

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Гаврилов Матвей Сергеевич

**Влияние режимов электронно-лучевой сварки на структурные изменения зоны
термического влияния и свойства сварных титановых конструкций**

Направление подготовки
15.04.01 «Машиностроение»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание академической степени магистра

2020



Работа выполнена на кафедре «Технологии сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель	Муравьев Василий Илларионович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО, г. Комсомольск-на-Амуре
Рецензент	Жилин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «02» июля 2020 года в 12:00 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221.

Автореферат разослан «18» июня 2020 г.

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

А.В. Свиридов

Общая характеристика работы

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. Установление причин Влияние режимов электронно-лучевой сварки на структурные изменения зоны термического влияния и свойства сварных титановых конструкций

Целью работы являлось провести исследование влияние режимов электронно-лучевой сварки и последующей, как традиционной так и ускоренной термической обработок, на структурные изменения зоны термического влияния и свойства сварных титановых конструкций.

В рамках поставленной цели определены следующие задачи:

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

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

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

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

Научная новизна работы заключается в следующем:

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;

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

4 Исследования влияния традиционной и ускоренной термической обработки

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- 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 анализе НТД и литературных источников, планировании и проведении исследований, обработке полученных результатов, составлении технологических рекомендаций.

Публикации. По теме диссертации подготовлены к опубликованию 2 печатные работы в журналах, рекомендованных ВАК и SCOPUS, опубликована статья в сборнике РИНЦ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 98 страниц; 67 рисунков; 27 таблицы; список литературы 40 названий.

Основное содержание работы. Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, описывается научная новизна и практическая значимость результатов работы. Обоснована цель работы и задачи исследований.

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.

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 несплавления, темных полос в интервале стыка от 64 до 112 мм зафиксировано в общем количестве 7 шт.;

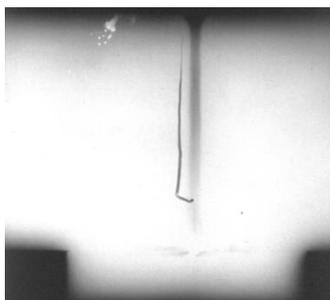
- темные полосы фиксируются на всех участках сварных соединений сплава ВТ20, больше всего их обнаружено в центре (14 шт.), менее в начале (12 шт.) и конце (9 шт.) сварного шва;

В третьей главе проведено радиографическое исследования при помощи рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225 .

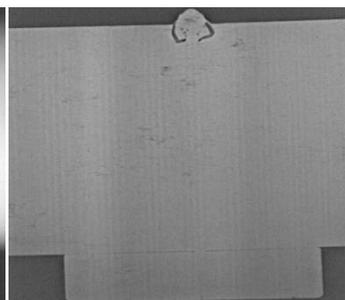
На рентгенограммах обнаружены следующие дефекты: непровар, темные полосы, особенно выраженные в зоне усиления сварного шва, (рисунке 1.1(д)) в виде цепочек пор переходящих в темные полосы, скопление пор (рисунке 1.1 (б, г)) в головной части усиления сварного шва, а также несплавления в головной части (рисунок 1.1 (г)).

На рисунке 1.1 (в, д) выявлен непровар практически на всю толщину сварного шва. Темные полосы выявляются в основном в зоне усиления сварного шва, по толщине наблюдаются цепочки пор в зоне сплавления практически на всей толщине сварного шва. На рисунке 1.1 (г) выявлены несплавления в зоне усиления сварного шва. Крупные поры наблюдаются в усилении сварного шва на рисунке 1.1 (в,г)

а)



б)



