

УДК 621.791.72.052

А. В. ФЕДОСОВ, Е. В. КАРПОВИЧ

*Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Украина***ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

В статье проведен литературный обзор сварки крупногабаритных элементов конструкции из высокопрочных титановых сплавов типа VT3-1, VT23 в ракетно-космической отрасли, проанализированы два наиболее эффективных метода свариваемости этих материалов: электронно-лучевой и аргонодуговой. При сравнительном анализе прочностных характеристик основного металла и сварного шва, полученного данными методами соединения этих сплавов, выявлены преимущества электронно-лучевой технологии сварки перед наиболее близкой по прочностным характеристикам сварного шва, полученного аргонодуговой технологией. Определены параметры, которые влияют на свариваемость титановых сплавов, их структуру. Основной особенностью данных сплавов, является необходимость термообработки после сварки. Исходя из этого, предложен метод проведения ее в камере электронно-лучевой установки.

Ключевые слова: высокопрочные титановые сплавы, электронно-лучевая сварка, механические свойства, термический цикл сварки, термическая обработка, электронный луч.

Введение

Титановые сплавы, отличающиеся сочетанием высоких технологических и конструкционных свойств, перспективны для применения во многих областях современной техники, особенно для авиации, космоса, химической промышленности и медицины. Высокая стоимость титана и его сплавов во многих случаях компенсируется их большей работоспособностью, а в некоторых случаях они являются единственным материалом, из которого можно изготовить оборудование или конструкции, способные работать в данных конкретных условиях.

Соединение деталей из титана и титановых сплавов различными методами сварки представляет определенные трудности. Основная проблема заключается в том, что титан обладает высокой химической активностью, ввиду чего расплавленный металл шва взаимодействует с кислородом, азотом и водородом воздуха. Взаимодействие с газами приводит к увеличению прочности и резкому снижению пластичности и ударной вязкости сварных соединений. Однако это не является единственным недостатком титана при его сварке. При высоких температурах (300-500 °С) титан имеет склонность к росту зерна и изменению микроструктуры, что также приводит к увеличению хрупкости сварного шва.

В связи с этим, актуальной научной проблемой является развитие новых подходов к осуществлению сварки высокопрочных титановых сплавов.

Большой вклад в изучение структуры и свойств сварных соединений титановых сплавов внесли:

Г. И. Капырин, Б. А. Колачев, С. С. Ушков, Б. Б. Чечулин, В. Н. Моисеев, С. Г. Глазунов и др. Исследованиями в области концентрации напряжений и пластических деформаций сплавов занимались: Н. А. Махутов, Л. В. Коновалов, А. В. Гурьев и др. Так, например, в работе [1] приводятся механические свойства для большинства сплавов: указаны не только кратковременные механические свойства при повышенных температурах, но и характеристики жаропрочности; свойства при пониженных и криогенных температурах. В работе [2] представлен новый системный подход к определению граничных температурно-временных условий существования защитной оксидной пленки на поверхности титановых сплавов, который открывает пути управления физико-химическими процессами в зависимости от состава и давления взаимодействующей атмосферы. Обзор результатов исследования процессов, сопутствующих электронно-лучевой сварке с высокой концентрацией мощности электронного пучка, с целью их использования для оперативного контроля и управления процессом формирования сварного шва представлены в работе [3]. В работах [4, 5] предложен подход к решению задач, связанных со структурными и фазовыми изменениями, которые происходят в титановых сплавах во время сварки, и их взаимосвязь с термической обработкой.

Анализ литературных источников показал, что широкое применение для соединения титановых сплавов, нашли автоматическая аргонодуговая сварка (АДС) и плазменно-дуговая сварка, позволяющие получать удовлетворительное качество сварных со-

единений, но не решающие всех проблем, связанных со сваркой титана и его сплавов.

Из-за высокой химической активности титановые сплавы удается сваривать дуговой сваркой в инертных газах неплавящимся и плавящимся электродом, электронным лучом, электрошлаковой и контактной сваркой. Расплавленный титан жидкотекуч, шов хорошо формируется при всех способах сварки. Основная трудность сварки титана – это необходимость надежной защиты металла от воздуха, нагреваемого выше температуры 300 °С.

