

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ*

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Ю. В. ОРСА, К. С. ХРИПКО, О. В. МАХНЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты разработки эффективных технологических процессов электронно-лучевой сварки балочных конструкций из титанового сплава ВТ-6 с обеспечением высокой сопротивляемости сварных соединений образованию усталостных трещин, диффузора газотурбинного двигателя из сплава ОТ-4 с использованием прорезных швов, корпуса камеры среднего давления газотурбинного двигателя из сплава ВТ5Л с обеспечением высокой точности геометрических размеров. Библиогр. 5, рис. 16.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, авиационные конструкции, титановые сплавы, детали переменного сечения, прорезные швы, остаточные напряжения, сопротивление усталости

ЭЛС — способ сварки, оптимально подходящий для производства многих авиационных конструкций из титановых сплавов. В нем при идеальной вакуумной защите обеспечивается сочетание достаточно высокой удельной энергии источника нагрева (излишняя концентрация в большинстве случаев и не нужна — в силу невозможности получения «нулевых» зазоров в стыке) с возможностями ЧПУ по точной повторяемости траектории сварки при строгой синхронизации перемещения с управлением энергетическими параметрами электронного пучка. В работе представлены три примера технологии ЭЛС подобных изделий.

ЭЛС тонкостенных гофрированных несущих авиационных конструкций из сплава ВТ-6. Балочные конструкции двутаврового типа с тонкостенной стенкой волнистого профиля (гофрированной), находящейся между двумя полками значительно большей толщины, представляют большой интерес для авиастроения с точки зрения снижения общей массы при высокой нагрузочной способности. При этом использование титанового сплава, кроме снижения массы, обеспечивает еще и высокую коррозионную стойкость.

Такие методы изготовления подобных конструкций, как литье, штамповка, ковка с последующей механической обработкой экономически неэффективны. Очевидным является экономическое преимущество использования сварки при изготовлении балочных конструкций из отдельных, технологичных с точки зрения их производства, частей. Но в этом случае возникают свои технические сложности. Во-первых, процесс изготов-

ления сварной двутавровой гофрированной конструкции предусматривает выполнение сварки по сложной криволинейной траектории. Во-вторых, при этом требуется получение полного сплавления стенки с полками с формированием плавного перехода шва между стенкой и полкой. В-третьих, геометрическая точность всей конструкции может быть обеспечена только при условии значительного снижения или компенсации остаточных сварочных деформаций. Наконец, в некоторых случаях возникает потребность соединения полки со стенкой при соотношении толщин вплоть до 12:1.

На наш взгляд, в этом случае способ ЭЛС, уже в силу своих главных характерных особенностей, удовлетворяет большинству упомянутых выше требований, в особенности с точки зрения точности управления энергией и сварочным перемещением [1].

Для разработки технологии ЭЛС был использован прототип опытной конструкции гофрированной двутавровой балки, эскиз которой показан на рис. 1. Прототип имитирует силовую конструкцию такой балки с достаточно толстыми полками толщиной 7,62 мм и тонкостенной гофрированной стенкой толщиной 0,64 мм, имеющей в центре перпендикулярное пересечение с цилиндрической трубой (обечайкой) той же толщины. В качестве конструкционного материала для прототипа, а затем и макетов длинномерных силовых авиационных конструкций применен широко используемый ($\alpha+\beta$)-сплав ВТ-6 (Ti-6Al-4V), способный обеспечивать прочность, эквивалентную основному металлу, при любых режимах послесварочного отжига при температурах не выше температуры полиморфного превращения [2].