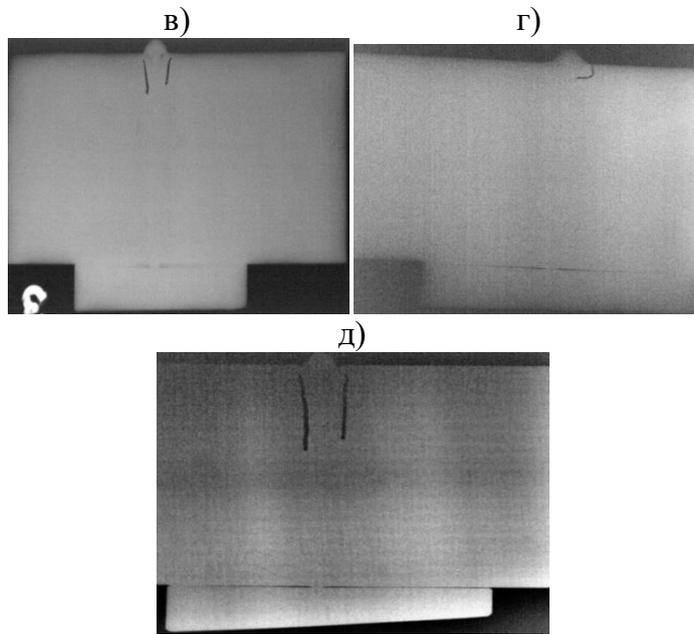


Рисунок 1.1- Рентгенограммы образцов:
 а - образец 1; б - образец 2; в - образец 3; г - образец 4; д - образец 7

Была построена гистограмма распределения дефектов по толщине сварного шва (рисунок 1.2).

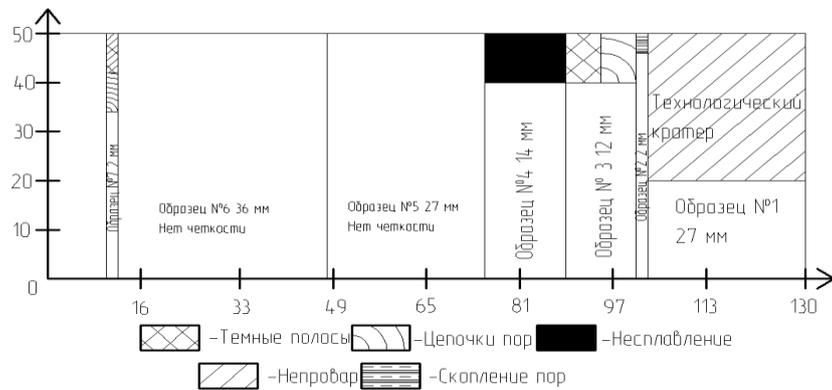


Рисунок 1.2 - Гистограмма распределения дефектов

Образцы подвергались термической обработке. Для ускоренной термической обработки была использована печь сопротивления «Графитарбо» (рисунок 1.3), Для традиционной термической обработки была использована печь муфельная.

а)

б)

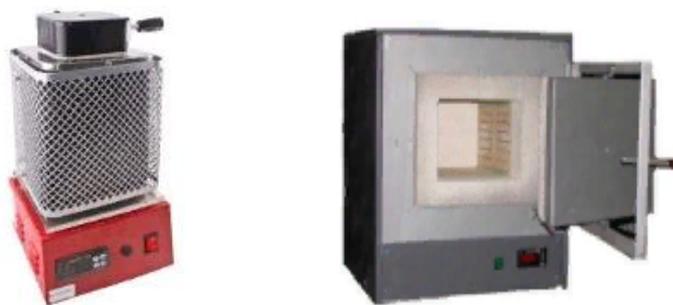


Рисунок 1.3- Печи для термической обработки:
а- печь сопротивления «Graficarbo»; б- печь муфельная

Таблица 1.1 – Влияние режимов ЭЛС и термической обработки на механические свойства сплава ВТ20

Режимы ЭЛС	Режимы термической обработки	№ образца	Механические свойства				
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Отн. удл. σ , %	Отн. суж. Ψ , %	КCV, Дж/см ²
Традиционный	Сварка	1	967	530	8,4	17,3	65
	сварка	2	1002	492	8,44	16,6	50
	ускоренная с выдержкой 60 сек.	3	963	574	6,32	15,77	50
	ускоренная с выдержкой 60 сек.	4	992	506	5,77	11,83	69
	традиционная термическая обработка	5	990	472	4,73	8,84	40
Экспериментальный	традиционная термическая обработка	6	1006	467	8,2	15,07	61
	ускоренная с выдержкой 90 сек.	7	1106	481	14,42	10,89	56
	ускоренная с выдержкой 90 сек.	8	1081	465	10,54	16,2	58
	ускоренная с выдержкой 30 сек.	9	994	501	10,73	12,64	46
	ускоренная с выдержкой 30 сек.	10	984	512	8,8	13,12	56

