В., Лончаков С.З., Григорьев В.В. Определение содержания водорода в титановых сплавах в ходе технологического цикла // Сварочное производство. – 2018. - №3. – С. 14-20.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Дефекты сварных соединений, причины образования и нормы их допуска без исправления (ПИ 1.4.1898-2003)

Дефект	Причины образований дефектов	Способы обнаружения дефектов	Нормы допустимых без исправления дефектов					
			I категория		II категория		III категория	
			Без исправления	К исправлению	Без исправления	К исправлению	Без исправления	К исправлению
Отклонение от норм размеров сварных швов	Неправильный режим или несоблюдение техники сварки	ВО, МА	Увеличение размеров шва, не превышающее 10% норм, если суммарная протяженность таких участков не превышает 10% длины шва.	Уменьшение высоты усиления или величины проплава стыкового соединения или катета углового шва от норм на участках с суммарной длиной не более 20% длины шва.	Увеличение размеров шва, не превышающее 20% норм, если суммарная протяженность таких участков не превышает 20%	Уменьшение высоты усиления или величины проплава стыкового соединения или катета углового шва от норм на участках с суммарной длиной не более 30% длины шва.	Увеличение размеров шва, не превышающее 30% норм, если суммарная протяженность таких участков не превышает 30% длины шва.	Уменьшение высоты усиления или величины проплава стыкового соединения или катета углового шва от норм на участках с суммарной длиной не более 50% длины шва.

	Неудовлетворительная подготовка и сборка деталей под сварку		Уменьшение ширины стыкового шва при условии полного провара соединения и наличия плавных переходов к основному материалу.	Уменьшение высоты усиления шва или величины проплава от норм независимо от длины шва дефектных участков.	длины шва. Уменьшение ширины стыкового шва при условии полного провара соединения и наличия плавных переходов к основному материалу.	Уменьшение высоты усиления шва или величины проплава от норм независимо от длины шва дефектных участков.	Уменьшение ширины стыкового шва при условии полного провара соединения и наличия плавных переходов к основному материалу.	Уменьшение высоты усиления шва или величины проплава от норм независимо от длины шва дефектных участков.
Непровары в стыковых швах (нахлесточных, тавровых, в угол)	Неправильный режим или несоблюдение техники сварки. Неудовлетворительная подготовка материала или сборка изделия	ВО, МА, РГК	Не допускается	В стыковых и угловых швах на участках с суммарной протяженно	Не допускает	В стыковых и угловых швах на участках с суммарной протяженнос тью не более	Не допускается	В стыковых и угловых швах на участках с суммарной протяженностью не более 40%

	под сварку.			стью не более 20% длины шва		30% длины шва		длины шва
Окисление сварного шва и околошовной зоны, определяемое цветом поверхности сварного соединения; по мере увеличения степени окисления поверхностного слоя, цвет меняется след. образом: соломенный, коричневый, фиолетовый, синий, серый, наличие белого налета Проплав грибовидной формы	Несоответствие расхода аргона оптимальным значениям при сварке с местной замкнутой, содержание примесей в аргоне больше нормы. Неправильная конструкция устройств для местной защиты или их плохое прилегание к поверхности, малое время охлаждения в аргоне. Увеличение газовых примесей в атмосфере камеры.	ВО	Не допускается	Швы с поверхностью соломенного, коричневого цвета, если длина окисленных участков не превышает 15% длины шва. Околошовная зона с поверхностью соломенного, коричневого, фиолетового цвета независимо	Не допускаются	Швы с поверхностью соломенного, коричневого цвета, если длина окисленных участков не превышает 20% длины шва. Околошовная зона с поверхностью соломенного, коричневого, фиолетового цвета независимо от длины окисленных	Не допускается	Швы с поверхностью соломенного, коричневого цвета,
								если длина окисленных участков не превышает 25% длины шва. Околошовная зона с поверхностью соломенного, коричневого, фиолетового цвета независимо от длины окисленных участков.

				от длины окисленных участков.		участков.		
Прожег	Неправильный режим или несоблюдение техники сварки. Неудовлетворительная подготовка к сборке изделий под сварку	ВО	Не допускается	Прожег до 15 мм каждый, не выходящие за пределы шва, не более двух на 1000 мм длины шва	Не допускаются	Прожег до 20 мм каждый, не выходящие за пределы шва, не более двух на 1000 мм длины шва	Не допускается	Прожег не зависимо от количества суммарной протяженностью не более 200 мм на 1000 мм длины шва
Вогнутость со стороны проплава	Недостаточное притупление кромок при сварке стыковых соединений. Завышенный ток при сварке тавровых и нахлесточных соединений, чрезмерное давление	ВО, РГК	Глубина не более 5% минимальной толщины свариваемого металла с плавным переходом на длине не	Вогнутость более 5% минимальной толщины свариваемых элементов	Глубина не более 10% минимальной толщины свариваемых	Глубина не более 10% минимальной толщины свариваемого металла с плавными переходами на длине не	Вогнутость более 10% минимальной толщины свариваемых элементов с плавными переходами	Вогнутость более 25% минимальной толщины свариваемых элементов

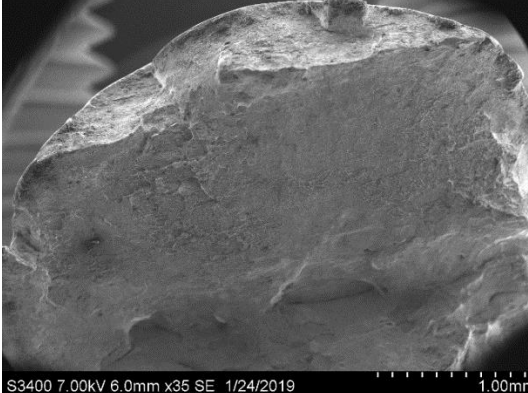
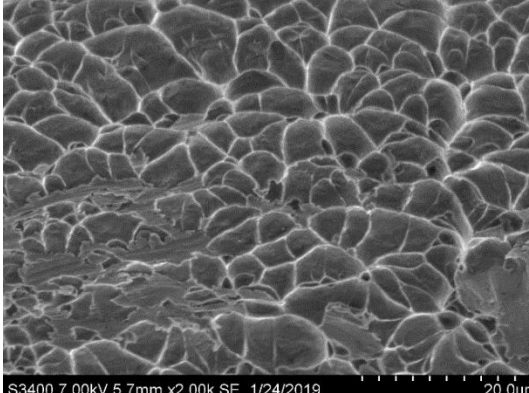
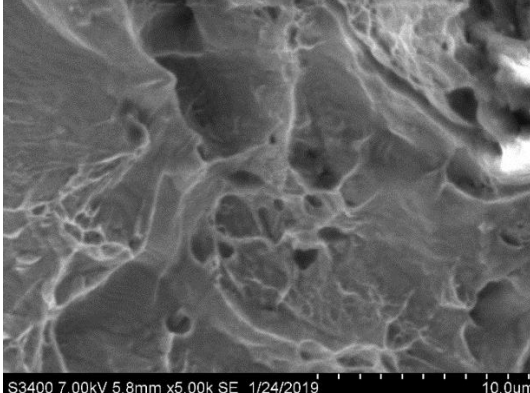
	газа защиты корня шва.		более 20% длины шва		элементов	более 50% длины шва	на всей длине	
Кратеры	Неправильная технология или техника окончания сварки	ВО, РГК	Не допускаются	Кратеры любой величины	Не допускаются	Кратеры любой величины	Не допускаются	Кратеры любой величины
Трещины	Плохое качество защиты. Жесткая конструкция изделия. Велико время между сваркой и термообработкой. Неправильный режим или техника сварки	РГК, УЗК, МА	Не допускаются	Трещины продольные, суммарная протяженность которых не превышает 5% длины шва. Трещины поперечные, не более одной на 1000 мм длины сварного шва	Не допускаются	Трещины продольные, суммарная протяженность которых не превышает 10% длины шва. Трещины поперечные, не более одной на 1000 мм длины сварного шва	Не допускаются	Трещины продольные, суммарная протяженность которых не превышает 15% длины шва. Трещины поперечные, не более одной на 1000 мм длины сварного шва
Поры	Загрязнение поверхности свариваемых кромок и	РГК	Поры размером и суммарной	Поры размеры и суммарная	Поры размером и	Поры размеры и суммарная	-	-

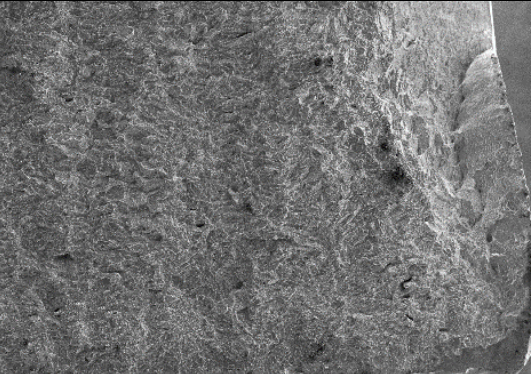
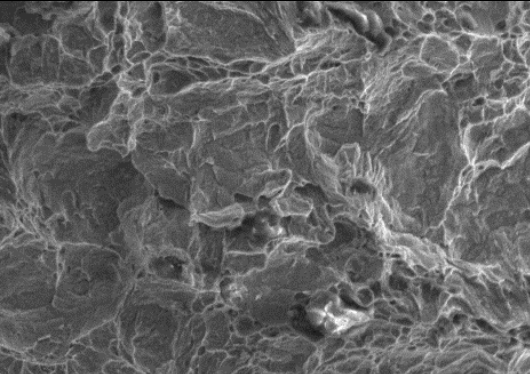
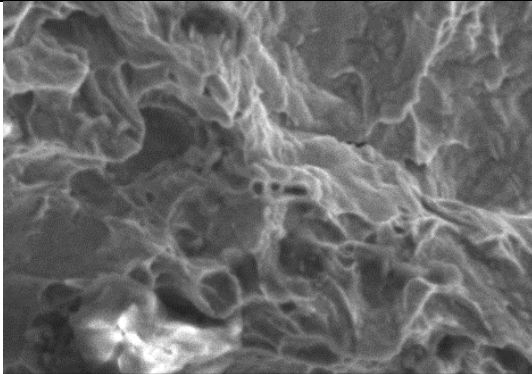