Конечно, возможны различные схемы сварки такого таврового соединения: и сварка насквозь через полку, и односторонняя сварка электронным пучком, направленным в край стыка полки

* По материалам доклада, представленного на международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине», 11–13 июня 2018, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

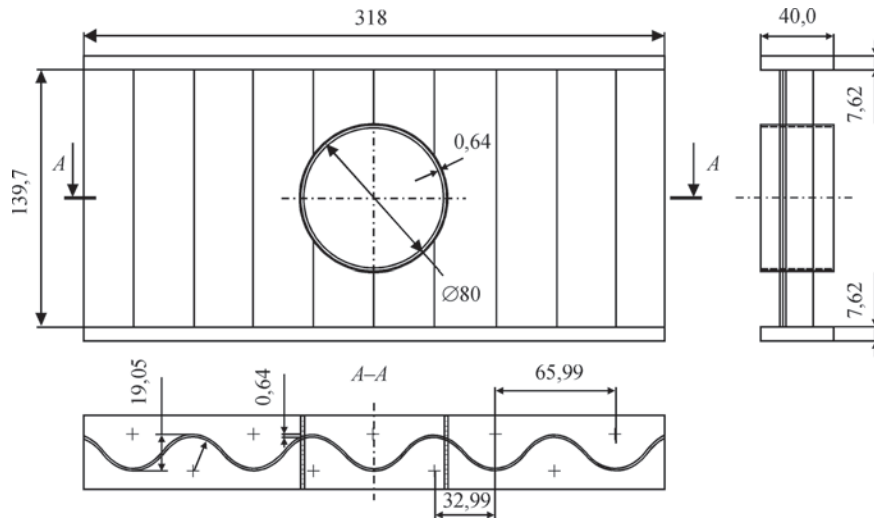


Рис. 1. Конструкция прототипа двутавровой гофрированной балки

со стенкой под небольшим углом к поверхности этой полки. В свое время были опробованы эти схемы сварки и пришли к выводу, что все они не удовлетворяют, в достаточной мере, упомянутым выше требованиям.

В итоге остановились на схеме сварки наклонным электронным пучком с двух сторон стенки за два прохода, как это показано на рис. 2. Сварка выполняется наклонным на 30° от вертикали электронным пучком, направленным на край вертикально расположенного стыка между полкой (или обечайкой) и волнистой стенкой. После выполнения частичного проплавления этого стыка с одной стороны, вся сборка переворачивается на 180° для выполнения заключительного прохода.

Сразу следует отметить, что главной сложностью при реализации подобной схемы сварки является то, что из-за трудности точной механической подгонки торцов тонкой гофрированной заготовки на отдельных участках стыка возможны зазоры. Проблема еще усугубляется, когда сама полка представляет собой не плоскую поверх-

ность, как показано на схеме прототипа, а искривленную, т.е. когда высота двутавра плавно изменяется по его длине (подобный вариант мы также отработывали). В итоге, превышение величины зазора и его протяженности выше некоторого критического предела с высокой вероятностью приводит к образованию локальных прожогов шва, пример чего приведен на рис. 3.

Таким образом, главная задача первого прохода — качественное сплавление двух сопряженных поверхностей даже при наличии небольших локальных зазоров. Именно поэтому и силовые прихватки, и первый проход выполнялись на «мягком» режиме, т.е. неконцентрированным электронным пучком. Более того, вместо традиционного непрерывного режима сварки мы использовали импульсную модуляцию тока электронного пучка, что позволило, в сравнении с непрерывной сваркой, уменьшить «погонное» тепловложение в свариваемые кромки, тем самым предотвращая их локальный перегрев и усиливая эффект силы поверхностного натяжения в удержании расплавленного металла сварочной ванны. Все это позволило обеспечить формирование относительно неглубокого шва с лицевой поверхностью в виде «галтели» между сопряженными поверхностями (как условно показано на схеме рис. 2). При этом