Таблица 1.2- Результаты измерения микротвердости образцов

Расстояние от	Образец 51	Образец 71	Образец 52	Образец 72	Образец 78	Образец 74	Образец 77	Образец 75	Образец 76
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hv, МПа									
0,25	364	390	371	347	470	368	345	403	403
0,5	364	422	361	358	507	373	348	382	382
0,75	361	426	363	350	486	356	346	377	377
1	318	432	386	347	496	358	366	373	373
1,25	355	410	380	353	461	368	368	368	368
1,5	350	433	367	364	435	362	372	368	368
1,75	353	422	380	350	421	364	360	365	365

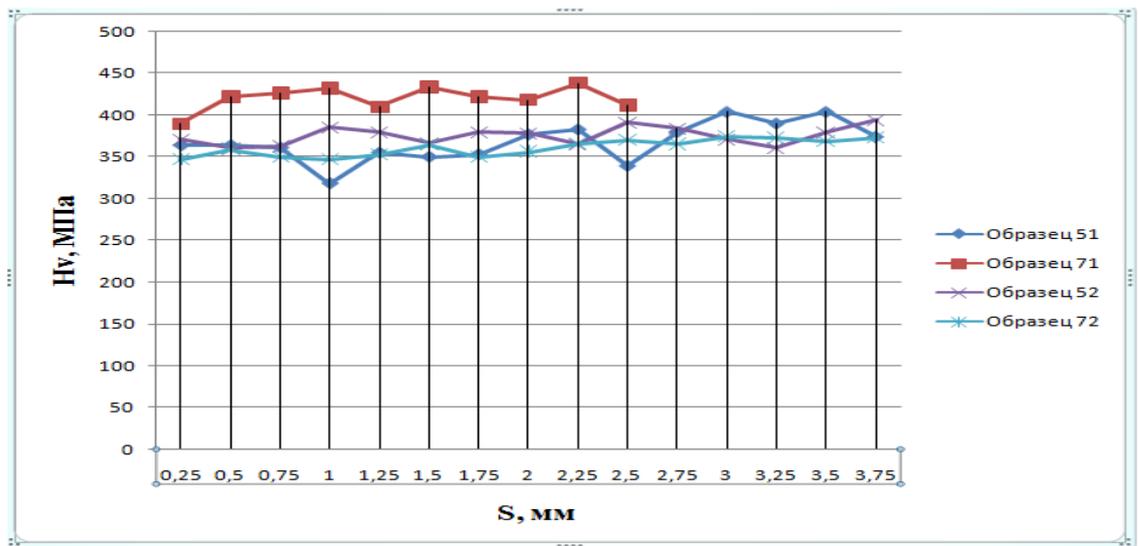
Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,25	383	438	365	366	406	368	362	360	360
2,5	339	412	391	370	403	368	344	360	360
2,75	380		384	365	412	362	336	362	362
3	404		371	374	398	364	338	382	382
3,25	390		361	372	373	360	328	370	370
3,5	404		380	368	368	372	330	372	372
3,75	374		394	373	354	358	326	368	368
H _{ср}	367	420	375	360	425	364	432	348	371

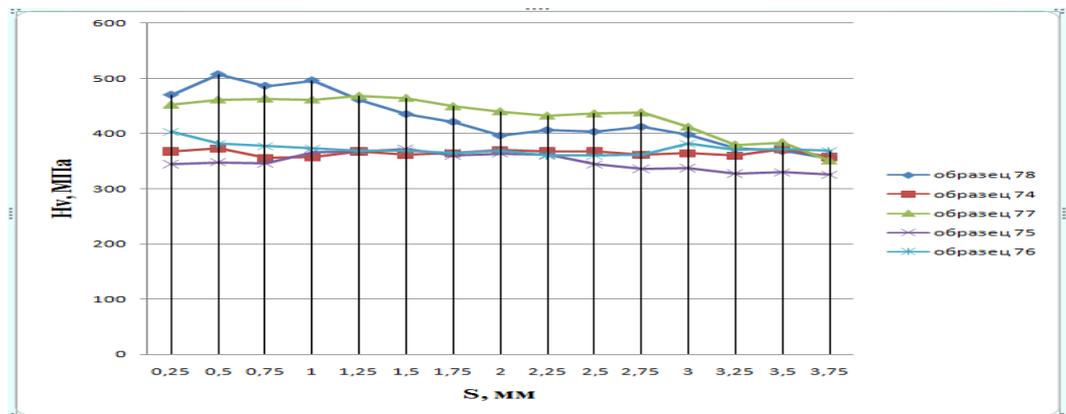
Как видно из данных рисунка 1.4 процессы фазовых превращений неразъемных соединений из сплавов ВТ 20 и ВТ 23, выполненных электронно-лучевой сваркой при скоростном нагреве в температурном интервале фазового превращения заключающегося в коротком промежутке времени (90-120 сек). Характерным, в кинетике фазового превращения является то, что изменение как механических свойств, так и микротвердости наблюдается стадийный характер. Первоначально за счет снятия остаточных сварочных напряжений и упорядочения структурной неоднородности происходит увеличение микротвердости, за тем незначительное снижение практически до значений микротвердости, вызванных традиционной термической обработкой за счет высокоскоростной перекристаллизации.

