

УДК 621.791

А.В. Свиридов¹, М.С. Грибков¹

ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6ч.

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-34-43

Разработана технология ремонта электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) конструкций больших толщин из титанового сплава VT6ч. Проведен комплекс металлографических исследований сварных образцов. Испытания по определению механических характеристик ремонтных сварных соединений показали, что данные соединения, выполненные ЭЛС, являются равнопрочными основному материалу. Проведен анализ уровня остаточных напряжений в различных частях сварного соединения после повторных ремонтных проходов. Установлено, что проведение последующего вакуумного отжига снижает уровень остаточных напряжений в сварных соединениях до 50 %. Анализ элементного состава показал, что элементный состав образцов от центра сварного шва до основного металла практически не изменяется для сварки с количеством повторных проходов до 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, параметры режимов сварки, структура, механические свойства, ремонт сварных соединений, термическая обработка.

A.V. Sviridov¹, M.S. Gribkov¹

FEATURES OF REPAIR OF WELDED STRUCTURES OF LARGE THICKNESSES FROM TITANIUM ALLOY VT6ch.

The technology of electron-beam welding (EBW) of structures of large thickness made of titanium alloy Ti-6Al-4V has been developed. A complex of metallographic studies of welded samples has been carried out. Tests to determine the mechanical characteristics of repair welded joints, that these joints made by EBW are equal in strength to the base material. The analysis of the level of residual stresses in various parts of the welded joint after repeated repair passes has been carried out. It was found that the subsequent vacuum annealing reduces the level of residual stresses in welded joints to 50 %. The analysis of the elemental composition showed that the elemental composition of the samples from the center of the weld to the base metal practically does not change for welding with the number of repeated passes up to 3.

Keywords: electron beam welding, welding parameters, structure, mechanical properties, repair of welded joints, heat treatment.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Экономного расходования металлов можно добиться благодаря рациональному проектированию сварных конструкций, внедрению новых конструкционных материалов и использованию современной сварочной техники [1–3]. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) относится к прогрессивным технологическим процессам, обеспечивающим высокий уровень комплексной механизации и автоматизации, а также экономное расходование энергии, материалов и затрат человеческого труда [4–7].

Перспективность использования ЭЛС при изготовлении конструкций из титановых сплавов обусловлена высокой производительностью процесса, позволяющей осуществлять за один проход проплавление материалов толщиной >200 мм [8–10], и, кроме того, надежной защитой зоны расплавленного и нагретого активного металла от взаимодействия с газами атмосферы, резко снижающего качество соединения.

Однако, несмотря на все преимущества ЭЛС, при данном способе могут возникать такие же дефекты формирования шва, как и при других методах сварки плавлением (непровары, подрезы, провисание шва, повышенное разбрызгивание и др.), а также специфические дефекты (корневые, протяженные полости в объеме шва, срединные трещины) [11].

Свойства сварного соединения титана и его сплавов определяются химическим и фазовым составом всех участков соединения, фазовыми и структурными превращениями в металле шва, наличием и величиной остаточных напряжений в околошовной зоне, влиянием поглощенных газов на свойства металла и его пористостью.

Термическая обработка (ТО) сварного соединения существенно влияет на перечисленные ранее факторы и может в той или иной степени уменьшить их отрицательное действие.

При ЭЛС длинномерных конструкций на токах луча >400 мА и продолжительности непрерывной сварки >5 мин дефекты типа непроваров могут возникать в результате снижения эмиссионных свойств катода из гексаборида лантана, а дефекты в виде протяженных полостей или раковин – ввиду выбора неоптимальных режимов ЭЛС или в результате высоковольтных пробоев.

Большая часть поверхностных дефектов, возникающих при ЭЛС, может быть устранена дуговыми способами сварки. Внутренние дефекты шва исправляют выборкой дефектного места механическими способами и последующей их дуговой подваркой с присадочным материалом. Однако в ряде случаев возникшие дефекты целесообразно устранять с помощью электронного пучка [12–17]. Поверхностные дефекты можно исправлять повторными «косметическими» проходами, которые осуществляют на минимально необходимую величину проплавления на мягких режимах с недофокусировкой или перефокусировкой (рис. 1).