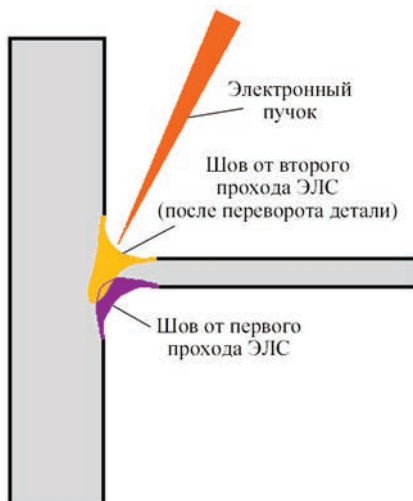


Рис. 2. Схема двухсторонней ЭБС таврового соединения за два прохода

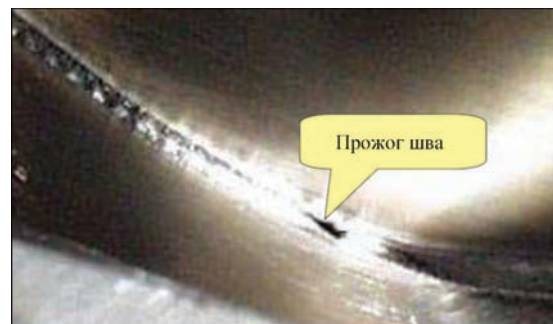


Рис. 3. Локальный прожог шва при недопустимом зазоре в стыке



Рис. 4. Макрошлиф ($\times 35$) таврового соединения стенки и обечайки

максимально допустимые локальные зазоры в стыке не должны превышать: до 0,1 мм в тавровом соединении 7,60 мм полки и 0,64 мм стенки и до 0,08 мм — при одинаковых толщинах стенки и полки (равных 0,64 мм).

После переворота изделия на 180° выполняется завершающий проход. Он должен обеспечить уже полное сплавление в месте контакта

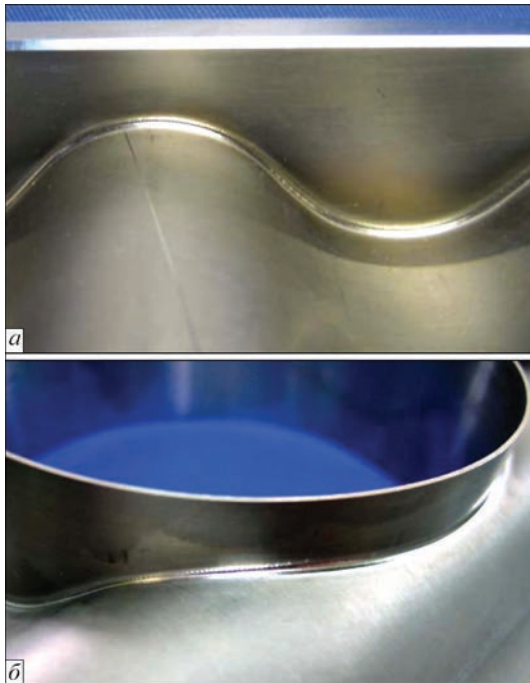


Рис. 5. Лицевая поверхность шва после импульсной ЭЛС соединений волнистой стенки, соответственно, с полкой (а) и с обечайкой (б)

торца волнистой стенки с полкой балки (или стенкой обечайки), гарантированно перекрывая зону проплавления первого прохода. Так как при первом проходе уже получено частичное сплавление кромки стенки с полкой по всей длине, локальные зазоры в остающейся части стыка уже не критичны. Можно даже выполнять сварку максимально концентрированным электронным пучком с формированием так называемого кинжального проплавления, но делать этого, конечно, не нужно из-за образования корневых дефектов. Нами был выбран компромиссный режим сварки, с умеренной концентрацией электронного пучка и с использованием импульсной модуляции его тока, который обеспечивает минимально достаточные глубину и ширину шва со сравнительно широкой корневой частью (рис. 4) и гладкой лицевой поверхностью в виде «галтели» между сопряженными поверхностями (рис. 4 и 5).

По отработанной технологии были успешно сварены как упомянутые ранее прототипы (эскиз рис. 1), так и полномасштабный шестиметровый макет двутавровой гофрированной балки (рис. 6).

Затем были проведены расчетные оценки остаточных напряжений и сопротивления усталости такой шестиметровой гофрированной балки из титанового сплава ВТ-6.