В последнее время широкое применение получил электронно-лучевой способ соединения высокопрочных титановых сплавов, преимуществом которого является тот факт, что он относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) в вакуумных камерах выполняется преимущественно при давлении остаточных газов порядка 10^{-2} Па. При этом обеспечиваются максимальная пластичность и вязкость сварных соединений.

ЭЛС является наиболее перспективным способом соединения изделий из тугоплавких и химически активных металлов и сплавов, изделий из термически упрочнённых материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна термообработка, изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций, ряда толстолистовых и толстостенных конструкций ответственного назначения, КПД составляет порядка 80-90 %.

Очевидно, что с практической точки зрения целесообразно продолжение работ по совершенствованию методов получения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов, удовлетворяющих требованиям сварных конструкций летательных аппаратов.

Сравнительный анализ методов соединения титановых сплавов аргонодуговой и электронно-лучевой сварками, позволит определить способы повышения прочностных характеристик сварных швов титановых сплавов типа ВТ3-1, ВТ23, полученных ЭЛС.

Постановка задачи

Проведен сравнительный анализ двух методов сварки высокопрочных титановых сплавов, частично рассмотрена структура и свойства сплавов типа ВТ3-1, ВТ23, что позволит определить причины образования дефектов в сварных соединениях и предложить методы уменьшения их влияния на сварной шов.

Титановые деформируемые сплавы имеют класс по структуре $\alpha+\beta$ мартенситного типа. ВТ3-1 и ВТ23 относятся к группе $(\alpha+\beta)$ -сплавов – это сплавы, содержащие в своем составе α - и β - модификации титана. Механические свойства и химический состав этих высокопрочных сплавов после термоупрочняющей обработки (ТО) приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1
Механические свойства и химический состав высокопрочных титановых сплавов

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, %	Предел временной прочности σ_b , МПа	Ударная вязкость, Дж/см ²
ВТ3-1	6Al; 2,5Mo; 2Cr; 0,3Si; 0,5Fe	≥ 1200	30-60
ВТ23	4,5Al; 2Mo; 4,5V; 0,6Fe; 1Cr	≥ 1400	45-55

Сварные соединения из $\alpha+\beta$ - сплавов, образующих в шве и околошовной зоне $\alpha'+\beta$ - фазы, лучше подвергать термообработке в виде ступенчатого изотермического отжига при температурах сначала в β -области, а затем в $\alpha+\beta$ - области.

Высокое содержание β - стабилизаторов в количестве больше 3 %, приводит к возникновению вредных закалывающих явлений в металле сварного шва, с вероятным образованием хрупких фаз и интерметаллидов при старении. Кроме этого, для повышения пластичности сварных соединений из сплава ВТ3-1, рекомендуется в металле шва ограничить содержание кремния до 0,15 %.

Снижение концентрации β -стабилизаторов в сварном соединении выполняется за счет удаления из области сварного шва определенной части основного материала и заменой его присадочным материалом, который не содержит β -стабилизирующих элементов. Эту задачу решили путем выполнения на стыке целевой разделки, соизмеримые с размерами сварного шва. Такой метод АДС и ЭЛС с присадкой используется для соединения высокопрочных титановых сплавов ВТ3-1, ВТ23.

Для многокомпонентных титановых сплавов ВТ23, ВТ3-1 нецелесообразно применять методы сварки с глубоким проплавлением. Их сварные соединения требуют обязательного отжига после сварки и именно в этом состоянии могут быть наиболее успешно применены. В состоянии же после сварки швы сплава ВТ23 малопластичны при всех методах сварки титана без разделки кромок за один проход.

Предел прочности сплавов ВТ3-1, ВТ23 после термической обработки может достигать значений

1400 МПа и больше. Такие показатели прочности получены с сохранением удовлетворительной вязкости, это одна из основных задач технологии изготовления крупногабаритных элементов изделий из высокопрочных титановых сплавов типа ВТ3-1, ВТ23.