Необходимо отметить, что после ЭЛС наблюдается значительное повышение микротвердости металла сварного шва, а также зоны термического влияния, и при этом существует значительная разница, которая в процессе высокоскоростной перекристаллизации устраняется полностью (рисунок 1.4).

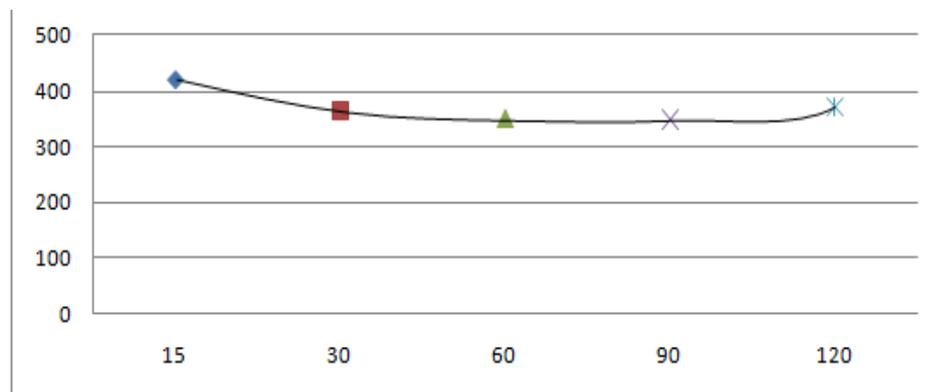
а)



б)



в)



г)

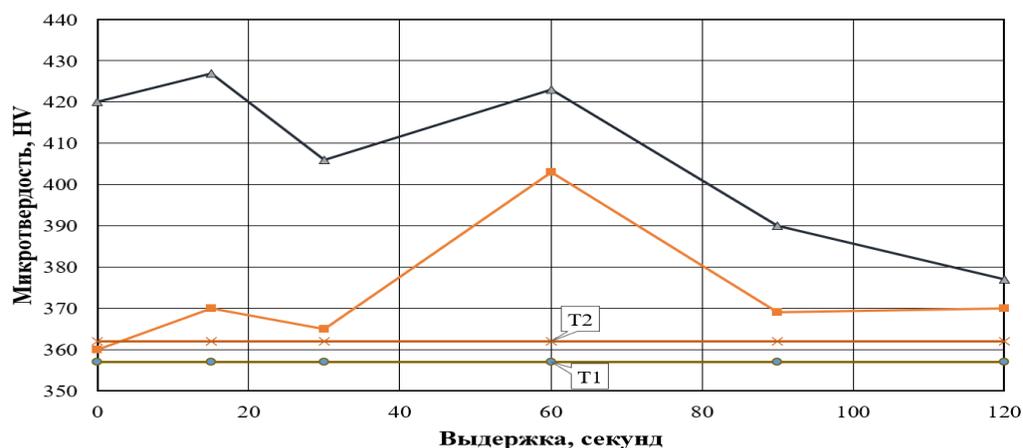


Рисунок 1.4 - Влияние режимов ЭЛС, термообработки на изменение микротвердости сварного соединения образцов из сплава ВТ 23 после: а - после сварки и традиционной термической обработки темплетов толщинами 50 (Т50) и 60 (Т60) мм; б - после ускоренной термической обработки 980⁰С 15-120 сек, в - кинетика изменения микротвердости сварного шва образцов из сплава ВТ23, г- кинетика изменения микротвердости сварного шва образцов из сплава ВТ 20: Кинетика изменения микротвердости сварного шва образцов из сплава ВТ20 в зависимости от режимов ЭЛС и термообработки: Т1 – термическая обработка по режиму 650⁰С, 2 часа воздушная электропечь; Т2 - 750⁰С, 30 минут в вакуумной печи

