

УДК 621.791.72.052

В. А. ПЕРЕРВА¹, Е. В. КАРПОВИЧ¹, В. Г. БЕССАЛЫЙ²¹ Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Украина² ГП "ПО Южный машиностроительный завод им. А. М. Макарова"

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО ШВА ПРИ СВАРКЕ ПОЛЫМ КАТОДОМ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6С

Рассмотрена сварка высокопрочного титанового сплава ВТ6С, применяемого в конструкциях ракетой и авиационной техники. Исследовано влияние режимов сварки полым катодом в вакууме на структуру сварных соединений. Проанализирована макроструктура и микроструктура на образование дефектов. Выполнен сравнительный анализ структуры сварных швов, выполненных сваркой полым катодом в вакууме и погруженной дугой в контролируемой атмосфере. Проведены исследования микротвердости сердцевины и альфированного слоя у образцов, сваренных полым катодом. Исследован газонасыщенный слой на наличие трещин.

Ключевые слова: высокопрочные титановые сплавы, микроструктура, макроструктура, полый катод, сплавление кромок.

Введение

Развитие авиа- и ракетостроения в значительной мере зависит от объема использования конструкций из титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью в сочетании с достаточно высокой технологичностью и коррозионной стойкостью [1].

Некоторые материалы являются проблемными с точки зрения обычной сварки, например, по причине образования в сварном соединении хрупких интерметаллидных соединений, значительного перегрева соединяемых элементов и необходимости использования защитной инертной среды. К тому же плавление металла при сварке и формирование шва значительно снижает механические характеристики конструкции. Эти факторы существенно ограничивают использование обычной сварки для соединения и ремонта элементов ответственных деталей и узлов, работающих в критических условиях [2-4].

Основным видом сварки для изготовления шарбаллонов из высокопрочного титанового сплава ВТ6С в настоящее время является сварка погруженной дугой. Структурные превращения, проходящие при этой дуговой сварке в шве и околошовной зоне, зачастую оказывают негативное влияние на показатели конструктивной прочности соединений [5-6]. Перспективный способ получения неразъемных соединений из такого материала – сварка полым катодом в вакууме [7].

Целью данной работы является исследование и внедрение процесса дуговой сварки горячим полым катодом в вакууме.

Постановка задачи

Задачей данной работы является исследование структуры сварных соединений в области сварного шва сплава ВТ6С, выполненных сваркой погруженной дугой с контролируемой атмосферой и полым катодом в вакууме.

Материалы и оборудование исследований

Исследования проводились на образцах из высокопрочного титанового сплава ВТ6С с размерами 200x150x5мм и 250x150x8мм. Химический состав данного сплава представлен в таблице 1 [8]. Образцы изготавливались из отожженных при различных температурах пластин с выдержкой 40 мин. и охлаждением на воздухе.

Отработка технологии сварки полым катодом была проведена в лаборатории сварки на базе установки для электроннолучевой сварки ЭЛУ-5 (рис. 1).

Был оборудован пост для механизированной сварки полым катодом плоских образцов-имитаторов. С применением горелки ТПК-300 была собрана установка, при этом были использованы вакуумная камера с системой откачки, предметный стол с продольным и поперечным перемещением, источник питания ВДУ-504 и головка с механизмом слежения по высоте дуги.

Таблица 1

Химический состав сплава ВТ6С

Химический элемент	Содержание, %
Fe	до 0,25
C	до 0,1
Si	до 0,15
V	3,5 - 4,5
N	до 0,05
Ti	87,685 - 91,2
Al	5,3 - 6,5
Zr	до 0,3
O	до 0,15
H	до 0,015
Примесей	прочих 0,3

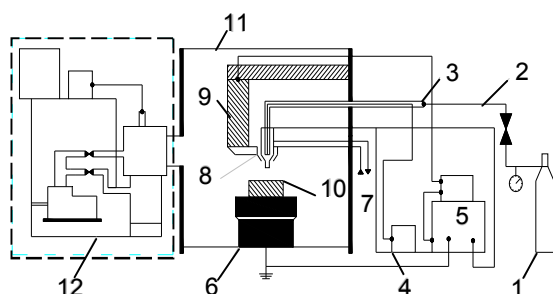


Рис. 1. Принципиальная схема установки для сварки горячим полым катодом в вакууме:

1 – Аргон, 2 – Натекатель, 3 – Переходник осциллятора, 4 – Осциллятор, 5 – Источник питания, 6 – Манипулятор, 7 – Вода, 8 – Горелка, 9 – Головка, 10 – Изделие, 11 – Вакуумная камера, 12 – Вакуумная система

Результаты исследований

Для исследования структуры и дефектов основного и наплавленного металла сварного соединения были проведены металлографические исследования [9].