Известно [3], что для сплава ВТ-6 предел усталости на базе 10^5 циклов примерно соответствует 588 МПа, т. е., если не учитывать остаточные нерелаксированные напряжения и концентрацию напряжений, то на заданной базе $8 \cdot 10^4$ циклов имеет место достаточно большой запас прочности по напряжениям.

Результаты математического моделирования остаточных напряжений показывают, что после ЭЛС в полке уровень продольных остаточных напряжений достигает 500 МПа (рис. 7).

По техническим условиям балка после сварки подвергается низкотемпературному отпуску, который снижает остаточные напряжения примерно на 40 %, т. е. в зоне шва остаются продольные остаточные напряжения на уровне 300 МПа.

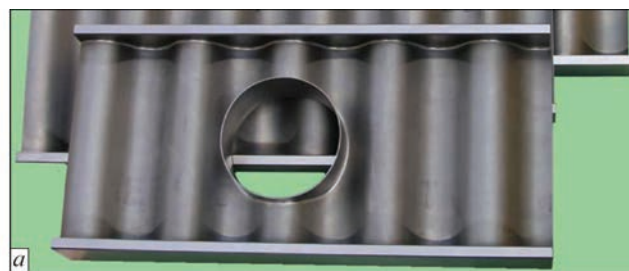


Рис. 6. Сваренные узлы: короткий прототип секции двутавровой гофрированной балки с поперечной трубой (а) и полномасштабный шестиметровый макет (б)

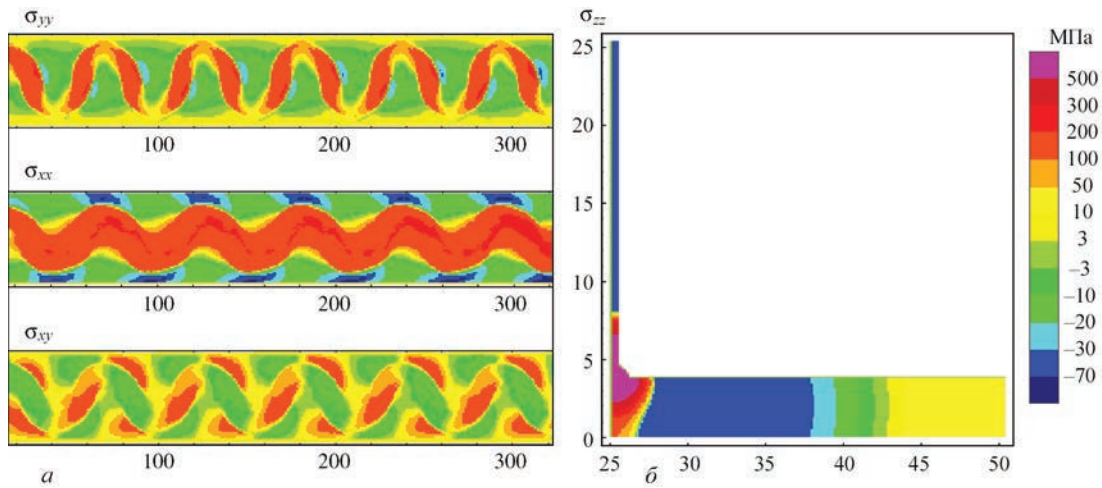


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений в плоскости (а) и поперечном сечении соединения (б)

С учетом уже имеющихся данных [4], проведенные расчеты сопротивления усталости шестиметровой сварной балки после подобной термической обработки показали, что зона сварных соединений отличается достаточно высокой сопротивляемостью образованию усталостных трещин на заданной базе $8 \cdot 10^4$ циклов. Причем небольшие локальные утонения стенки в зоне сварного шва оказывают влияние лишь на величины касательных напряжений на краях балки, но на зарождение усталостных трещин это оказывает лишь весьма небольшое влияние.