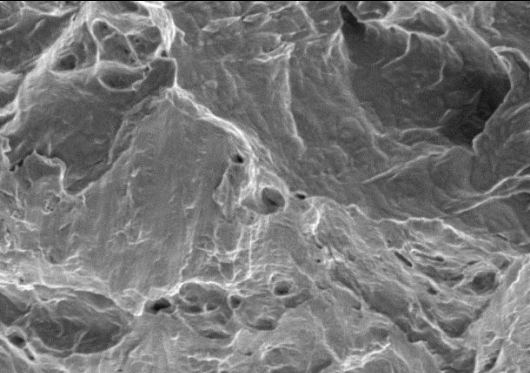
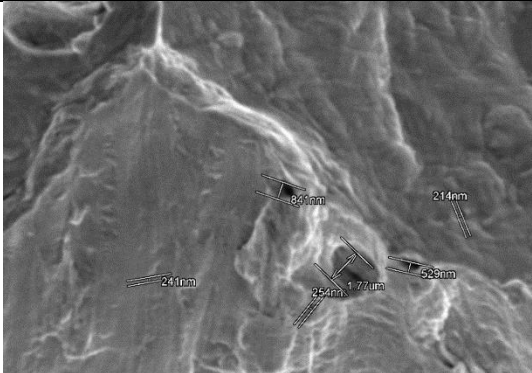
	<p>присадочной проволоки, чистота обработки свариваемых кромок ниже требуемой. Содержание водорода в основном и присадочном материале превышает норму. Неправильный режим или несоблюдение техники сварки</p>		<p>длины согласно табл</p>	<p>длина которых превышает нормы, если протяженность дефектных участков составляет не более 20% длины шва</p>	<p>суммарной длины согласно табл</p>	<p>длина которых превышает нормы, если протяженность дефектных участков составляет не более 30% длины шва</p>		
<p>Подрезы</p>	<p>Неправильный режим или несоблюдение техники сварки. Неудовлетворительная сборка изделия</p>	<p>ВО, МА</p>	<p>При глубине подрезов не более 5% толщины материала (но не более 0,3 мм) и суммарной протяженностью не более 10% длины шва</p>	<p>При суммарной протяженности подрезов не более 20% длины шва</p>	<p>При глубине подрезов не более 10% толщины материала (но не более 0,5 мм) и суммарной протяженностью не</p>	<p>При суммарной протяженности подрезов не более 30% длины шва</p>	<p>При глубине подрезов не более 15% толщины материала (но не более 0,8 мм) и суммарной протяженностью не более 30% длины шва</p>	<p>При суммарной протяженностью подрезов не более 40% длины шва</p>

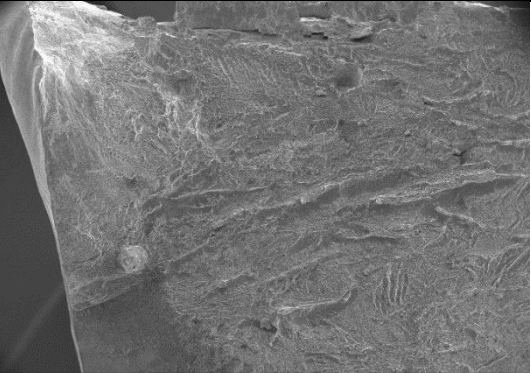
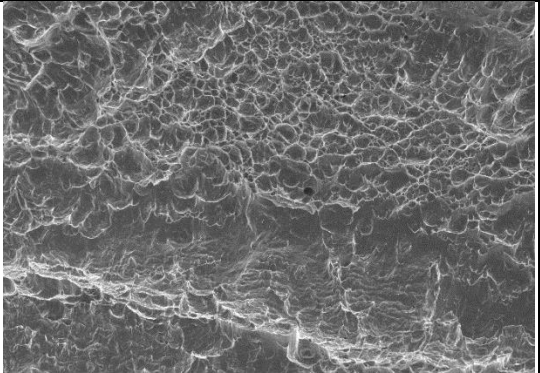
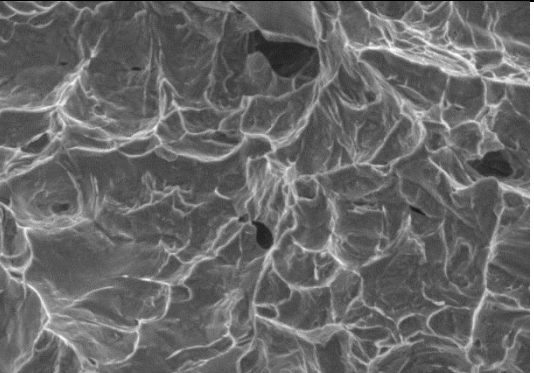
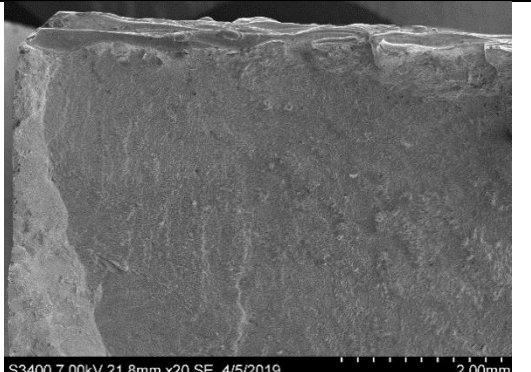
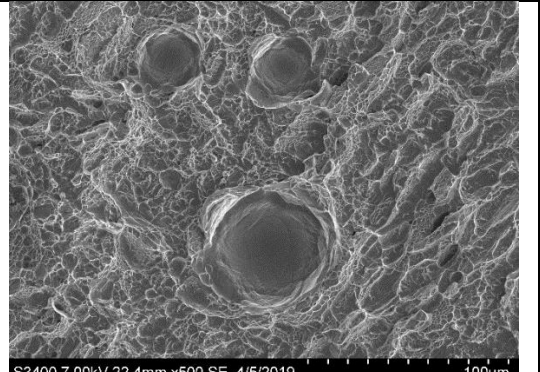
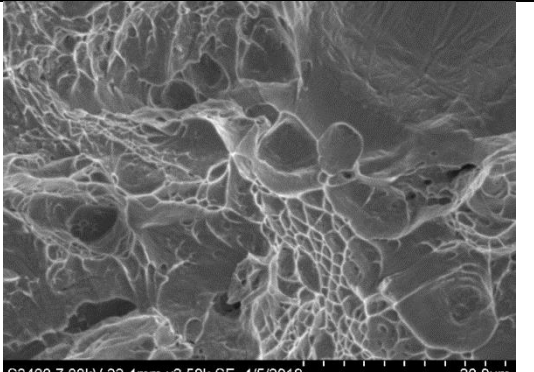
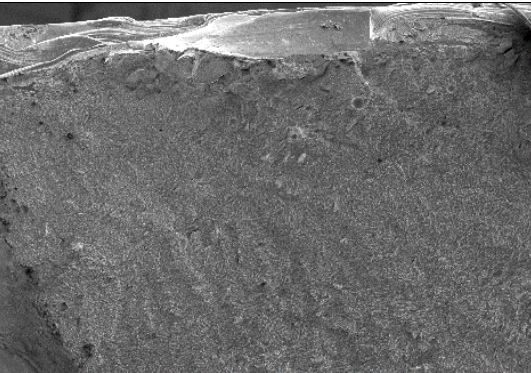
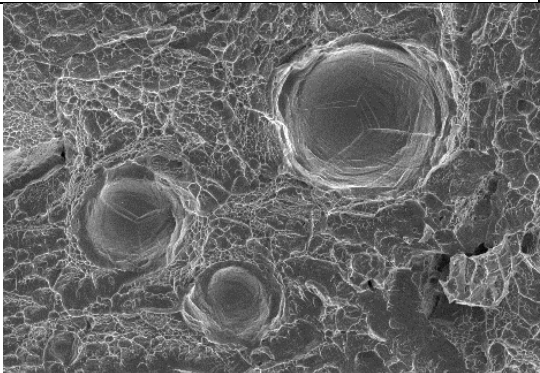
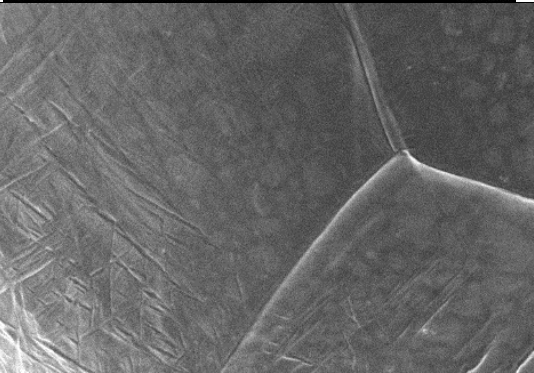
					более 20% длины шва			
Несплавления при многопроходной сварке	Неправильно выбран режим сварки	ВО, РГК	Не допускаются	То же, что для пор	Не допускаются	То же, что для пор	-	-