▲ - микротвёрдость металла шва; ■ - микротвердость металла околошовной зоны

В четвертой главе провели исследование распределение водорода по сварному шву и зоне термического влияния производилось на трехпризменном спектрографе ИСП-51. Установлено, что распределение водорода по сечению сварного шва имеет сложный характер, максимальные значения наблюдаются в центре (кристаллизация сварного шва), и в зоне термического влияния (зоне сплавления), что свидетельствует о преимущественно неравномерном распределении связанным как близ границе сплавления так и в конечном процессе кристаллизации (рисунок 1.5,1.6).

а)



б)



в)

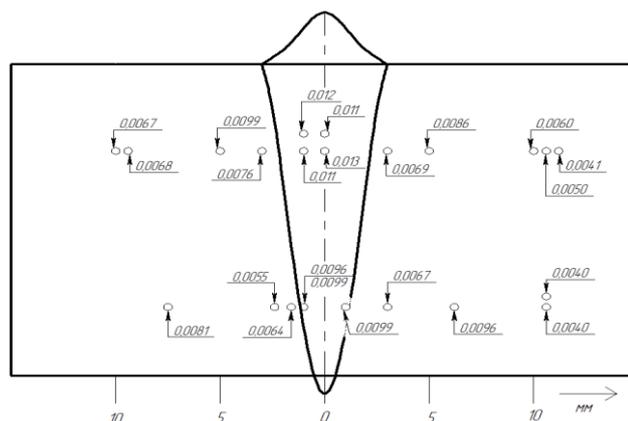


Рисунок 1.5 – Места точечного замера содержания водорода по сварному шву, зоне термического влияния и в основном металле

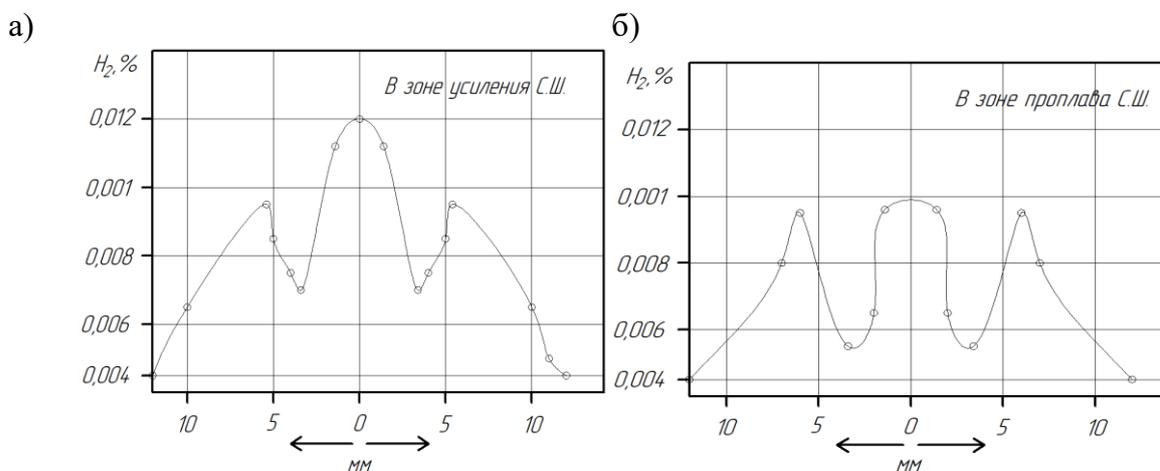


Рисунок 1.6 – Графики распределения содержания водорода по сварному шву, зоне термического влияния и в основном металле:

а – зона усиления; б – зона проплава

В пятой главе 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 1.7). Стоит отметить расположение пор в усилении сварного шва при исправлении дефекта вогнутости усиления электронным лучом.