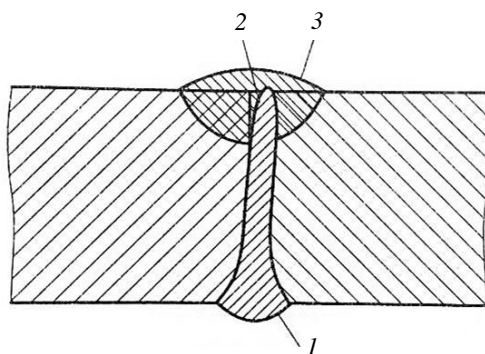


Рис. 1. Заварка поверхностного дефекта: 1 – основной проход; 2 – непровар; 3 – подварочный проход

Часть внутренних дефектов исправляют повторным проходом на рабочем режиме. Для этого линию стыка определяют, ориентируясь на контрольные риски 2 (рис. 2) или какие-то базы на самой детали. При этом если дефект 1 широкий, то выполняют два параллельных прохода на расстоянии 1–2 мм. В противном случае луч может пройти, не оплавив ни одну из стенок, и дефект останется незаплавленным.

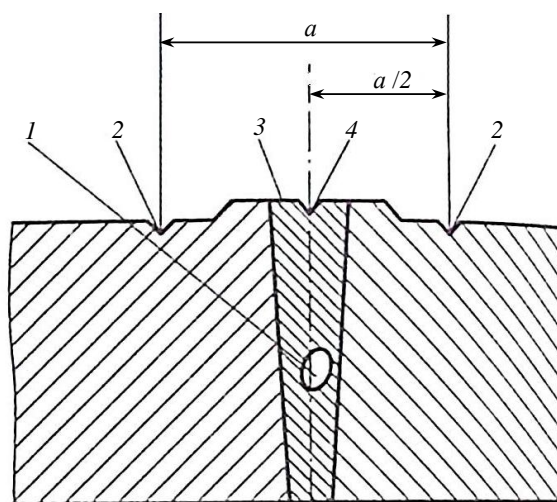


Рис. 2. Схема разметки центра шва по контрольным рискам: 1 – дефект шва; 2 – контрольные риски; 3 – технологический припуск; 4 – риска разметки центра шва (a – расстояние между крайними рисками)

Можно переплавлять не всю длину шва (если дефект точечный), а лишь небольшой участок. При небольшой глубине залегания дефекта заварку осуществляют с расфокусировкой в большой степени, исключающей образование корневой пилы (рис. 3).

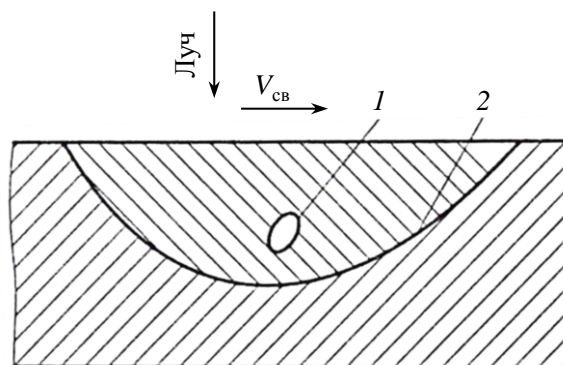


Рис. 3. Заварка точечных дефектов, залегающих на небольшой глубине: 1 – дефект; 2 – подварочный проход

При большой глубине залегания дефектов повторный проход выполняют на полной мощности с установкой технологических подкладок для выведения корневых дефектов. Ввод осуществляют либо при неподвижном луче, либо при малой скорости сварки с плавным переходом на рабочую скорость. Аналогичным образом поступают и по окончании работы: сначала необходимо остановить движение или снизить скорость сварки, а затем уменьшать мощность пучка. В место окончания подварки можно ввести дополнительный материал в виде накладке 4 (рис. 4), а после окончания подварки расплавить его для заполнения кратера.