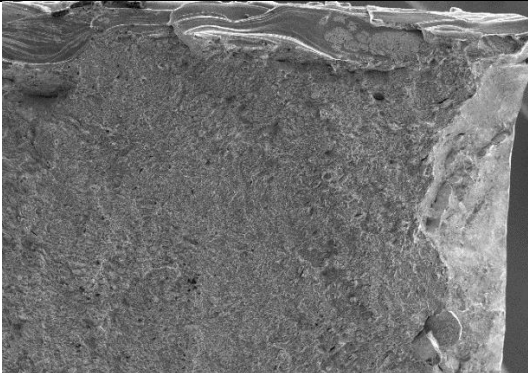
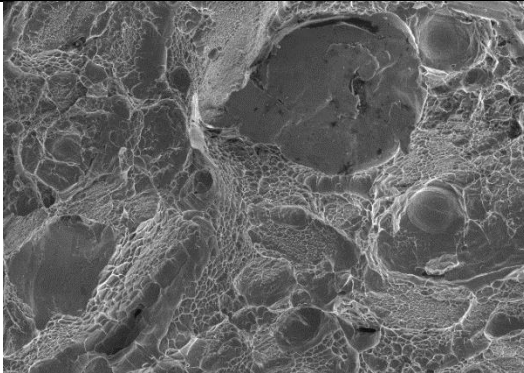
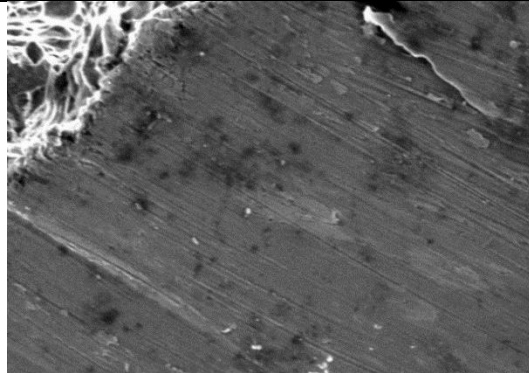
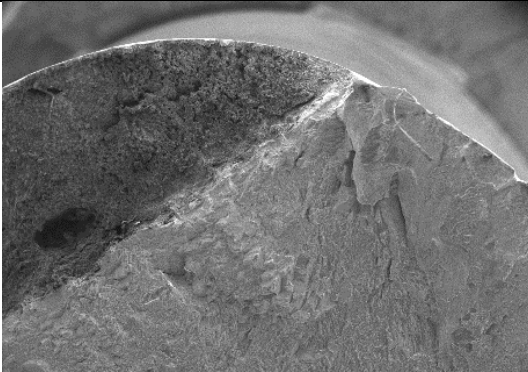
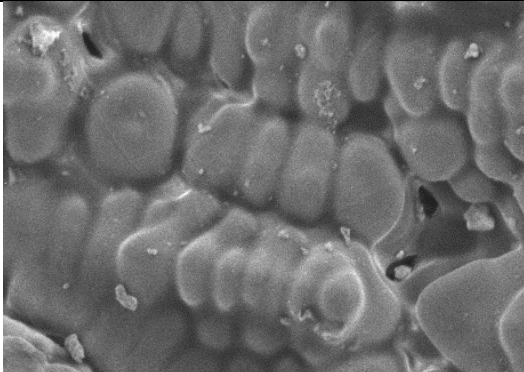
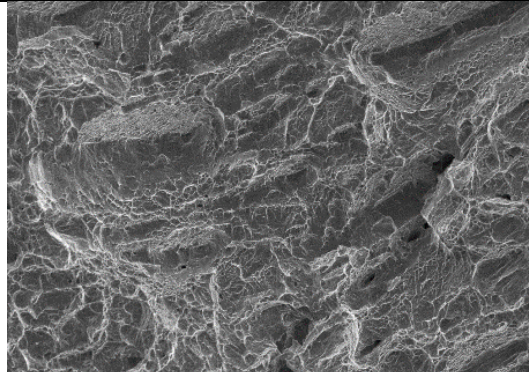
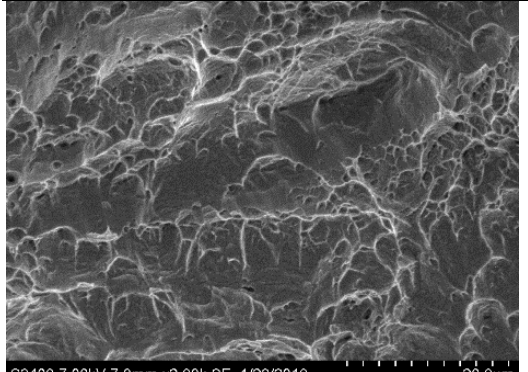
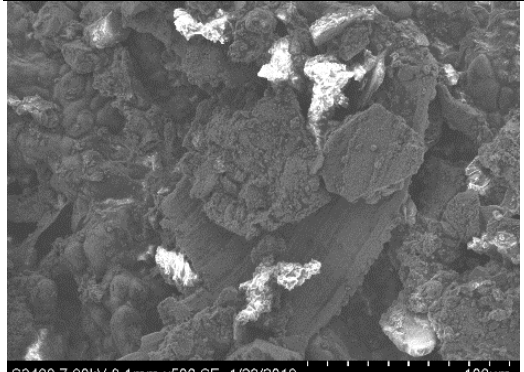

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

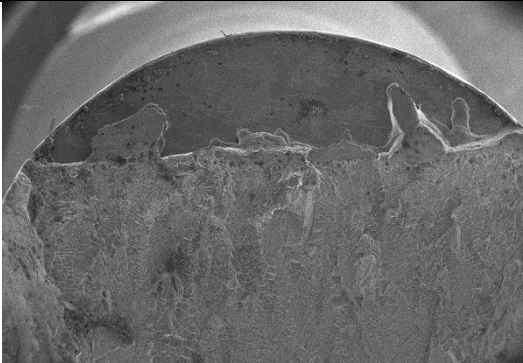
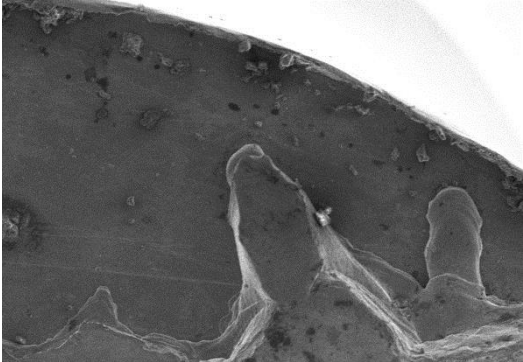
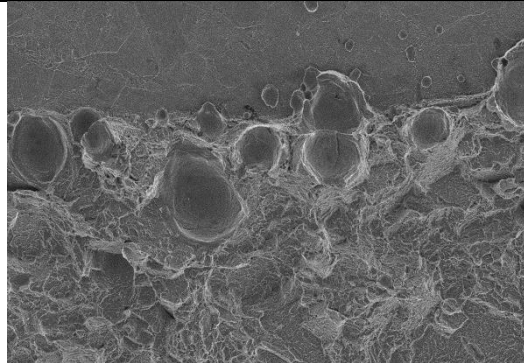
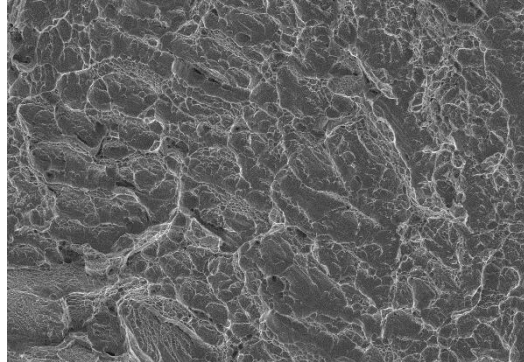
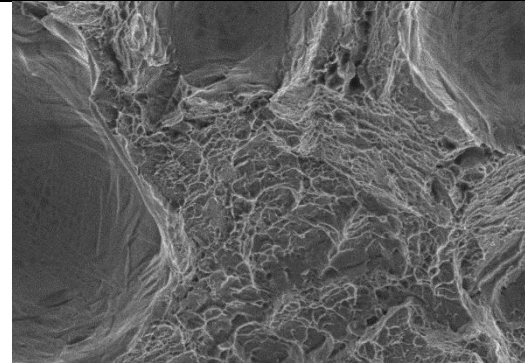
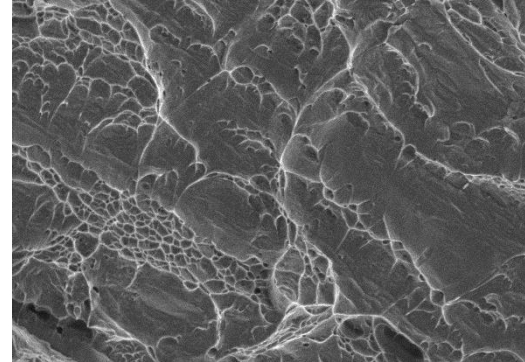

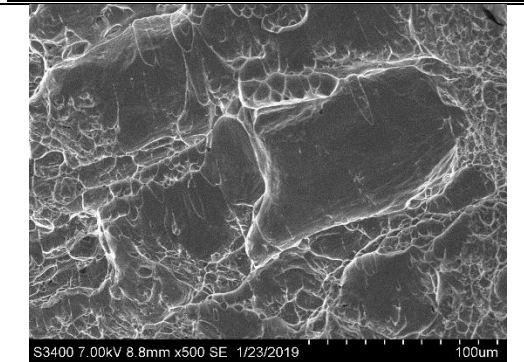
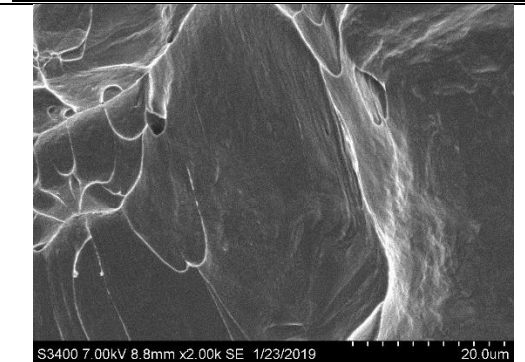
Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава ВТ20 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов

№	Вид испытания	h, мм	Характер излома		
1 Т1	Рыв	20			

2 Т2	Удар		 <p>S3400 7.00kV 12.1mm x35 SE 1/24/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 11.8mm x2.00k SE 1/24/2019 20.0um</p>	 <p>S3400 7.00kV 11.8mm x5.00k SE 1/24/2019 10.0um</p>
3 Т3	Разрыв	30	 <p>S3400 7.00kV 22.3mm x20 SE 4/5/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 19.7mm x2.50k SE 4/5/2019 20.0um</p>	 <p>S3400 7.00kV 19.7mm x5.00k SE 4/5/2019 10.0um</p>