В связи с чувствительностью $\alpha+\beta$ -сплавов к термическому циклу сварки и благоприятным влиянием замедленного охлаждения на свойства сварных соединений, можно было ожидать, что электронно-лучевая сварка не найдет применения для изготовления сварных конструкций из сплавов данной группы. Однако, в результате экспериментальных исследований было установлено, что мелкозернистая структура, образующаяся в процессе термического цикла электронно-лучевой сварки, а также дисперсность продуктов внутризеренного распада влияют на характер разрушения сварных соединений и уменьшают отрицательное влияние пересыщенной α' -фазы на свойства швов. В работах [7, 8] рассмотрено использование электронного луча для изготовления конструкций различных размеров и толщин элементов из некоторых двухфазных термически упрочняемых сплавов титана. Показано, что электронно-лучевая сварка сплава, при толщине свариваемых элементов 40-50 мм, экономичнее аргонодуговой и обеспечивает более высокие свойства соединений.

Анализ физико-механических свойств основного металла и сварных соединений высокопрочных титановых сплавов, полученных АДС и ЭЛС, позволяет определить наиболее эффективный метод изготовления конструкций из указанного ряда металлов.

Изложение основного материала

Соединение изделий из высокопрочного сплава ВТ3-1, выполненное стандартной аргонодуговой технологией с присадкой ВТ20-3, АДС с присадкой ВТ2св и проникающей дугой, электронно-лучевым методом сварки без присадки и с присадкой ВТ2св показали, что во всех случаях для повышения механических характеристик сварных соединений необходимо проводить упрочняющую термическую обработку. Технология получения требуемых характеристик для основного металла, включала такие режимы термообработки: 1 час, закалка при температуре 910 °С, охлаждение в воду, последующие 3 часа старение при температуре 650 °С, далее охлаждение на воздухе. Указанная технология позволяет повысить ударную вязкость соединений в зоне термического влияния (ЗТВ) и сварных швов, приближая их характеристики к основному металлу. Механические свойства сварных соединений из деформируемого титанового сплава ВТ3-1 при раз-

личных методах сварки с применением термообработки приведены в табл. 2.

Таблица 2
Механические свойства сварных соединений из сплава ВТ3-1 после ТО [6]

Вид сварки	Предел временной прочности $\sigma_{в}$, МПа	Ударная вязкость, Дж/см ²
АДС с присадкой ВТ20-3св 4 прохода	1000-1040	47-52
АДС проникающей дугой с присадкой ВТ2св 2 прохода	1100-1200	21
ЭЛС с присадкой ВТ2св	1100	33-37
ЭЛС без присадки	1100-1200	15-27

Анализ данных из табл. 2 показывает, что предел прочности сварных швов находится на уровне 0,9 от прочностных характеристик основного металла. Показатели ударной вязкости находятся в разных пределах и зависят не только от вида сварки, но и от наличия присадочного материала в сварном соединении. Высокие показатели механических свойств имеют место при ЭЛС с присадкой ВТ2св, где предел прочности и ударная вязкость сварного шва достигает значений $\sigma_{в}=1100$ МПа, $a_{н}=33-37$ Дж/см².

Использование методов сварки без применения присадочных материалов (ЭЛС, погруженной и сжатой дугой) не позволяет получать сварные соединения сплава ВТ23 с нужными свойствами. Вследствие этого для сварки титановых сплавов применяют в основном методы с использованием присадочных материалов - аргонодуговую сварку неплавящимся электродом с присадкой, плавящимся электродом, электрошлаковую сварку. Что улучшает механические свойства соединений за счет изменения химического состава сварного шва при сварке.

Сварные швы из высокопрочного сплава ВТ23 получали аргонодуговой технологией сварки с присадкой СП15, электронно-лучевым методом без присадки, ЭЛС со вставками из СП15. После сварки проводилась термообработка, которая состояла из отжига: 1 час при 750 °С, старения: 12 часов при 380°С, охлаждение на воздухе, старение 2 часа при 550°С и охлаждение на воздухе.