Для того чтобы исключить появление корневых дефектов, также можно использовать технологические развертки для скругления корневой части шва или применять ЭЛС со сквозным формированием [18–23]. Для обеспечения закругления в корневой части шва применяют круговую развертку и подбирают необходимую фокусировку луча. Использование развертки уменьшает скорость охлаждения и снижает вероятность образования пустот и несплавлений в корне шва. Однако

применение развертки не всегда дает положительный результат, поэтому в качестве дополнительной меры необходимо выбирать ее оптимальную частоту, при которой центробежные силы, возникающие при движениях расплава по круговой траектории, будут противодействовать капиллярным силам. Следует также отметить, что использование развертки приводит к увеличению ширины шва, что не всегда является рациональным фактором. Поэтому важно решить вопрос о минимальном радиусе закругления, при котором не возникают пустоты и несплавления.

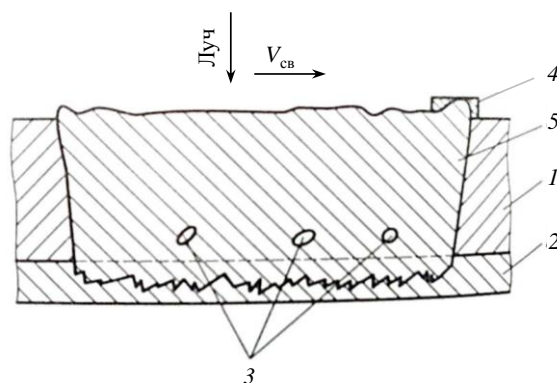


Рис. 4. Устранение дефектов путем повторной переварки шва на всю глубину: 1 – деталь; 2 – технологическая подкладка; 3 – дефекты; 4 – накладка на место окончания подварки; 5 – подварочный проход

Материалы и методы

Электронно-лучевую сварку осуществляли на установке АЭЛТК-11-486. Для проведения испытаний изготовили сварные образцы.

Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик (σ_b^{20}) сварных соединений соответствуют ГОСТ 6996–66.

Испытания на малоцикловую усталость образцов сварных соединений осуществляли в соответствии с ГОСТ 25.502–79.

Определение локального химического состава материала проводили методами качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA10 (фирма Carl Zeiss, Германия), оснащённом энергодисперсионным спектрометром X-Max.

Исследование микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51 и сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU 8010 в соответствии с методикой ММ 1.595-17-181–2003.

Оценку макроструктуры проводили без применения увеличительных приборов по ГОСТ 5639–82.

Проведение неразрушающего контроля сварных соединений методом цветной дефектоскопии (капиллярный контроль) поверхности сварных соединений вала ротора турбокомпрессора осуществляли набором дефектоскопических материалов SHERWIN (Франция) с II классом чувствительности, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 1–2 мкм (в соответствии с ГОСТ 18442–80).

Ультразвуковой контроль проводили с использованием дефектоскопа A1550 IntroVisor в режиме «Томограф» с использованием многоэлементных преобразователей.

Определение уровня остаточных напряжений в материале сварных образцов после сварки выполняли на рентгеновском дифрактометре фирмы Bruker (Германия) с использованием метода « $\sin^2\psi$ ».

Результаты и обсуждение

Поскольку при ЭЛС большую часть внутренних дефектов исправляют повторным проходом, в данной работе исследовано влияние повторных проходов на структуру и механические свойства титанового сплава.

Эксперименты проводили на плитах (рис. 5) из титанового сплава ВТ6ч. толщиной 82 мм.

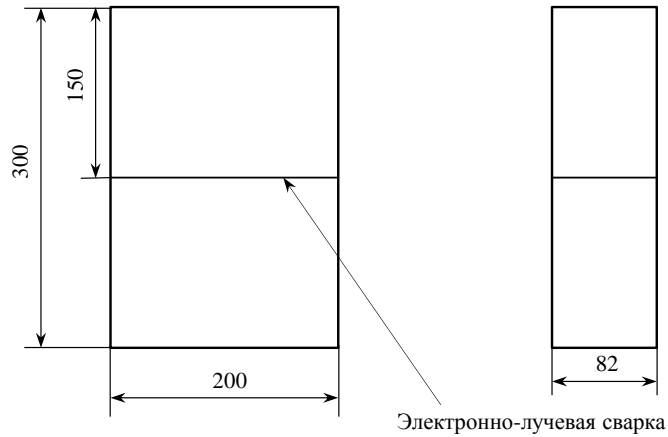


Рис. 5. Эскиз образца под сварку, выполненного из титанового сплава ВТ6ч., толщиной 82 мм

Сварку осуществляли горизонтальным лучом с охлаждением после каждого прохода. Количество повторных проходов: 2, 3, 4, 5. Режим сварки: скорость сварки $V_{св} = 25$ м/ч, ток сварки $I_{л} = 520$ мА, ток фокуса $I_{ф} = 718$ мА, рабочее расстояние $L = 200$ мм.