ЭЛС диффузора газотурбинного двигателя из титанового сплава ОТ-4. Существующая до настоящего времени технология сборки деталей диффузора газотурбинного двигателя (ГТД) из титанового псевдо- α -сплава марки ОТ-4 предусматривала получение соединения с помощью имеющихся на торцах лопаток шипов, которые вводятся в прорези покрывного диска и ввариваются по контуру методом аргонодуговой сварки (АрДС). Очевидным недостатком данной технологии является значительное искажение формы изделия, в частности, недопустимое уменьшение величины контрольного зазора А (рис. 8). Даже применение последующей термической правки изделия в жесткой оснастке не всегда приводит к положительному результату.

Было решено заменить метод сварки с АрДС на ЭЛС, для чего соответственно видоизменить конструкцию соединяемых элементов диффузора для наиболее полного использования возможностей ЭЛС. Принято решение убрать упомянутые «шипы» с торцов всех 17 лопаток нижнего диска и, обеспечив плотный контакт этих торцов со сплошной нижней поверхностью покрывного диска, соединять их между собой прорезными швами (прямо сквозь 2,5 мм толщину покрывного диска). При этом указанные выше прорезные швы долж-

ны иметь замкнутый контур, геометрически подобный сечению лопатки (рис. 9).

Экспериментально установлено, что величина смещения оси шва от края торца лопатки должна составлять 1,0 мм. Параметры режима сварки были выбраны, исходя из условий получения узкого шва с глубиной проплавления не менее 6 мм, без корневых дефектов.

Фактически свариваемый контур формируется двумя последовательными прорезными швами. Небольшое увеличение глубины проплавления второго прорезного шва (правый на рис. 10), в итоге, компенсировали соответствующим снижением тока электронного пучка (на 2 мА).

Отработанная на образцах-прототипах технология ЭЛС была в дальнейшем использована при изготовлении реального диффузора ГТД

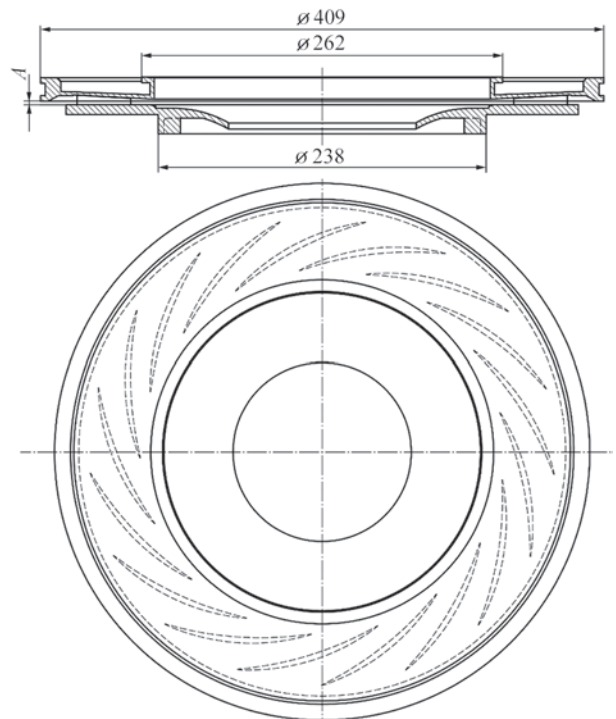


Рис. 8. Эскиз прототипа диффузора ГТД

0020102040-01СБ (рис. 11) и передана вместе с ним Заказчику.

ЭЛС корпуса камеры среднего давления ГТД из титанового сплава ВТ5Л. Корпус камеры среднего давления (КСД) газотурбинного двигателя представляет собой сложную конструкцию, состоящую из стоек и лопаток из литейного титанового α -сплава ВТ5Л. В соответствии с техническими требованиями элементы КСД должны быть

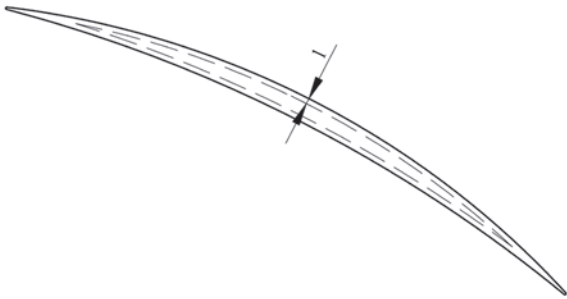


Рис. 9. Контур прорезного шва на покрывном диске диффузора относительно сечения лопатки