Исследования проводились на образцах, вырезанных из сварного шва и основного металла на расстоянии 20мм. от края пластин.

На рисунке 2 представлены две макроструктуры образцов, выполненных разными способами сварки. На изломах сварных швов отсутствуют такие дефекты, как флокены, горячие и холодные трещины, что говорит о правильности технологий сварки погруженной дугой и полым катодом. Видно, что геометрические размеры сварного шва, выполненные сваркой полым катодом значительно мень-

ше, чем при сварке погруженной дугой, а в особенности в зоне проплава.

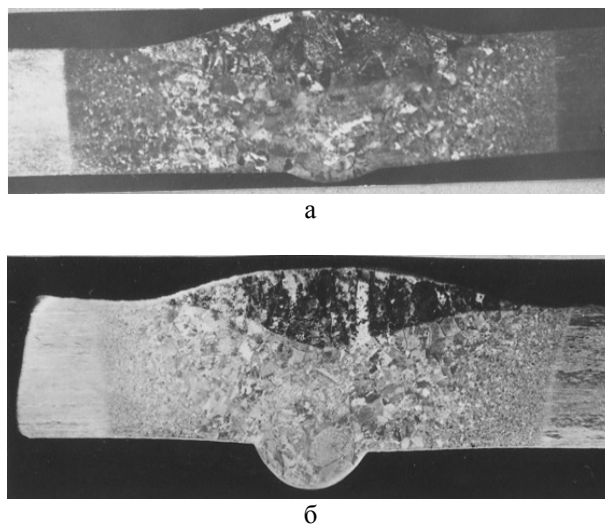


Рис. 2. Макроструктура (x1,8) образцов, сваренного полым катодом (а) и погруженной дугой (б) для толщины 8мм

Представленные на рисунке 3 микроструктуры образцов, выполненных разными способами сварки, имеют аналогичные структуры.

В исследованных соединениях толщиной 5 и 8 мм, сваренных полым катодом в вакууме и погруженной дугой в контролируемой среде аргона, дефектов сварки не обнаружено.

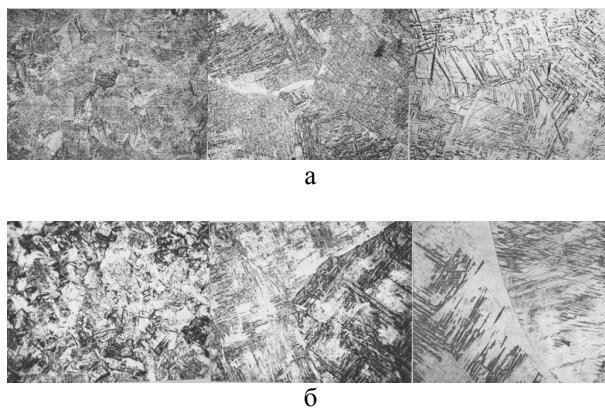


Рис. 3. Микроструктура (x115) образцов, сваренного полым катодом (а) и погруженной дугой (б) для толщины 8мм

После сварки у некоторых пластин происходило повышение прочности шва в сравнении с основным металлом, это является следствием образования пересыщенного раствора α -фазы, который образуется при быстром охлаждении β -фазы, нагретой в процессе сварки выше температуры полиморфного перехода [10].

В процессе длительных нагревов деталей из титановых сплавов происходит диффузия газов вглубь металла, при этом образуется хрупкий газонасыщенный (альфированный) слой металла, который значительно снижает пластичность и работоспособность деталей. Таким образом, имеет место повышение твердости, по сравнению с основным металлом. Это указывает на образование закалочных структур, а именно, α -фазы в объеме бывших β -зерен [11].

Определение наличия газонасыщенного слоя производилось путём замера микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке 50 г и рентгеноструктурным методом. Исследование проводилось на пластинах с синим цветом побежалости после термообработки.

Поверхность пластин толщиной 5 мм характеризуется наличием газонасыщенного слоя глубиной до 0,02 мм.

Результаты замера микротвердости сердцевин и газонасыщенного слоя пластин толщиной 8 мм приведены в таблице 2. Образцы 1 и 2 сварены полым катодом, 3 и 4 сваркой погруженной дугой.