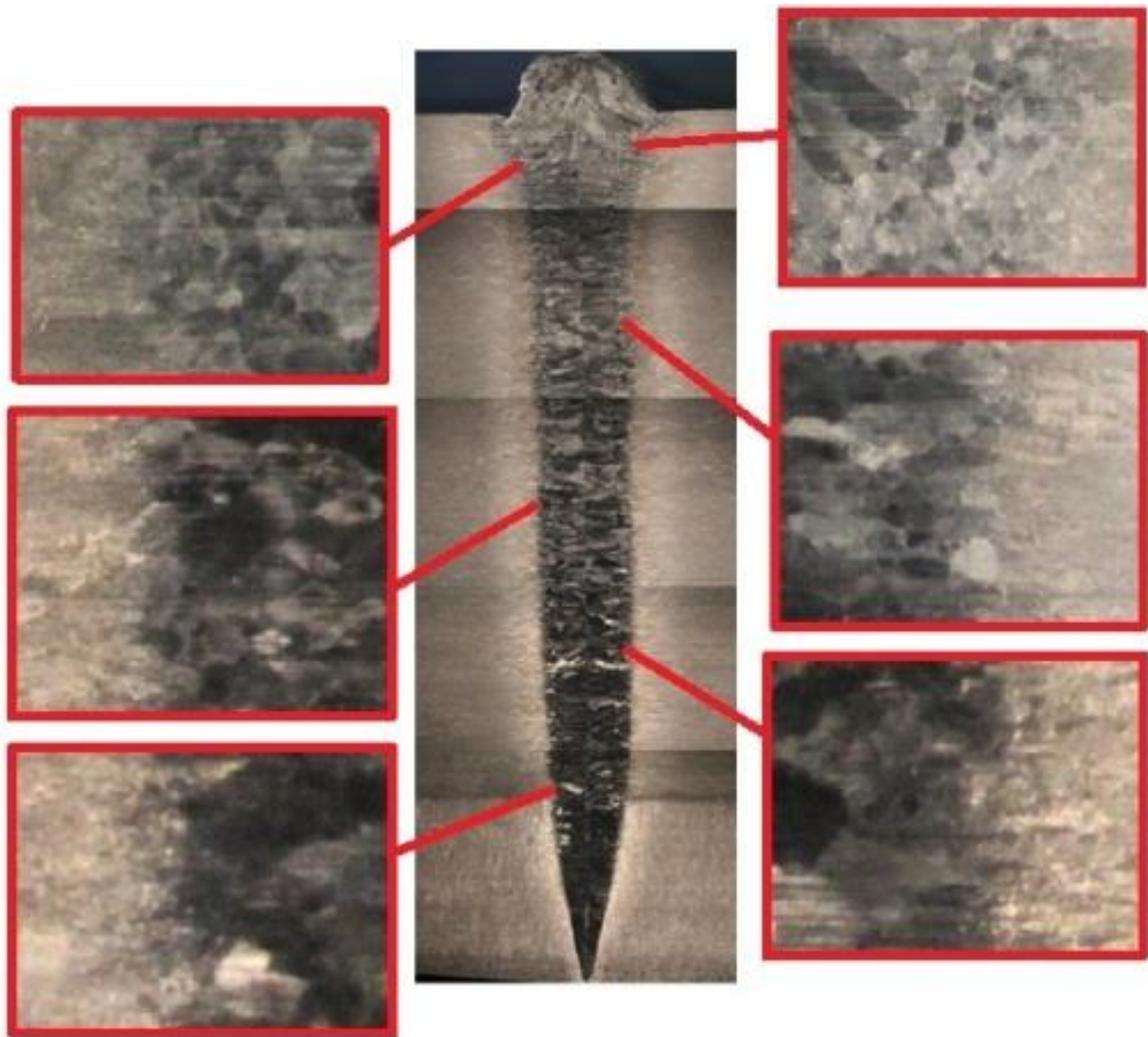


Рисунок 1.7– Макроструктура образца 5 с распределением пор по зонам сплавления

Исследованиями оптической микроскопии установлено, что поры в основном образуются по границам зерен в зоне сплавления сварного шва (рисунок 1.8). 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 1.8, д), свидетельствующая о том, что высокая скорость сварки и особенности формирования парогазового канала не обеспечили выход зародышей пор из расплава сварочной ванны.

Исследованиями электронной микроскопии установлено наличие мелких пор, достигающих в диаметре до 3 микрон, расположенных по линии сплавления по направлению к проплаву сварного шва (рисунок 1.8.в г).