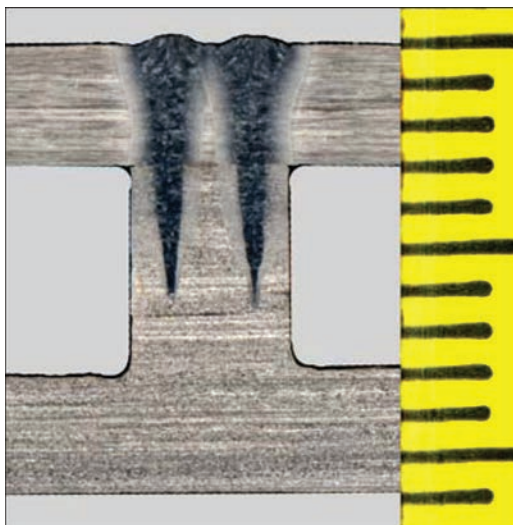


Рис. 10. Макрошлиф таврового соединения, полученного двумя прорезными швами

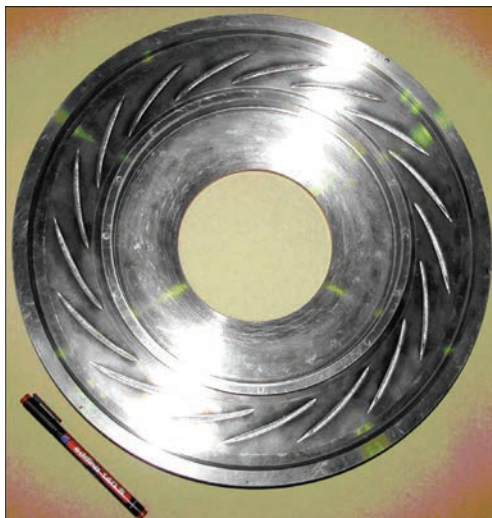


Рис. 11. Наружная поверхность покрывного диска диффузора после ЭЛС прорезными швами торцов 17 лопаток

сварены между собой по внутренним и наружным бандажным полкам с обеспечением требуемого взаимного расположения лопаток и стоек относительно оси двигателя [5]. Количество лопаток и стоек — 34, соответственно суммарное количество сварных швов по внутреннему и наружному диаметру — 68, наружный диаметр корпуса КСД в сборочно-сварочном приспособлении не превышает диаметром 1390 мм. Процесс ЭЛС должен обеспечивать полный провар детали переменного сечения (рис. 12) по всей длине стыка с формированием лицевого и обратного валиков шва без подрезов и занижений, а также защиту пера лопатки и прилегающих поверхностей от повреждением проникающим электронным пучком.

Для наружного соединения использована схема ЭЛС с перемещением горизонтального пучка почти сверху вниз, а для внутреннего — с продольным перемещением в плоскости Z-X наклоненного на 35° от вертикали пучка.

В первом случае свариваемая толщина варьируется от 5 до 17 мм, а во втором, ввиду наклона пучка, — от 5,5 до 24 мм. Соответственно, сварочные параметры должны изменяться синхронно с изменением свариваемой толщины (рис. 12).