Результаты неразрушающего контроля (рентгенографического, ультразвукового, капиллярного) сварных образцов показали, что дефектов не обнаружено.

На рис. 6 представлены макроструктуры сварных соединений, выполненных ЭЛС горизонтальным электронным лучом с повторными проходами, при толщине образца сплава 82 мм.

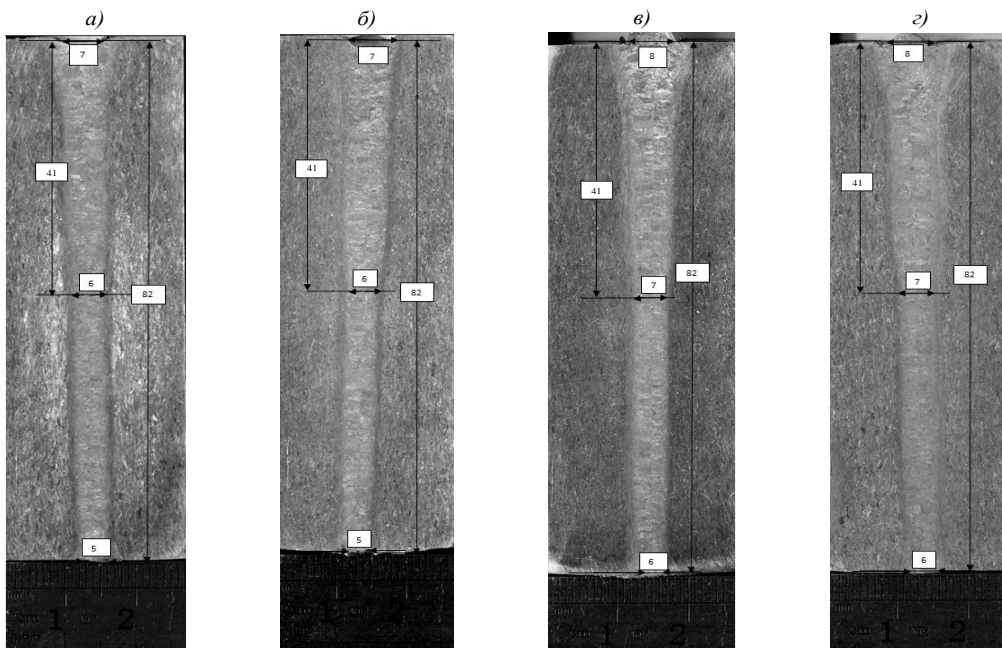


Рис. 6. Макроструктуры сварных соединений, выполненных ЭЛС горизонтальным электронным лучом с количеством повторных проходов 2 (а), 3 (б), 4 (в) и 5 (г)

На основании анализа размеров литой зоны сварных соединений, выполненных ЭЛС горизонтальным лучом с повторными проходами, установлено, что геометрические параметры сварных швов несколько увеличиваются при повторных проходах. При сварке горизонтальным лучом с гарантированным проплавлением сварные швы имеют почти параллельные стенки с небольшим усилением в вершине.

Микроструктура сварных соединений, выполненных горизонтальным электронным лучом до и после ТО образцов из сплава толщиной 82 мм с 5 повторными проходами, приведена на рис. 7. Аналогичные микроструктуры наблюдаются у сварных соединений с 2, 3 и 4 повторными проходами.