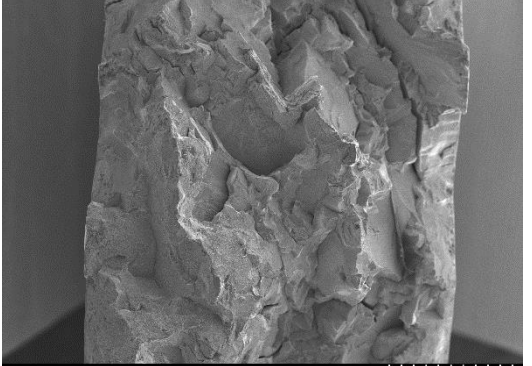
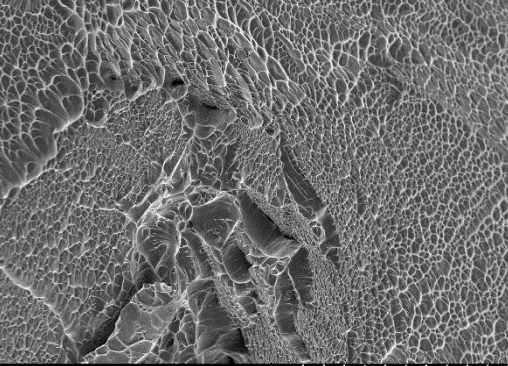
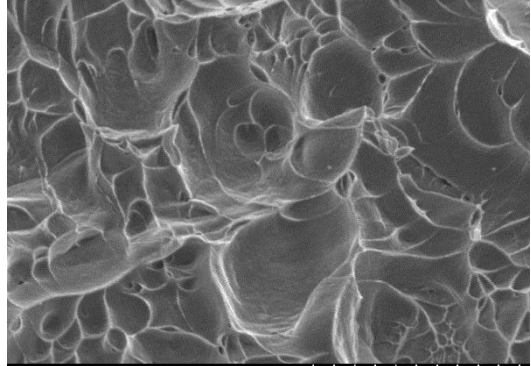
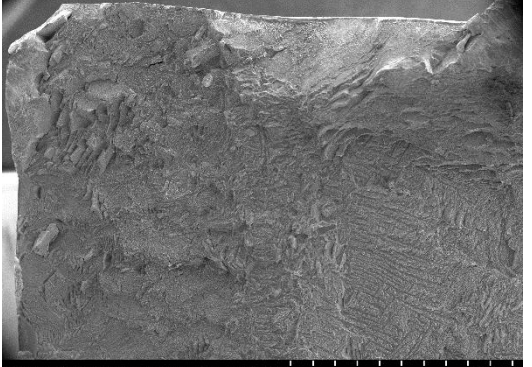
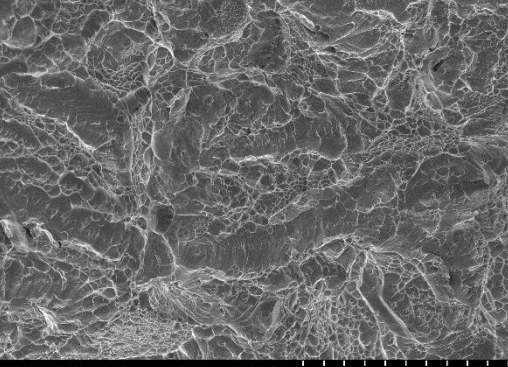
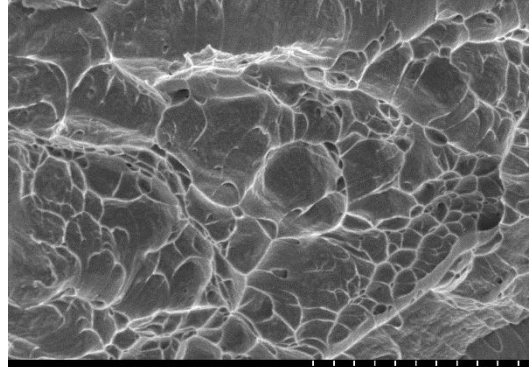
4 т4	Удар, усилени е	 <p>S3400 7.00kV 10.2mm x30 SE 4/5/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 10.2mm x500 SE 4/5/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 9.9mm x3.00k SE 4/5/2019 10.0um</p>
5 т5	Удар, корень	 <p>S3400 7.00kV 21.8mm x20 SE 4/5/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 22.4mm x500 SE 4/5/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 22.4mm x2.50k SE 4/5/2019 20.0um</p>
6 т6	Удар, корень	 <p>S3400 7.00kV 19.0mm x27 SE 4/4/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 18.6mm x500 SE 4/4/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 18.7mm x2.50k SE 4/4/2019 20.0um</p>

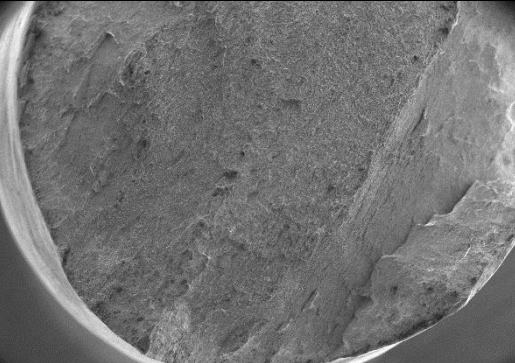
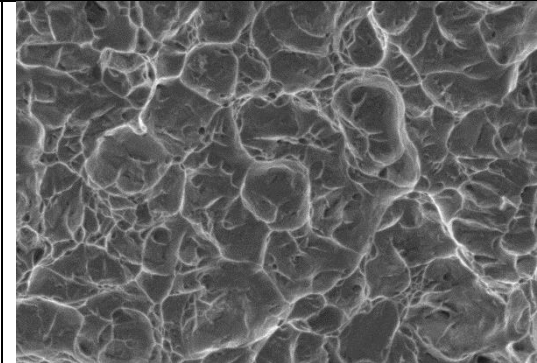
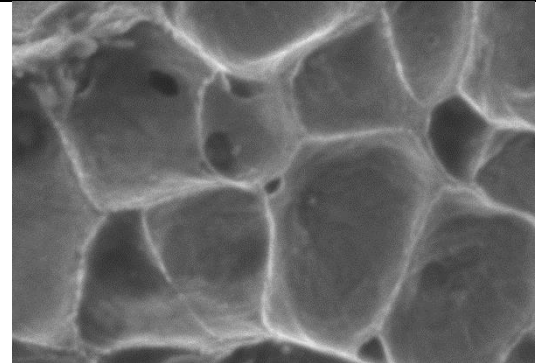
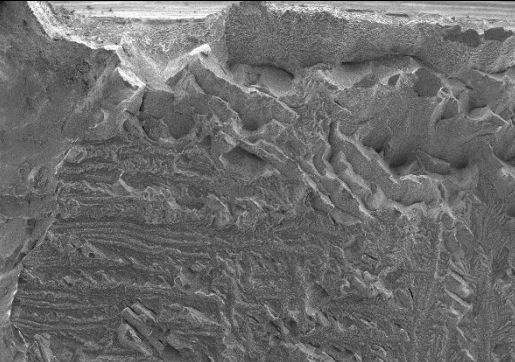
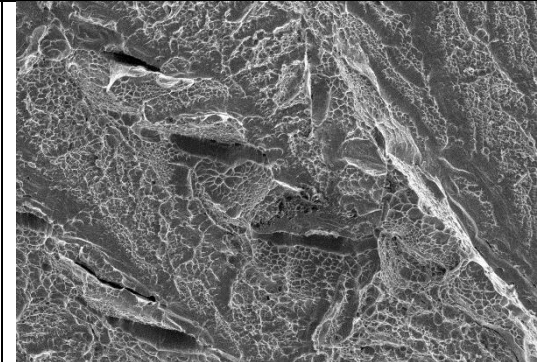
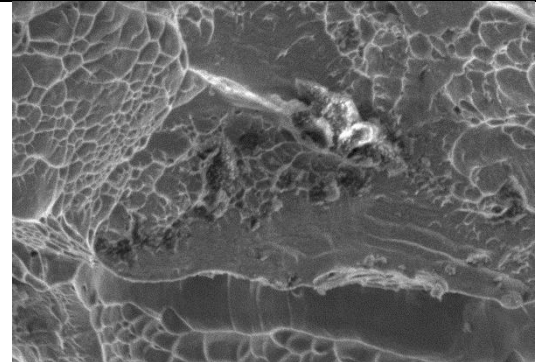
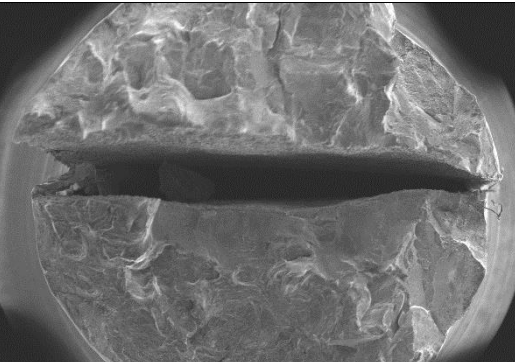
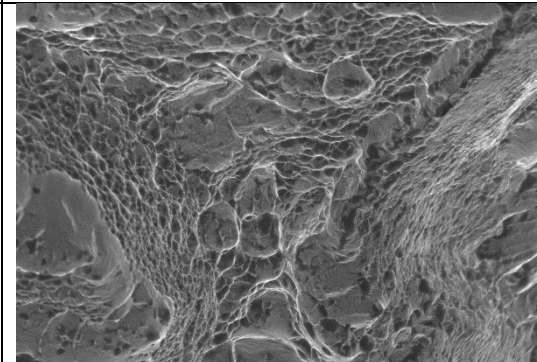
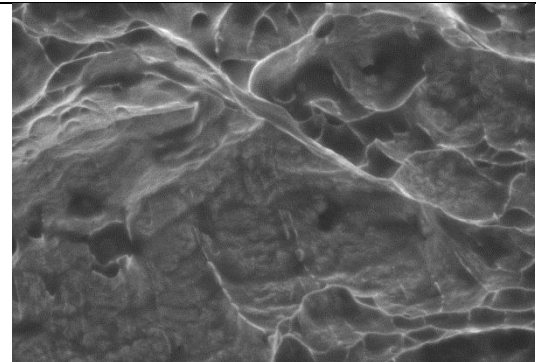
7 т7	Удар, корень		 <p>S3400 7.00kV 23.4mm x21 SE 4/5/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 23.5mm x500 SE 4/5/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 23.1mm x2.50k SE 4/5/2019 20.0um</p>
8 т9	Разрыв	60	 <p>S3400 7.00kV 8.2mm x35 SE 1/23/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.2mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>	 <p>S3400 7.00kV 7.8mm x500 SE 1/23/2019 100um</p>
			 <p>S3400 7.00kV 7.8mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.1mm x500 SE 1/23/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.1mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>