Для обеих пространственных схем сварки (т. е. наружных и внутренних швов) разработано и из-



Рис. 12. Пара стоек КСД, сваренных наружным и внутренним швами

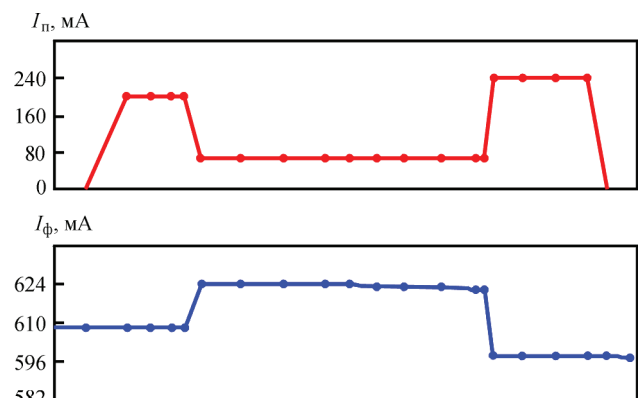


Рис. 13. Графики изменения тока пучка и тока фокусировки при сварке детали с переменной толщиной



Рис. 14. Корпус КСД в оснастке для сварки горизонтальным электронным пучком наружных швов



Рис. 15. Корпус КСД в оснастке для продольной сварки (в плоскости Z-X) наклонным электронным пучком внутренних швов

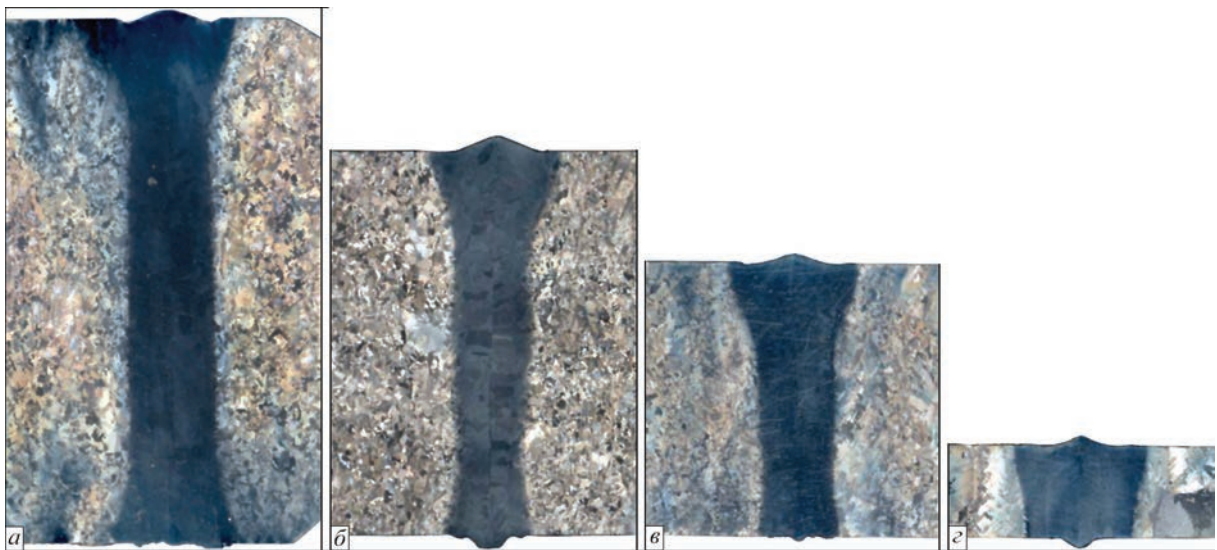


Рис. 16. Макроструктура сварных соединений литейного сплава ВТ5Л1 различной толщины при ЭЛС со сквозным проплавлением: а — $\delta_{св} = 26$ мм; б — 17; в — 14; г — 5

готовлено универсальное сборочно-сварочное приспособление (оснастка), обеспечивающее фиксацию всех элементов корпуса, свободный ввод и вывод электронного пучка на технологические планки из материала изделия, а также медную защиту изделия от проникающего электронного пучка (рис. 14 и 15, соответственно).

Начиная с толщины свариваемого металла ($\delta_{св}$) 14 мм, формируется сварной шов с практически параллельными стенками литой зоны (рис. 16), при этом ширина шва в корневой части находится в диапазоне 2,4...2,6 мм.

Контроль геометрии корпуса камеры среднего давления после ЭЛС всех соединений показал допустимые отклонения реальных размеров от чертежных, что подтверждает преимущество использования ЭЛС в производстве частей ГТД.