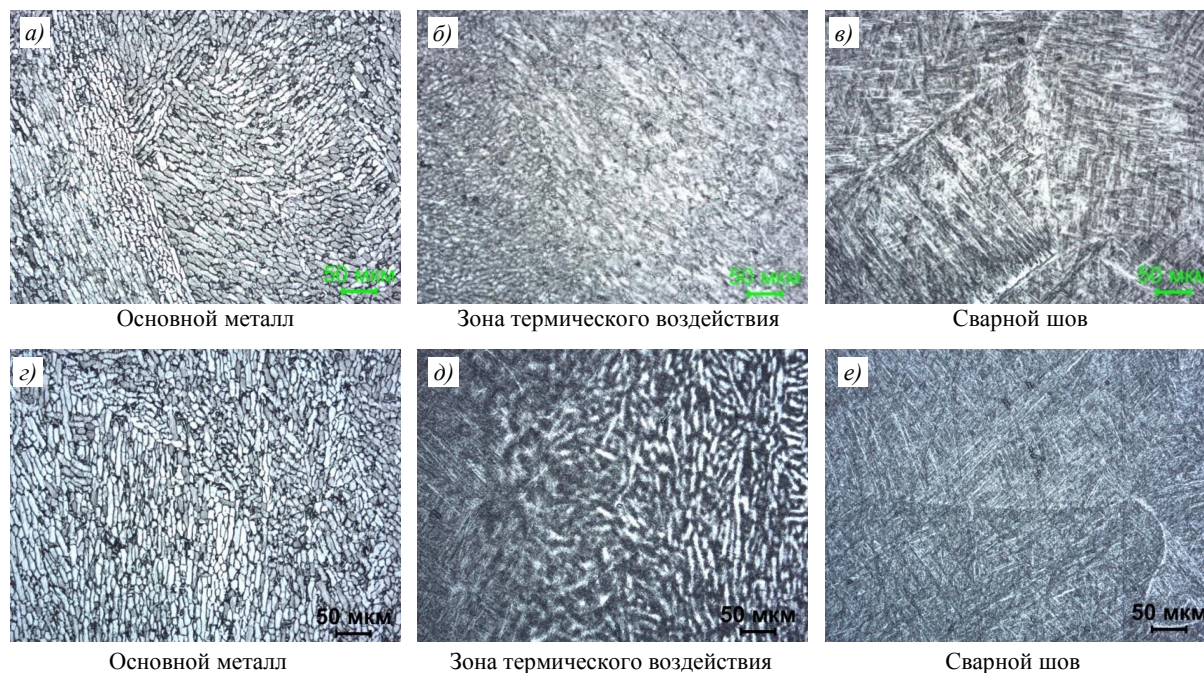


Рис. 7. Микроструктуры сварных соединений, выполненных ЭЛС горизонтальным электронным лучом с 5 повторными проходами до (а–в) и после термической обработки образцов (z–e)

Микроструктура основного металла сварных образцов из титанового сплава ВТ6ч. соответствует типу 3–4 по 9-типной шкале согласно инструкции ПИ 1.2.785. Структура основного материала представлена округлыми частицами α -зерен, имеющими размер 5–50 мкм. Пластинчатых выделений вторичной α -фазы не наблюдается. Таким образом, структура основного металла преимущественно глобулярная. Микроструктура металла сварного шва типична для сварных соединений ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов, полученных ЭЛС, имеет пластинчатый равномерный характер, представлена длинными тонкими пластинами α -фазы, расположенными внутри крупных зерен закристаллизовавшейся β -фазы. Дефектов сварного шва (трещин, пор) на микрошлифах не обнаружено.

Исследование механических свойств сварных соединений с повторными проходами проводили путем испытаний пропорциональных плоских образцов, выполненных в соответствии с чертежом, представленным на рис. 8. Образцы вырезали по всей толщине сварного образца.

При испытаниях на МЦУ циклическое нагружение осуществляли в «мягком» режиме по схеме повторного растяжения по синусоидальному закону, частота циклов составляла 3–5 Гц, коэффициент асимметрии цикла напряжений 0,01. Максимальную нагрузку в цикле при испытаниях образцов, изготовленных на пробных режимах

сварки, задавали из расчета получения значения брутто-напряжения 420 МПа. Образцы с наработкой без разрушения 200000 циклов испытывали до разрушения при значении брутто-напряжения 588 МПа на резонансной частоте.