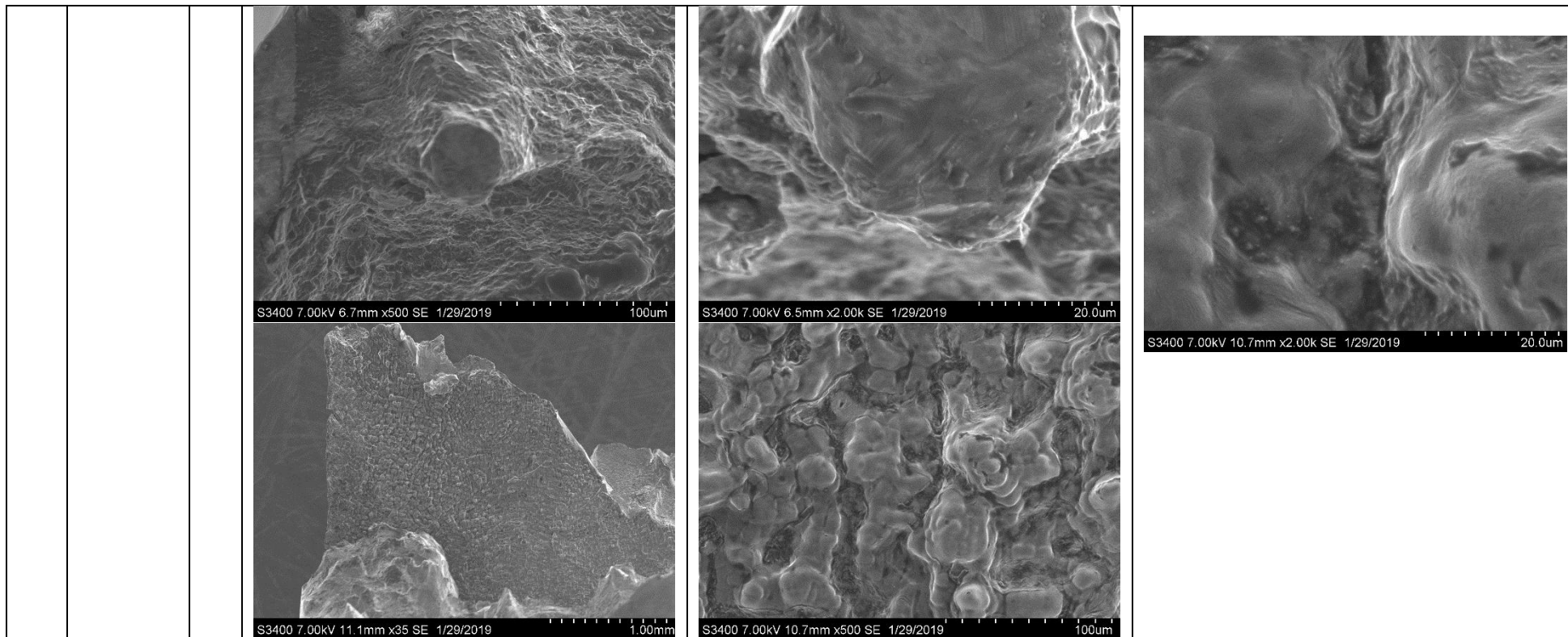
9 т12	Разрыв	60	 <p>S3400 7.00kV 7.8mm x35 SE 1/23/2019 1.00mm</p>  <p>S3400 7.00kV 8.6mm x100 SE 1/23/2019 500um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.1mm x500 SE 1/23/2019 100um</p>  <p>S3400 7.00kV 8.4mm x500 SE 1/23/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.1mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>  <p>S3400 7.00kV 8.4mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>
10 т9	Удар	60	 <p>S3400 7.00kV 9.1mm x35 SE 1/23/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.8mm x500 SE 1/23/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.8mm x2.00k SE 1/23/2019 20.0um</p>
Примечание: т – номер образца согласно таблице 3.1					

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава ВТ23 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов

№	Вид испытания	h, мм	Характер излома		
11 т15	Разрыв	60	 <p>S3400 7.00kV 12.4mm x30 SE 4/5/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 12.8mm x500 SE 4/5/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 12.9mm x2.50k SE 4/5/2019 20.0um</p>
12 т14	Удар	60	 <p>S3400 7.00kV 11.5mm x27 SE 4/4/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 10.9mm x500 SE 4/4/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 10.9mm x2.50k SE 4/4/2019 20.0um</p>

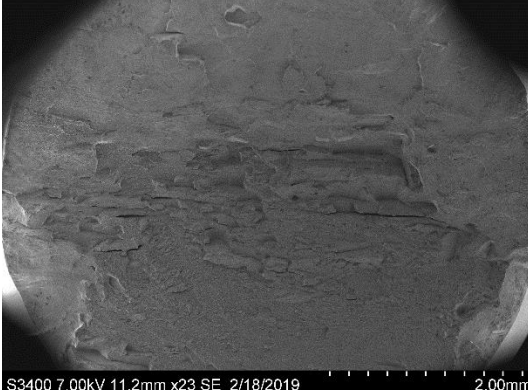
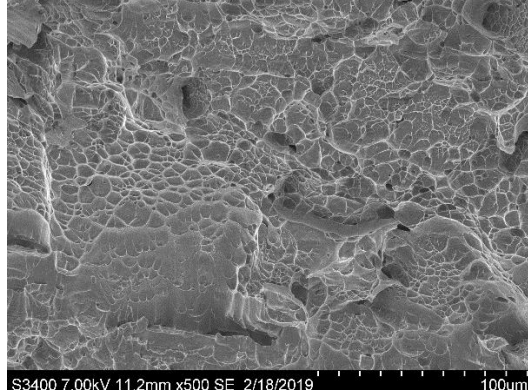
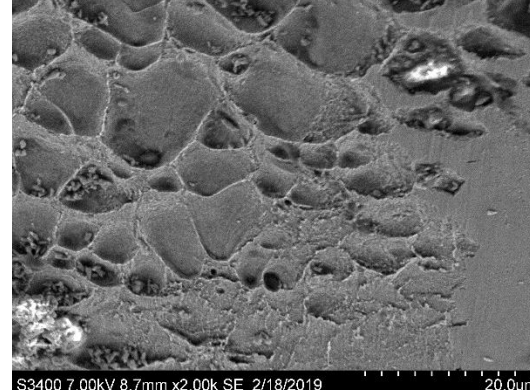
13 т18	Разрыв	60	 <p>S3400 7.00kV 7.9mm x35 SE 1/29/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 11.0mm x2.00k SE 1/30/2019 20.0um</p>	 <p>S3400 7.00kV 8.6mm x5.00k SE 1/29/2019 10.0um</p>
14 т18	Удар	70	 <p>S3400 7.00kV 10.5mm x35 SE 1/28/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 11.1mm x500 SE 1/28/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 11.1mm x2.00k SE 1/28/2019 20.0um</p>
15 т17	Разрыв	70	 <p>S3400 7.00kV 10.6mm x23 SE 1/29/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 9.0mm x500 SE 1/29/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 9.1mm x2.00k SE 1/29/2019 20.0um</p>

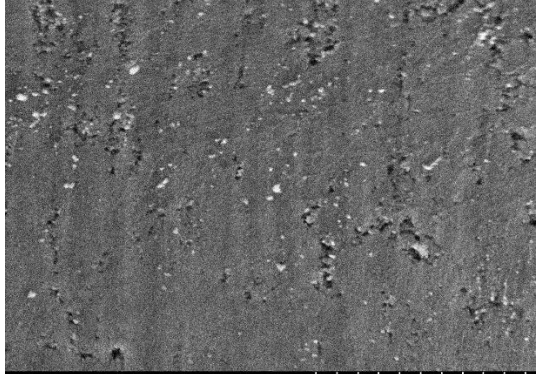
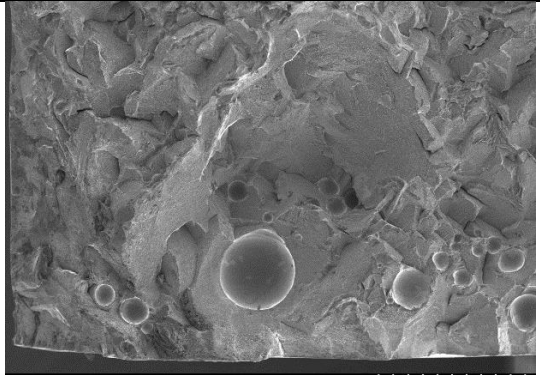
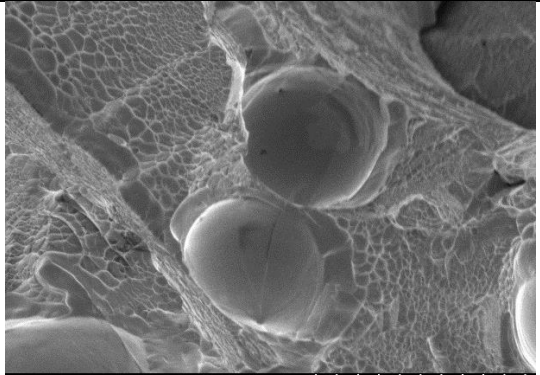
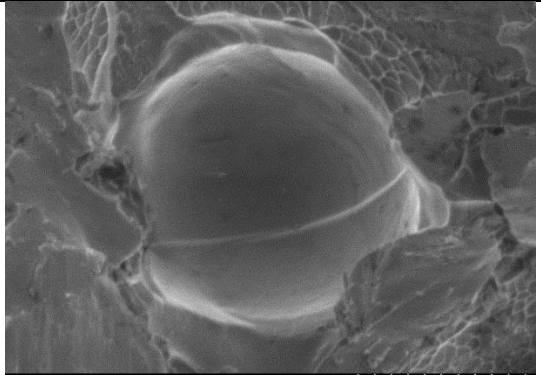