После ТО, структура металла шва и переходной зоны по сравнению с основным металлом имеет свою специфику. После ЭЛС фазовый состав шва и переходной зоны сплава ВТ23, резко закаленного с температуры β -области, представляет собой мартенситную α' -фазу, а морфология структуры – очень тонкие иглы, соотношение между длиной и шириной которых достигает 50–100. Такие иглы являют-

ся внутренними концентраторами напряжений. Параллельное положение их по отношению друг к другу усиливает концентрацию напряжений. Сплав с такой морфологией структуры обладает низкой ударной вязкостью ($a_n=1,5$ кгс·м/см² при $\sigma_b=120$ кгс/мм²), так как влияние внешнего концентратора напряжений (надреза на образце) увеличивается внутренними концентраторами. Снижение пластичности и ударной вязкости происходит также в результате возникающих напряжений как термических, вызванных объемными изменениями, происходящими при кристаллизации металла шва и дальнейшем резком его охлаждении, так и структурных, возникающих в результате превращения исходной β -фазы в мартенситную α' -фазу.

Согласно существующей технологии, детали после сварки переносятся в вакуумные печи или печи с инертной атмосферой. Охлаждение в вакуумной камере электронно-лучевой установки и ТО занимает значительное время, что приводит к большому энергетическим и экономическим затратам.

ТО приводит к некоторому повышению ударной вязкости сварных соединений, вероятно за счет перераспределения легирующих элементов в составляющих структуры (табл. 3).

Таблица 3

Механические свойства сварных соединений из сплава ВТ23 после ТО [6]

Вид сварки	Предел временной прочности σ_b , МПа	Ударная вязкость, Дж/см ²
АДС с присадкой СП15	1100-1120	50-54
ЭЛС со вставками из СП15	1220	48-54
ЭЛС без присадки	1220	25-30

Для крупногабаритных конструкций отжиг лучше выполнять непосредственно в камере ЭЛС электронным лучом с регулируемым термовложением.

Из проведенного анализа значений табл. 2 и 3 следует, что соединения из высокопрочных сплавов типа ВТ3-1, ВТ23, выполненные применением медов АДС и ЭЛС с присадочными материалами, после термообработки имеют оптимальный комплекс физико-механических характеристик сварного шва.

Характерным для сварных соединений сплавов критического состава является повышение в результате отжига не только пластических свойств, но и прочности. Значительное улучшение свойств объясняется благоприятным соотношением α - и β -фаз в структуре околошовной зоны после отжига. Сплав

становится стабильным и не наблюдается аномального изменения электросопротивления при нагреве.

Целью отжига при сварке титановых сплавов критического состава является не только устранение термических сварочных напряжений, но и получение равновесной смеси с необходимым соотношением α -фазы и β -твердого раствора, достаточно обогащенного стабилизирующими элементами для того, чтобы обеспечить стабильность β -фазы при эксплуатации. Правку и механическую обработку сварных конструкций из этих сплавов следует производить только в отожженном состоянии.

Для сплава ВТ23 термическая обработка состоит из высокотемпературного одноступенчатого отжига при температуре 750 °С, выдержки при этой температуре в течение 1-2 ч и медленного охлаждения с печью со скоростью 2-4° в минуту до 350-400 °С, далее на воздухе.

Повышение температуры и увеличение длительности отжига в $\alpha+\beta$ -области сопровождается огрублением внутризеренного строения и ростом размеров α -пластин. Следует отметить необходимость строгой регламентации скорости охлаждения. При увеличении скорости охлаждения с температуры отжига не достигается стабильность структуры и наблюдается эффект закалки. При охлаждении на воздухе происходит частичный распад β -раствора с образованием β -фазы, что вызывает резкое охрупчивание сплава. Уменьшение скорости охлаждения также нежелательно из-за понижения пластичности. Влияние средней скорости печного охлаждения в пределах 0,3-1,4 °С/мин в диапазоне 780-350 °С исследовано Н. Ф. Аношкиным и др. Снижение средней скорости печного охлаждения с 1,4 до 0,3 °С/мин сопровождается повышением прочности на 5-7 кгс/мм² и понижением пластичности на 10-15%. Это вызвано увеличением количества α -фазы и ее характерным внутризеренным строением.