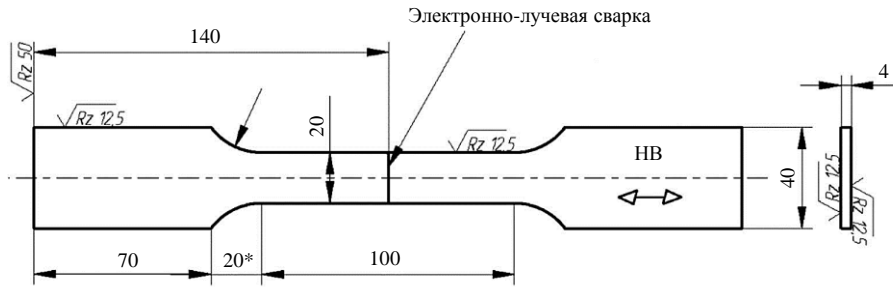


Рис. 8. Чертеж образца для испытаний на растяжение и малоцикловую усталость, вырезанного из темплетов толщиной 82 мм, с повторными проходами

Анализ результатов испытаний показал, что предел прочности сварных образцов, изготовленных на всех режимах сварки, составляет 1,0 от предела прочности основного металла.

Установлено, что циклическая долговечность до разрушения сварных образцов с 2, 3, 4 и 5 повторными проходами составляет более 200000 циклов при максимальном значении брутто-напряжения 420 МПа. Разрушение образцов происходило, как правило, по основному металлу, однако некоторые образцы с 4 и 5 повторными проходами разрушены по сварному шву при значении брутто-напряжения 588 МПа.

Проведен также анализ величины и распределения остаточных напряжений I рода (макронапряжений) по сечению сварных швов, выполненных ЭЛС горизонтальным лучом с суммарным количеством повторных проходов от 2 до 5 на темплатах-макрошлифах из плиты из титанового сплава ВТ6ч. толщиной 82 мм. Для оценки эффективности снижения остаточных напряжений посредством выбранного режима ТО съемку осуществляли до и после ее проведения. Напряжения анализировали в трех областях каждого образца – в центре сварного шва, в зоне термического влияния (ЗТВ) (на расстоянии 3–5 мм от центра шва) и в основном металле (на расстоянии >10 мм от центра шва).

По результатам исследований построены эпюры распределения остаточных макронапряжений в поперечном сечении шва в зависимости от расстояния от его центра (рис. 9).

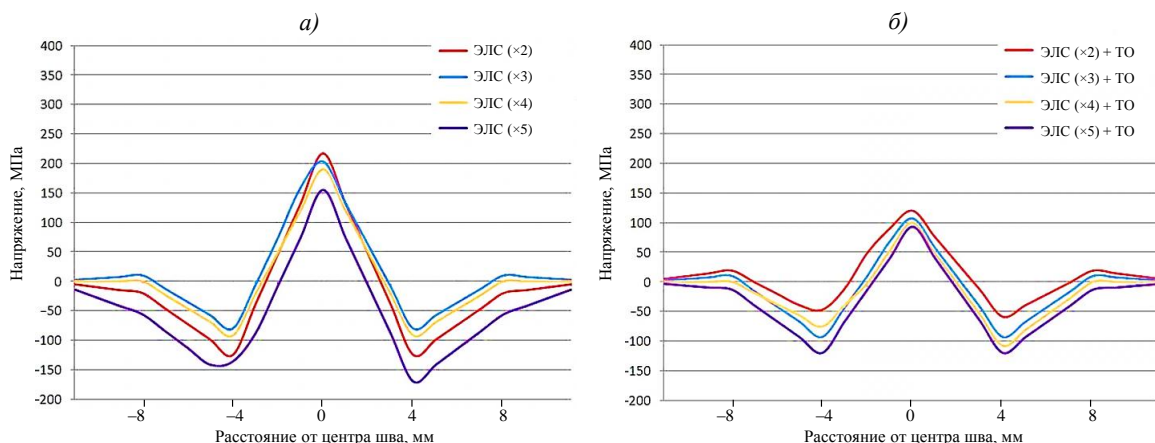


Рис. 9. Эпюры распределения остаточных макронапряжений в поперечном сечении сварного шва в образцах из плиты из титанового сплава ВТ6ч. толщиной 82 мм после электронно-лучевой сварки (ЭЛС) горизонтальным лучом (а) и после ЭЛС и термической обработки (ТО) (б) с повторными проходами (2–5)

Анализ построенных эпюр распределения остаточных макронапряжений показал, что:

- проведение последующего вакуумного отжига снижает уровень остаточных напряжений в сварных соединениях до 50 %;
- для образцов толщиной 82 мм с каждым повторным проходом уровень остаточных напряжений уменьшается в центре сварного шва и увеличивается в ЗТВ.