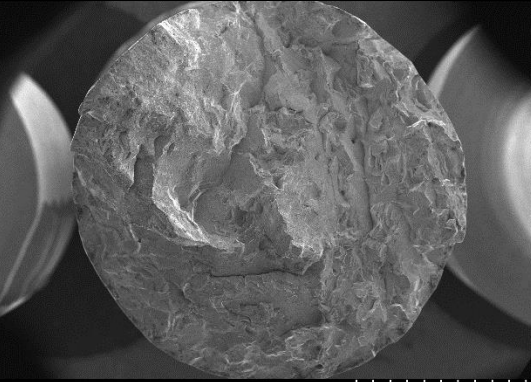
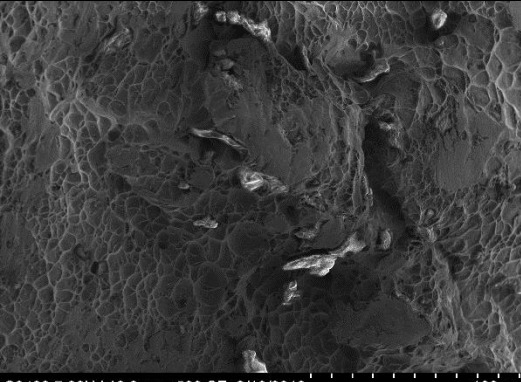
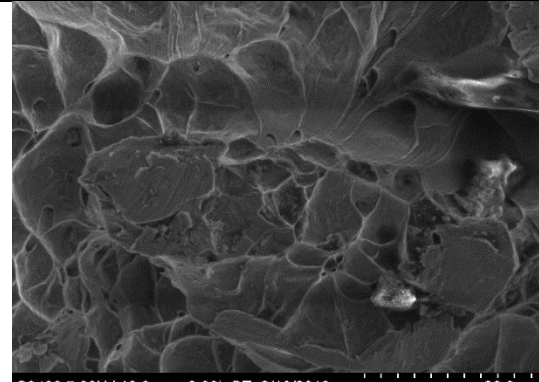
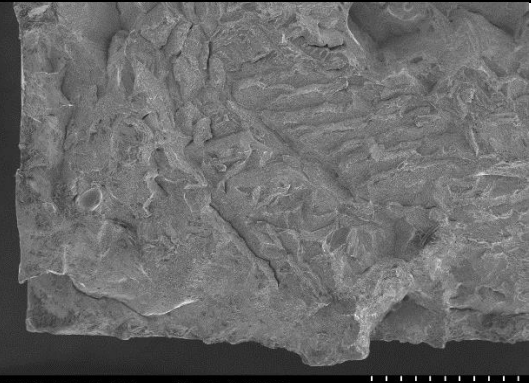
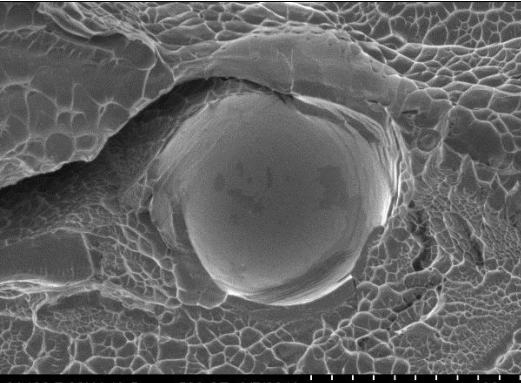
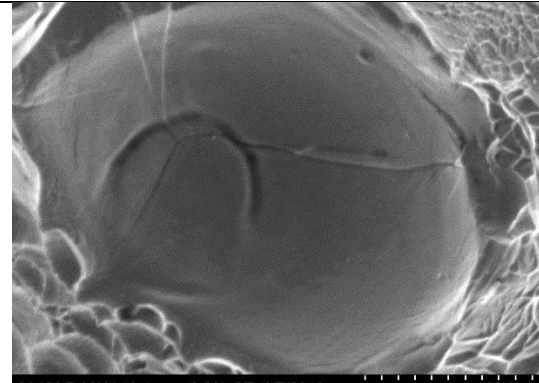
Примечание: т – номер образца согласно таблице 3.1

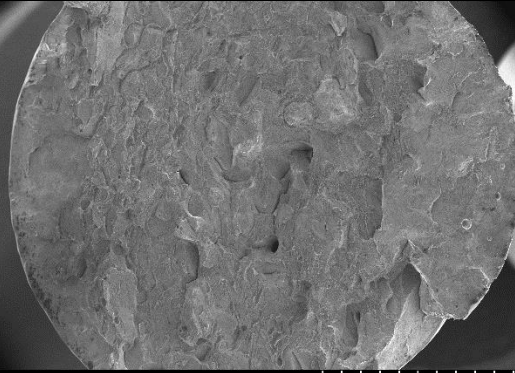
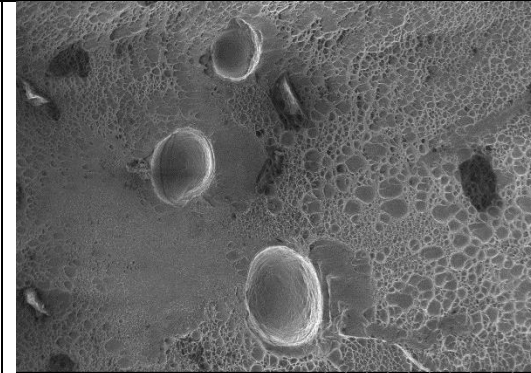
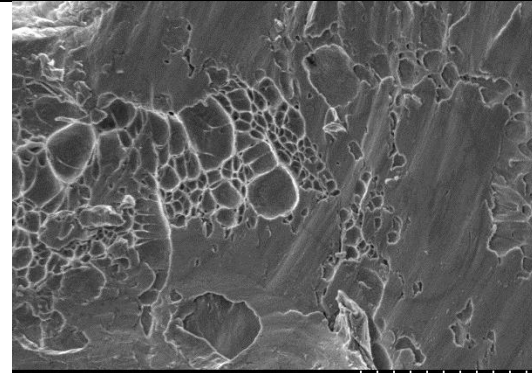
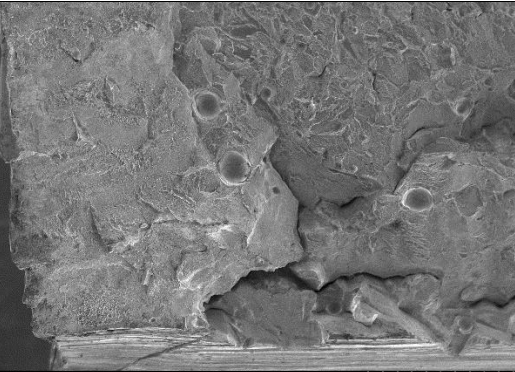
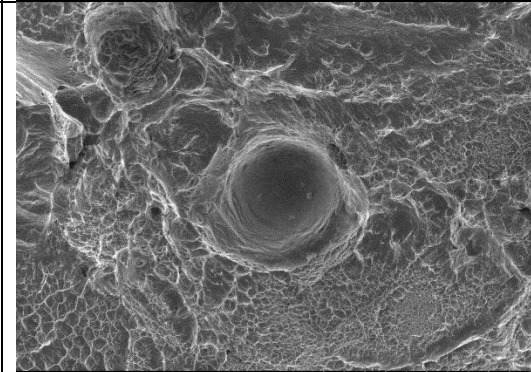
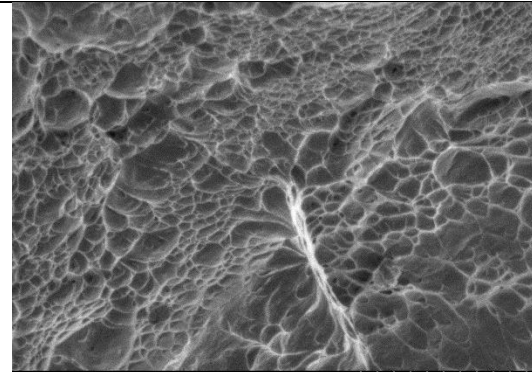
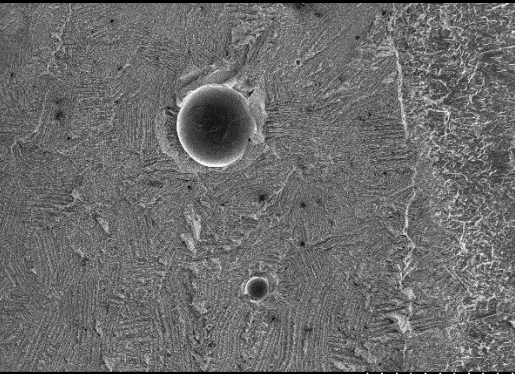
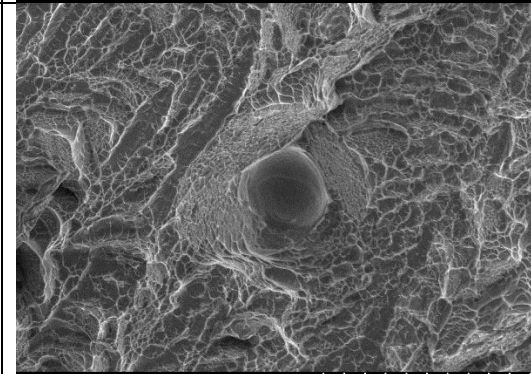
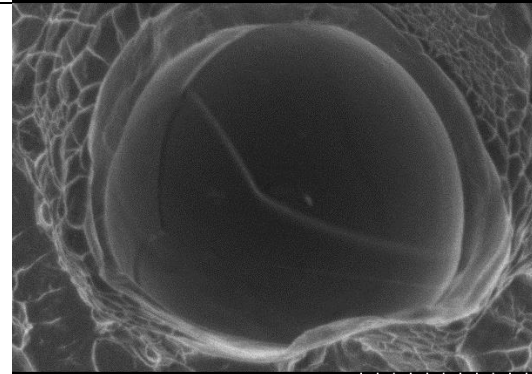
ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)