Список литературы

1. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом ЭЛС с мно-

гокоординатными перемещениями пушки и изделия. Киев, *Автоматическая сварка*, 5, 3–7.

2. Замков В. Н., Прилуцкий В. П., Петриченко И. К. и др. (2001) Влияние способа сварки плавлением на свойства соединений сплава Ti-6Al-V. *Там же*, 4, 3–7.
3. Титановые сплавы в машиностроении. (1977). Капырин Г. И. (ред.). Ленинград, Машиностроение.
4. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
5. Нестеренков В. М., Кравчук Л. А., Архангельский Ю. А. и др. (2015) Электронно-лучевая сварка камеры среднего давления газотурбинного двигателя. Киев, *Автоматическая сварка*, 12, 31–35.

References

1. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, 5, 2-5.
2. Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P., Petrichenko, I.K. et al. (2001) Effect of the method of fusion welding on properties of welded joints in alloy Ti-6Al-4V. *Ibid.*, 4, 2-6.
3. (1977) *Titanium alloys in machine building*. Ed. by G.I. Kapryrin. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].

4. Makhnenko, V.I. (2006) *Service life of safe operation of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A. et al. (2015) Electron beam welding of medium-pressure chamber of gas turbine engine. *The Paton Welding J.*, **12**, 29-33.

ТЕХНОЛОГІЯ ЕПЗ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Ю. В. ОРСА, К. С. ХРИПКО, О. В. МАХНЕНКО

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, г. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлені результати розробки ефективних технологічних процесів електронно-променевого зварювання балочних конструкцій з титанового сплаву VT-6, що забезпечує високу опірність зварних з'єднань утворенню втомних тріщин, дифузора газотурбінного двигуна зі сплаву OT-4 з використанням прорізних швів, корпусу камери середнього тиску газотурбінного двигуна зі сплаву VT5Л із забезпеченням високої точності геометричних розмірів. Бібліогр. 5, рис. 16.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, авіаційні конструкції, титанові сплави, деталі змінного перерізу, прорізні шви, залишкові напруги, опір втомі

TECHNOLOGY FOR EBW OF AIRCRAFT STRUCTURES OF TITANIUM ALLOYS

V.M. NESTERENKOV, Yu.V. ORSA, K.S. KHRIPKO, O.V. MAKHNENKO

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Presented are the results of the development of efficient technological processes of electron beam welding of beam structures of titanium VT-6 alloy with high resistance of welded joints to the formation of fatigue cracks, the diffuser of gas turbine engine of OT-4 alloy using slot welds, the chamber of medium pressure gas-turbine engine of VT5L alloy, providing a high accuracy of geometric dimensions. 5 Ref., 16 Fig.

Keywords: electron beam welding, aircraft structures, titanium alloys, variable cross-section parts, slot welds, residual stresses, fatigue resistance

Поступила в редакцію 25.06.2018

16 - 18 October 2018

Fair and Exhibition Centre
expo silesia
www.exposilesia.pl

60th
International
Welding Conference
Organizer:
Institute of Welding

ExpoWELDING
IWS®

International Welding Fair

ul. Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec | expowelding@exposilesia.pl



Международная Ассоциация «Сварка» (г. Киев) организует участие украинских компаний на коллективном стенде в международной сварочной выставке «ExpoWELDING 2018», г. Sosnowiec, Польша, 16-18 ноября 2018 г. Выставка проводится один раз в два года и является крупнейшей сварочной выставкой в Восточной Европе. По вопросам участия в выставке «ExpoWELDING 2018» на коллективном стенде просьба обращаться: тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, E-mail: journal@paton.kiev.ua. Статья, посвященная предыдущей выставке «ExpoWELDING 2016» и участию в ней украинских компаний на коллективном стенде, была опубликована в журнале «Автоматическая сварка» № 12, 2016, стр. 63-67 и находится в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2016/as201612part.pdf>.