Результаты исследования элементного состава (с помощью МРСА) образцов с повторными проходами, проведенного по площади 0,1 мм², представлены в табл. 1. Приведены средние величины по результатам 5 измерений. Результаты анализа нормировались на 100 %. Из полученных данных видно, что элементный состав образцов от центра сварного шва до основного металла практически не изменяется для сварки с количеством повторных проходов до 3 (разница массовых долей алюминия и ванадия в сварном шве, околошовной зоне и основном металле для всех образцов не превышает 5 %). Далее с увеличением количества повторных проходов количество алюминия в сварном шве несколько уменьшается (до 9 %).

Таблица 1

Локальный элементный состав материала сварных соединений

Маркировка образцов	Место измерения	Содержание элементов, % (по массе)		
		Al	V	Ti
Г 82-2	Сварной шов	6,1	3,5	90,3
	ЗТВ	6,1	3,8	90,1
	Основной материал	6,3	3,8	89,9
Г 82-3	Сварной шов	6,1	4,0	89,9
	ЗТВ	6,2	3,8	90,0
	Основной материал	6,3	3,5	90,2
Г 82-4	Сварной шов	6,0	3,6	90,3
	ЗТВ	6,2	3,8	89,9
	Основной материал	6,3	3,9	89,8
Г 82-5	Сварной шов	5,8	3,8	90,0
	ЗТВ	6,1	3,7	89,9
	Основной материал	6,3	3,3	90,1

По результатам данных исследований выполнен ремонт ЭЛС длинномерной конструкции из титанового сплава ВТ6ч. толщиной 82 мм с полученным дефектом – высоковольтным пробоем. При сварке конструкции на двух участках сварного шва образованы две протяженные полости (рис. 10).

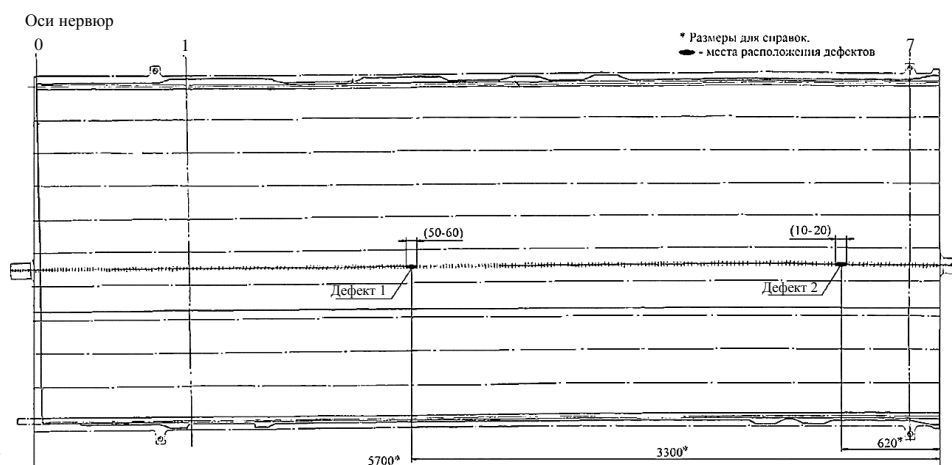


Рис. 10. Эскиз сварной панели с местами доработки дефектов

Ремонт длинномерной панели ЭЛС осуществляли по режиму, приведенному в табл. 2.