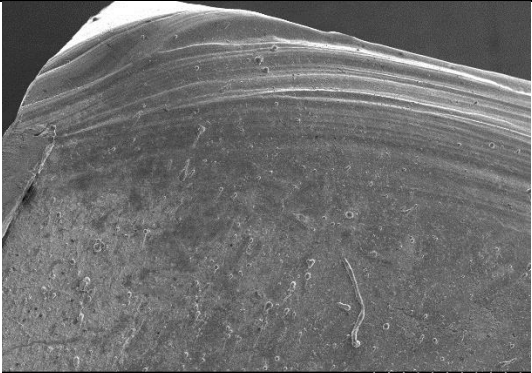
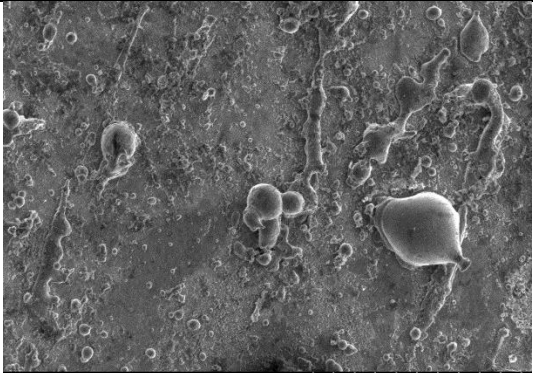
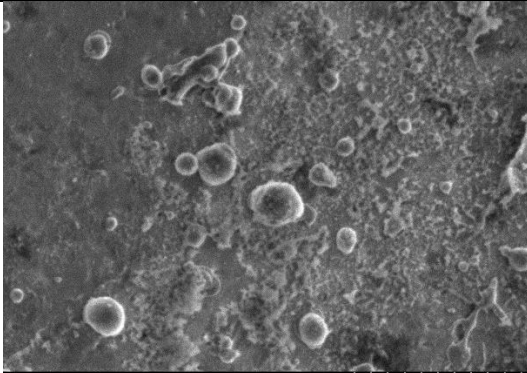
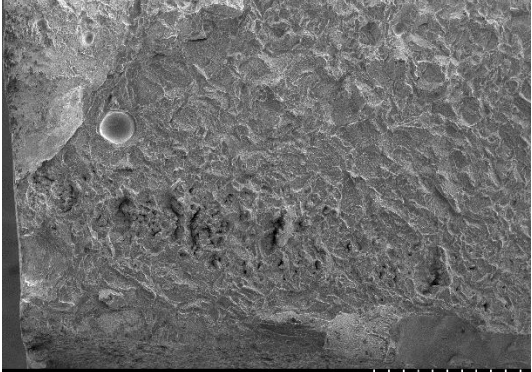
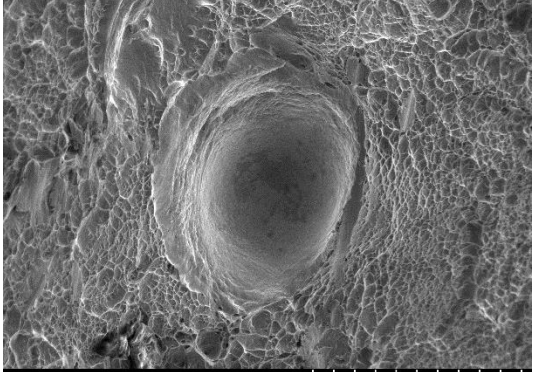
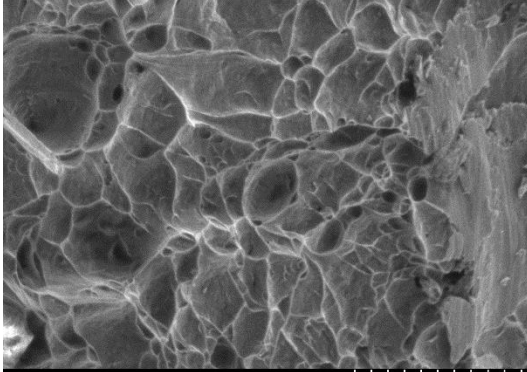
Поверхность разрушения (излома) при испытании на растяжение и ударный изгиб сплава ВТ23, толщиной 60 мм без подготовки стыкуемых кромок на установке 30Е3000 в зависимости от режимов электронно-лучевой сварки и толщины свариваемых темплетов

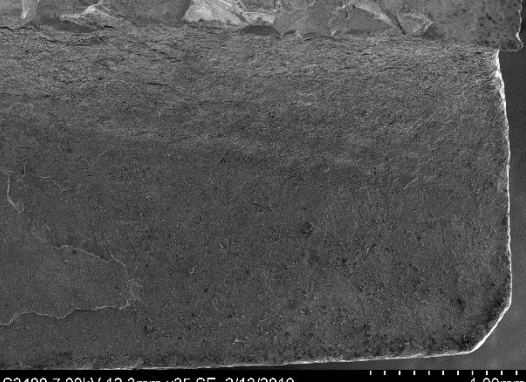
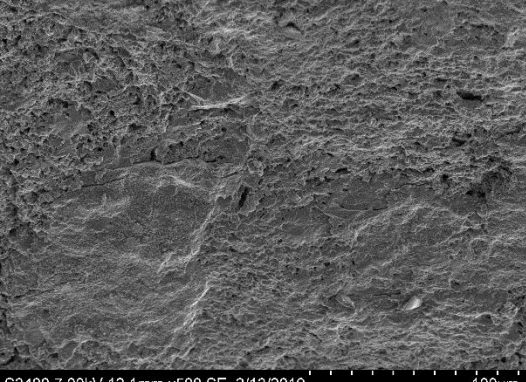
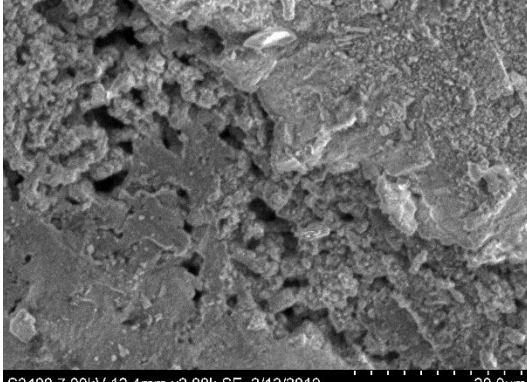
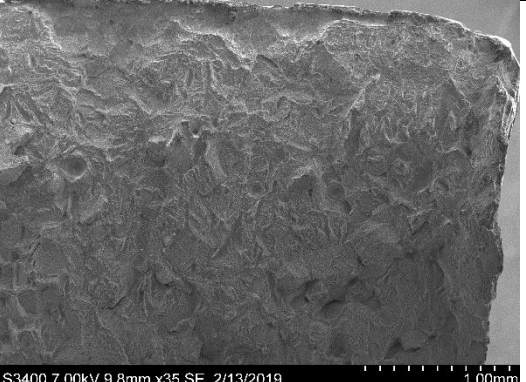
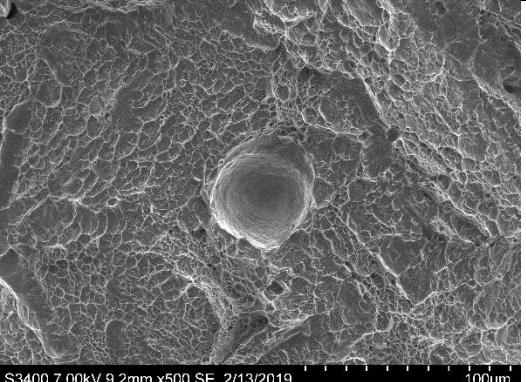
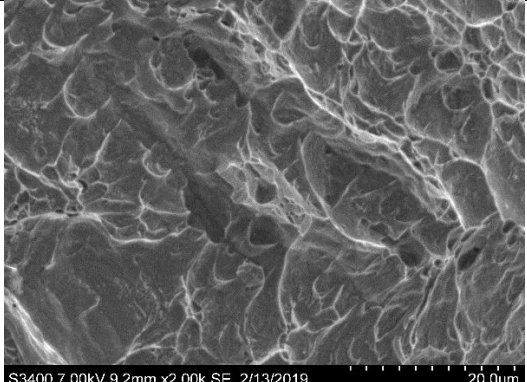
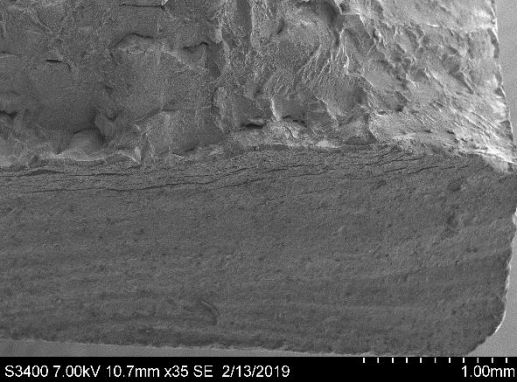

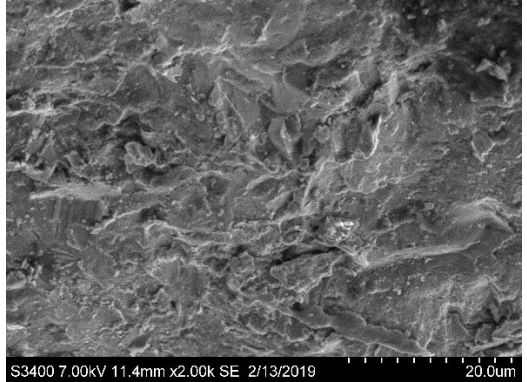
№	Вид испытания	h, мм	Характер излома		
16 Г19	Разрыв	50			