Таким образом, высоколегированные сплавы критического состава требуют жесткой регламентации скорости печного охлаждения и корректировки температуры отжига с учетом инерционности имеющегося оборудования.

Было установлено, что изменение скорости охлаждения при закалке практически не влияет на значение ударной вязкости, но повышение температуры закалки до температур полиморфного превращения увеличивает ударную вязкость ЗТВ и подтверждает необходимость высокотемпературного отжига. Увеличение значений ударной вязкости при закалке объясняется тем, что в условиях высоких температур параметр решетки β -фазы значительно увеличивается, что свидетельствует об объединении β -фазы от легирующих элементов и, соответственно,

приводит к уменьшению прочности и повышению вязкости.

Наиболее удобным способом отжига сварных соединений сплавов ВТЗ-1 и ВТ23, может быть термообработка электронным лучом за счет тепла, которое образуется при повторном переплаве сварного шва. Однако экспериментальные данные из литературных источников свидетельствуют о том, что трехкратный переплав сварного шва на режиме основного сварочного прохода, позволяет получить только незначительное повышение средних значений ударной вязкости, возможно, за счет рафинирования металла в шве и уменьшения жесткости в шве и ЗТВ после термообработки. Использование основного сварочного режима для отжига не рекомендуется из-за большого тепловложения, которое приводит к многократному высокотемпературному воздействию на сварное соединение и практически не изменяет значения механических характеристик ЗТВ.

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что отжиг ЭЛ с регулируемым тепловложением соединений из сплава ВТ23, ВТЗ-1, полученных ЭЛС, позволит повысить ударную вязкость в наиболее опасной зоне плавления до уровня основного металла. На прочность сварных соединений большое влияние также оказывают остаточные напряжения. У высокопрочных титановых сплавов σ_b и $\sigma_{0,2}$ очень близки по значению, что приводит к образованию холодных трещин. Показано, что повторный переплав шва снижает уровень остаточных напряжений, следовательно, отжиг электронным лучом, вероятно, позволит получить аналогичный эффект.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что ЭЛС без присадки, многократный переплав металла шва, термоциклирование и соответствующая ТО позволяют получить наилучшее сочетание механических характеристик соединений из высокопрочных титановых сплавов.

Сравнительный анализ АДС и ЭЛС, применительно к получению соединений из высокопрочных титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ23 показал, что наилучшие прочностные характеристики сварных швов можно получить АДС с присадкой.

Однако дуговые методы сварки имеют ряд недостатков: ограниченность применения производительных процессов для выполнения кольцевых швов малого диаметра (до 250...300 мм) из-за трудности удержания сварочной ванны большого объема; необходимость тщательного контроля качества защиты инертным газом зоны, подвергающейся нагреву до высоких температур (особенно при многослойной сварке); наличие пор в многослойных швах, которые заметно снижают долговечность сварных

узлов в условиях воздействия циклических нагрузок. Для устранения дефектов, размеры и количество которых превышают технические требования на изделие, требуется выполнение трудоемких ремонтных операций.

Электронный луч (ЭЛ) по сути, является практически безинерционным источником тепловой энергии. Возможность тонко регулировать мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия, позволяет широко использовать системы управления лучом и программирования режимов сварки. Сварку можно вести отдельными импульсами с различной формой зоны плавления.

Разнообразие ЭЛС распространяется от деталей, изготавливаемых из фольги, до деталей толщиной более 100 мм, соединяемых за один проход, от деталей микромеханики до сегментов корпусов самолетов и подводных лодок, от отдельных частей космических аппаратов до крупных серий в электро- и автомобилестроении.

Сварной шов при ЭЛС очень узкий и имеет параллельность границ, малая протяженность зоны термического влияния, обуславливает незначительные угловые и линейные деформации свариваемых изделий. Коробление практически отсутствует, данный критерий является выдающимся для ЭЛС. Погонная энергия не превышает 20 % от аналогичного показателя при дуговой сварке.