Таблица 2

**Режим ремонта длинномерной панели из титанового сплава ВТ6ч.
электронно-лучевой сваркой**

Параметры режима	Значения параметров режима
Угол наклона пушки, градус	0
Расстояние анод–венельт, мм	6,25
Расстояние катод–венельт, мм	0,47
Ток сварки $I_{л}$, мА	320
Ток фокуса $I_{ф}$, мА	715
Скорость сварки $V_{св}$, м/ч	10
Рабочее расстояние, мм	200
Ускоряющее напряжение, кВ	60
* Режим входа луча: $I_{л} = 320$ мА, $I_{ф} = 715$ мА, $V_{св} = 10$ м/ч. Режим выхода луча: $I_{л} = 320$ мА, $I_{ф} = 740$ мА, $V_{св} = 10$ м/ч. Суммарная протяженность участка подварки (с учетом входа и выхода луча) составляет 440 (дефект 1) и 250 мм (дефект 2).	

После выполнения ремонта произведена выдержка детали в вакуумной камере в течение 1 ч. Затем осуществлены визуальный контроль качества сварного шва на отсутствие кратеров, подрезов, неполномерностей и цветов побежалости, а также рентгенографический, ультразвуковой и капиллярный контроль, которые показали отсутствие дефектов в местах проведения ремонта ЭЛС.

Заключения

Установлено, что разработанная технология ремонта ЭЛС позволила получить качественное равнопрочное сварное соединение с коэффициентом прочности не менее 1.

Отмечено, что элементный состав образцов практически не изменяется для сварки с количеством повторных проходов до 3 (разница массовых долей алюминия и ванадия в сварном шве, околошовной зоне и основном металле для всех образцов не превышает 5 %). Далее с увеличением количества повторных проходов несколько уменьшается количество алюминия в сварном шве (до 9 %).

Проведение последующего вакуумного отжига после ЭЛС снижает уровень остаточных напряжений в сварных соединениях до 50 %. В результате исследования установлено, что для образцов толщиной 82 мм с каждым повторным проходом уровень остаточных напряжений уменьшается в центре сварного шва и увеличивается в ЗТВ.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 76–82.
2. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
3. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербаков А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
4. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.

5. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов // Труды ВИАМ. 2014. № 5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-2-2.
8. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
9. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 5–6.
10. Фролов В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов: учеб. пособие. М.: Альфа; Инфра-М, 2011. 477 с.
11. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
12. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
13. Золоторевский Б.Б., Шубладзе Т.Г., Тихонова А.Ф. Остаточные напряжения и деформации в сварных соединениях титанового сплава ВТ6 // Сварочное производство. 1982. № 1. С. 23–25.
14. Мартынов В.Н., Хохловский А.С., Слива А.П. Электронно-лучевая сварка сталей, алюминиевых и титановых сплавов большой толщины // Сварочное производство. 2009. № 12. С. 20–24.
15. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. М.: Машиностроение, 1978. Т. 3. С. 85–89.
16. Гончаров А.Л., Слива А.П., Портнов М.А., Терентьев Е.В., Грибков М.С. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода, выполненных ЭЛС // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 4. С. 74–87.
17. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка / под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
18. Елкин В.Н., Макаров С.В., Панфилов А.П. и др. Опыт электронно-лучевой сварки крупногабаритных изделий из титановых сплавов // Сб. материалов и докладов Междунар. конф. «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии». М.: НИУ «МЭИ», 2015. С. 450–458.
19. Терентьев Е.В. Повышение качества формирования сварных соединений при электронно-лучевой сварке неповоротных стыков со сквозным проплавлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 26–29.
20. Терентьев Е.В., Драгунов В.К., Слива А.П., Щербаков А.В. Влияние скорости сварки на формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 25–29.
21. Драгунов В.К., Терентьев Е.В., Слива А.П., Гончаров А.Л., Марченков А.Ю. Определение скорости сварки при ЭЛС больших толщин со сквозным проплавлением // Сварочное производство. 2016. № 4. С. 20–25.
22. Герасименко А.В., Магнитов В.С., Шляев Ю.Н. Сварка электронным лучом деталей сложного сечения // Электронно-лучевая сварка в судовом машиностроении. 1987. С. 58–59.
23. Соломатин В.Е., Новосалов Т.М. Опыт применения рентгеновского метода определения остаточных напряжений в сварных соединениях // Автоматическая сварка. 1982. № 2. С. 23–28.