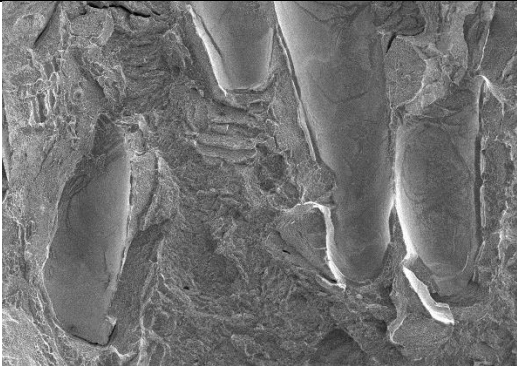
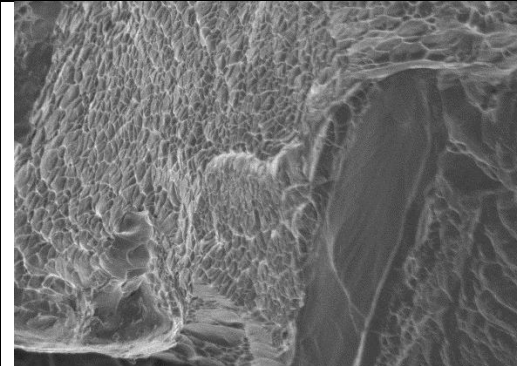
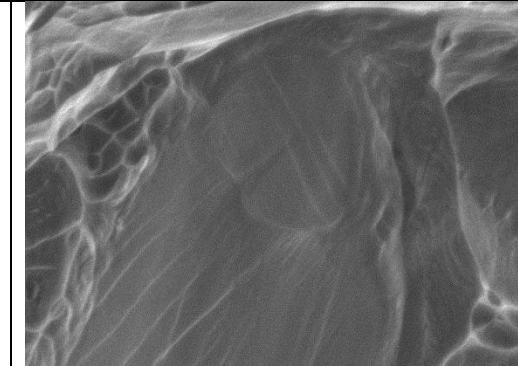
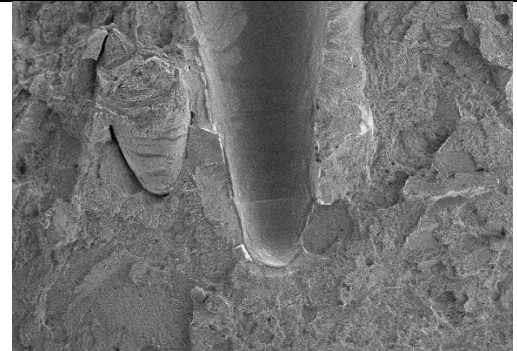
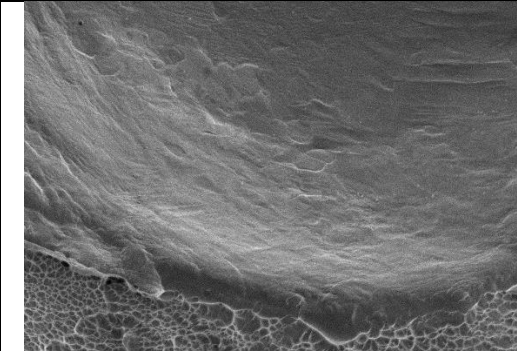
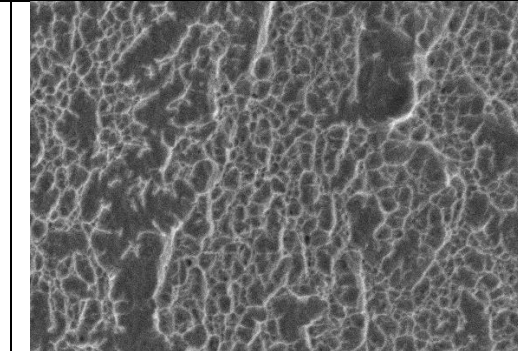
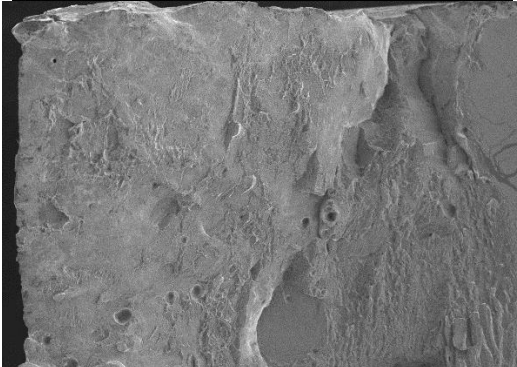
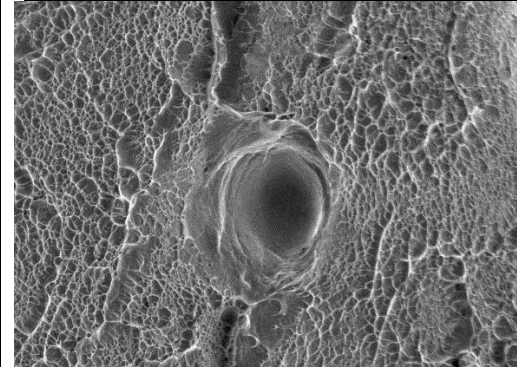
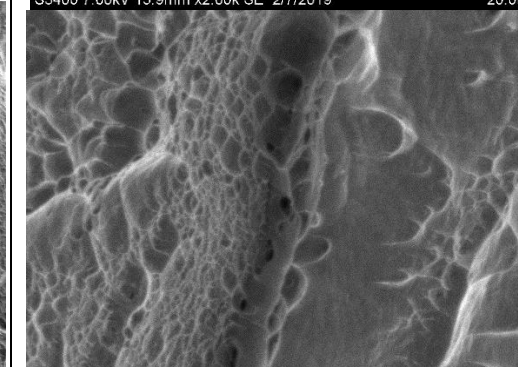
					
17 т20	Разрыв	50			

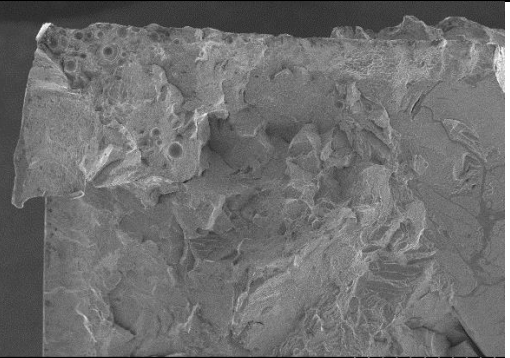
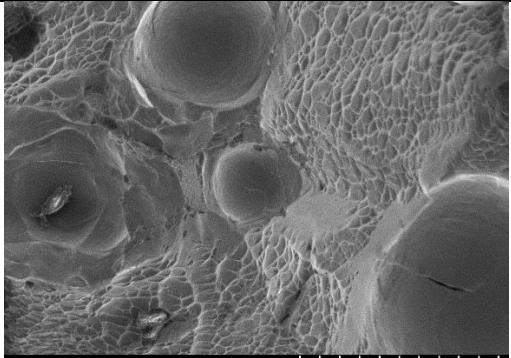
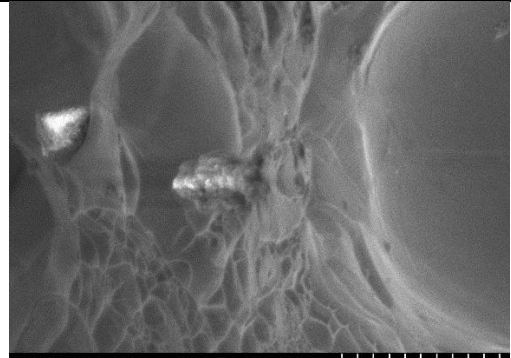
18 T20	Разрыв	50	 <p>S3400 7.00kV 13.9mm x20 SE 2/18/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 13.0mm x500 SE 2/18/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 12.9mm x2.00k SE 2/18/2019 20.0um</p>
19 T20	Удар	50	 <p>S3400 7.00kV 14.3mm x35 SE 2/7/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 13.5mm x500 SE 2/7/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 13.1mm x2.00k SE 2/7/2019 20.0um</p>

20 г21	Разрыв	50	 <p>S3400 7.00kV 13.7mm x23 SE 2/18/2019 2.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 14.6mm x500 SE 2/18/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 12.6mm x2.00k SE 2/18/2019 20.0um</p>
21 г21	Удар	50	 <p>S3400 5.00kV 10.8mm x35 SE 2/15/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 5.00kV 11.4mm x500 SE 2/15/2019 100um</p>	 <p>S3400 5.00kV 11.2mm x2.00k SE 2/15/2019 20.0um</p>
22 г22	Удар	50	 <p>S3400 7.00kV 13.1mm x35 SE 2/8/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 12.9mm x500 SE 2/8/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 13.1mm x2.00k SE 2/8/2019 20.0um</p>

			 <p>S3400 7.00kV 15.3mm x35 SE 2/8/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 14.4mm x500 SE 2/8/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 14.4mm x2.00k SE 2/8/2019 20.0um</p>
23 г22	Удар	50	 <p>S3400 7.00kV 11.2mm x35 SE 2/13/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 10.7mm x500 SE 2/13/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 10.7mm x2.00k SE 2/13/2019 20.0um</p>

					
24 т23	Удар	50			
					

25 т24	Удар	50	 <p>S3400 7.00kV 15.5mm x35 SE 2/7/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 15.6mm x500 SE 2/7/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 16.0mm x2.00k SE 2/7/2019 20.0um</p>
26 т25	Удар	50	 <p>S3400 7.00kV 14.5mm x35 SE 2/7/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 15.3mm x500 SE 2/7/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 15.9mm x2.00k SE 2/7/2019 20.0um</p>
			 <p>S3400 7.00kV 15.2mm x35 SE 2/7/2019 1.00mm</p>	 <p>S3400 7.00kV 14.8mm x500 SE 2/7/2019 100um</p>	 <p>S3400 7.00kV 14.9mm x2.00k SE 2/7/2019 20.0um</p>

27 т26	Удар	50			
Примечание: т – номер образца согласно таблице 3.1					