В связи с тем, что электроны тормозятся непосредственно в обрабатываемом материале, такие факторы как образование плазмы, коэффициенты отражения и поглощающая способность материала практически не играют никакой роли при регулировании сварочных параметров. Наибольшее влияние на параметры сварки электронным лучом оказывают теплофизические характеристики материала.

Электронно-лучевым способом можно сварить соединения тех же типов, что и дуговой сваркой: стыковые, нахлестанные, по отбортованным кромкам. ЭЛС также позволяет выполнять соединения принципиально новых видов, например, соединения элементов конструкций, расположенных на разной высоте, прорезными швами. С помощью ЭЛ можно производить сварку в труднодоступных местах и в узких разделках – щелях, можно также выполнять соединения обечаек внедренным лучом через ребро жесткости.

В целом при конструировании и выборе способа сварки изделий следует учитывать следующие преимущества ЭЛС, по сравнению с другими способами сварки плавлением:

– большие скорости нагрева и охлаждения металла в вакууме, что позволяет получать максимальную степень чистоты и высокие физико-механические свойства соединения;

– резкое снижение величины деформаций сварных конструкций;

– высокая производительность и экономичность;

– универсальность аппаратуры, позволяющая сваривать детали разных толщин;

– наличие предпосылок для комплексной автоматизации процесса.

Внедрение электронно-лучевой сварки в высокотехнологичные производства затрудняется ее экономическими и техническими особенностями, такими как:

– высокие капиталовложения;

– необходимость весьма точной подгонки свариваемых элементов;

– ограниченный размер конструкций, поскольку сварку приходится выполнять в камерах;

– необходимость принятия специальных мер для обеспечения направления ЭЛ по стыку.

ЭЛС в сравнении с другими способами сварки плавлением делает возможным очень высокие скорости процесса: до 60 м/мин (1 м/с) при плотности мощности до 10^7 Вт/см². При ЭЛС изделий толщиной 200 мм за один проход со скоростью 1,25 мм/с длительность сварки шва длиной 1 м составляет 13,3 мин/м. Для двухдуговой автоматической сварки 1 м такой плиты под флюсом потребовалось бы 10 час/м и для ручной дуговой сварки – 130 час/м. Согласно нормам США, эти величины имеют значение для строительной стали и котельной стали. Один присадочный материал, требуемый для сварки шва глубиной 50 мм, стоил бы столько, сколько полный шов (200 мм), выполненный ЭЛ.

Согласно результатам проведенных исследований по сварке высокопрочных титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ23 методом ЭЛС можно сделать вывод, что данный способ является наиболее целесообразным при получении крупногабаритных конструкций для данного ряда металлов, так как позволяет исключить недостатки АДС, получить изделия с улучшенными технико-экономическими показателями и требуемыми физико-механическими свойствами сварных швов по отношению к основному материалу.

Для улучшения качества шва и повышения производительности процесса ЭЛС разработано и применяется большое количество технологических приемов: формирование сварного шва с обязательным полным проплавлением; развертка и наклон пучка; модуляция тока пучка; подача присадочного материала; применение подкладок; сварка смещенным и «расщепленным» пучком; выполнение прихваток и предгазительных проходов.

Характеристики электронного луча могут изменяться в широких пределах, что позволяет регу-

лировать процесс нагрева и охлаждения изделия и, следовательно, осуществить все этапы технологического процесса изготовления сварных соединений из высокопрочных титановых сплавов в электронно-лучевой установке. Это позволит сократить время производства крупногабаритных изделий из высокопрочных титановых сплавов, получаемых методом ЭЛС, исключив перерывы между сваркой и ТО, время транспортирования и вакуумирования.

Заключение

Проведенный анализ литературных источников показал перспективность ЭЛС при изготовлении крупногабаритных элементов конструкций из высокопрочных титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ23 средней и большой толщины. Сварные соединения требуют обязательного отжига для повышения механических характеристик и работоспособности сварных конструкций.

ТО для крупногабаритных изделий из высокопрочных титановых сплавов наиболее целесообразно проводить электронным лучом с определенной конфигурацией температурных полей, обеспечивающих требуемую структуру, фазовый и химический состав сварного соединения и оптимальное сочетание физико-механических свойств.