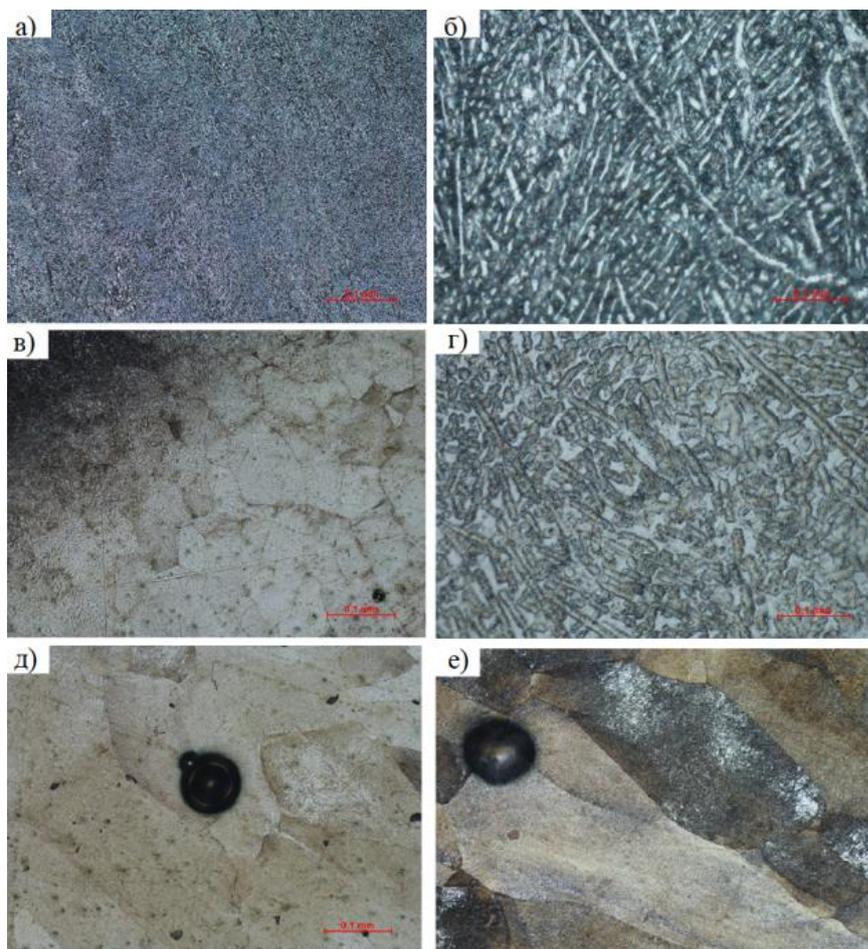


Рисунок 1.8 – Микроструктура зон:
 а, б – основного металла; в, г – сварного шва; д, е – поры, расположенные по
 линии сплавления

Общие выводы

Процессы фазовых превращений неразъемных соединений из сплавов ВТ 20 и ВТ 23, выполненных электронно-лучевой сваркой при скоростном нагреве в температурном интервале фазового превращения заключающегося в коротком промежутке времени (90-120 сек). Характерным, в кинетике фазового превращения является то, что изменение как механических свойств, так и микротвердости наблюдается стадийный характер. Первоначально за счет снятия остаточных сварочных напряжений и упорядочения структурной неоднородности происходит увеличение микротвердости, за тем незначительное снижение практически до значений микротвердости, вызванных традиционной термической обработкой за счет высокоскоростной перекристаллизации. Необходимо отметить, что после ЭЛС наблюдается значительное повышения микротвердости металла сварного шва, а также зоны термического влияния, и при этом существует значительная разница, которая в процессе высокоскоростной перекристаллизации устраняется полностью.

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 кремне содержащих 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.

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.

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.

Публикации

1 Гаврилов, М.С., Влияние условий образования зоны сплавления на структурные изменения и свойства сварных соединений из титановых сплавов (выполненных электронно-лучевой сваркой) /М.С. Гаврилов, В.В. Григорьев, В.И. Муравьев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению материалы международной научно-практической конференции, г. Комсомольск-на-Амуре, 5-6 сентября 2018 г. / редкол.: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 58 – 64.

2 Гаврилов, М.С. Исследование образования темных полос при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) титанового сплава VT23 на ЭЛУ 30E3000 / М.С. Гаврилов, В.В. Григорьев // материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 9 - 20 апреля 2018 г. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С 32 – 35.