Менее энергоемкий способ получения соединений из высокопрочных титановых сплавов требует проведения процесса сварки и цикла ТО в электронно-лучевой установке. Это позволит получить механические характеристики соединений на уровне достигнутых в настоящее время.

Проведенные исследования показали актуальность дальнейшего совершенствования технологии получения сварных соединений ЭЛС высокопрочных титановых сплавов и выявили ряд задач, решение которых позволит реализовать комплексный подход к анализу процессов, происходящих при ЭЛС: определить зависимости структуры; формы и характеристик сварного соединения от параметров сварки; выявить причины возникновения дефектов; исследовать влияние температурных полей на процесс сварки и качество соединения.

Литература

1. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Муравьев, В. И. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов [Текст] / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов. – М. : Эком, 2009. – 752 с.
3. Беленький, В. Я. Некоторые аспекты кон-

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

4. Колачев, Б. А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* [Текст] / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – 4-е издание. – М. : МИСИС, 2005. – 432 с.

5. Костін, О. М. *Зварювальні матеріали* [Текст] : навч. посібник для вузів / О. М. Костін. – Миколаїв : НУК, 2004. – 225 с.

6. Карпович, Е. В. *Способы получения крупногабаритных осесимметричных изделий из высокопрочных титановых сплавов* [Текст] / Е. В. Карпович, В. Г. Бессалый // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : Зб. наук. пр. – Д. : Пороги, 2010. – Т. X. – С. 30-40.

7. *Совершенствование технологии ЭЛС титанового сплава VT23* [Текст] / В. Н. Замков, А. Д. Шевелев, В. В. Арсенюк и др. // Автоматическая сварка. – 1984. – № 1. – С. 98.

8. Колачев, Б. А. *Титановые сплавы разных стран* [Текст] / И. С. Польшкин, В. Д. Талалев. – М. : ВИЛС, 2000. – 316 с.

Поступила в редакцию 01.12.2014, рассмотрена на редколлегии 20.01.2015

ПЕРСПЕКТИВНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

О. В. Федосов, О. В. Карпович

У статті проведено літературний огляд зварювання великогабаритних елементів конструкції з високоміцних титанових сплавів типу VT3-1, VT23 в ракетно-космічній галузі, проаналізовано два найбільш ефективні методи з'єднання цих матеріалів: електронно-променевий та аргонодуговий види зварювання. При порівняльному аналізі характеристик міцності основного металу і зварного шва, отриманого даними методами з'єднання цих сплавів, виявлено переваги електронно-променевої технології зварювання перед найбільш близькою за характеристиками міцності зварного шва, що отримано аргонодуговою технологією. Визначено параметри, що впливають на зварюваність титанових сплавів, їх структуру і міцність. Основною особливістю даних сплавів є необхідність термообробки після зварювання. Виходячи з цього, запропоновано метод проведення її в камері електронно-променевої установки.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, електронно-променеве зварювання, механічні властивості, термічний цикл зварювання, термічна обробка, електронний промінь.

ADVANCED ASPECTS OF ELECTRON-BEAM WELDING FOR HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOYS

A. V. Fedosov, E. V. Karpovych

The article gave a literature welding review of large structural construction elements with high-strength titanium alloys such as VT3-1, VT23 in the aerospace industry, were analyzed the two most effective methods of these materials connection: cathode-ray and argonarc welding types. During comparative analysis of base metal and principal weld strength characteristics obtained by these connection methods, revealed the advantages of electron beam welding technology to the closest by the strength characteristics argonarc welding technology. The parameters that affect the weldability of titanium alloys' structure and strength were determined. The main feature of these alloys is the necessity for post weld heat treatment, on the basis of this was proposed the method of electron-beam apparatus.

Keywords: high-strength titanium alloys, electron beam welding, mechanical properties, thermal cycle of welding, heat treatment, electron beam.

Федосов Алексей Викторович – аспирант каф. технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

Карпович Елена Владимировна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: kelv@ua.fm.