Таблица 2

Результаты замера средней микротвердости

№ обр.	Глубина слоя, мм	Твёрдость, ед. Н	
		Сердцевины	Газонасыщенный слой
1	0,1	329	409
2	0,02	335	395
3	0,02	337	396
4	0,04	347	393

Исследование микротвердости образцов показало, что понижение пластичности на поверхности сварного соединения выше при сварке полым катодом. Но даже после осадки со степенью деформации более 50% на боковой поверхности заготовок, где был альфированный слой, не появилось трещины. Таким образом, не смотря на то, что альфированный слой более хрупкий в сравнении с основным металлом, сварные швы имеют оптимальное значение пластичности, не образуя сетку мелких трещин.

Заключение

Проведенные исследования структуры показали, что макро- и микроструктура пластин, сваренных обоими видами сварки, аналогична и характерна для сварных соединений из сплава ВТ6С, а наличие газонасыщенного слоя не оказывает негативного влияния с образованием трещин.

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения сварки полым катодом для получения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов в производстве.

Литература

1. Южмаш: Емкости, работающие под высоким давлением (шаробаллоны) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yuzhmash.com/production/index/ptn?id=32>. – 11.05.2016.
2. Перерва, В. А. Особенности сварки шаробаллонов в вакууме полым катодом [Текст] / В. А. Перерва, Е. В. Карпович // Космическая техника. Ракетное вооружение: Научно-технический сборник. – 2010. – Вып. 2. – С. 137–150.
3. Senkara, J. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding [Text] / J. Senkara // Welding International. – 2013. – Vol. 27, Issue 3. – P. 184–189. doi: 10.1080/09507116.2011.600028
4. Неровный, В. М. Повышение эффективности дуговой сварки в вакууме титановых сплавов [Текст] / В. М. Неровный // Сварка и диагностика. – 2012. – № 5. – С. 18–22.
5. Nerovnyi, V. M. Hollow cathode arc discharge as an effective energy source for welding processes in vacuum [Text] / V. M. Nerovnyi, A. D. Khakhalev // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, Issue 3. – P. 2452–2459. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035201
6. Goebel, D. M. High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters [Электронный ресурс] / Dan M. Goebel, Emily Chu // Papers of 32nd International Electric Propulsion Conference, Germany, 2011. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-053.pdf. – 20.05.2012.
7. Перерва, В. А. Разработка способа прогнозирования размеров зоны проплавления для технологии сварки полым катодом титановых шаробаллонов [Текст] / В. А. Перерва, Е. В. Карпович, А. В. Федосов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, №. 5(79). – С. 47–52. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.59790
8. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М.: ВИАС-МАТИ, 2009. – 520 с.
9. Microstructure and mechanical properties of microalloyed high-strength transformation-induced plasticity steels [Text] / X. D. Wang, B. X. Huang, L. Wang, Y. H. Rong // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2008. – Vol. 39, Issue 1. – P. 1–7.

doi: 10.1007/s11661-007-9366-4

10. Zhang, M. Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels [Text] / M. Zhang, L. Li, R. Y. Fu, D. Krizan, B. C. De Cooman // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – Vol. 438-440. – P. 296–299. doi: 10.1016/j.msea.2006.01.128

11. Krizan, J. Analysis of the strain-induced martensitic transformation of retained austenite in cold rolled micro-alloyed TRIP steel [Text] / J. Krizan, B. C. De Cooman // *Steel Research International*. – 2008. – Vol. 79, Issue 7. – P. 513–522.

References

1. Yuzhmash: Vessels, which work under high pressure (ball-balloon). Available at: <http://www.yuzhmash.com/production/index/ptn?id=32> (accessed 11.05.2016).

2. Pererva, V. A., Karpovich, E. V. Osobennosti svarki sharoballonov v vakuume polym katodom [Features ball-balloon welding in a vacuum hollow cathode]. *Space technology. Missiles: Scientific and technical collection*, 2010, no. 2, pp. 137–150.

3. Senkara, J. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding. *Welding International*, 2013, no. 27 (3), pp. 184–189. doi: 10.1080/09507116.2011.600028

4. Nerovnyi, V. M. Povyshenie effektivnosti dugovoi svarki v vakuume titanovykh spлавov [Improved arc welding in vacuum of titanium alloys]. *Welding and diagnostic*, 2012, no. 5, pp. 18–22.

5. Nerovnyi, V. M., Khakhalev, A. D. Hollow cathode arc discharge as an effective energy source for welding processes in vacuum. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, no. 41 (3), pp. 2452–2459. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035201

6. Goebel, D. M., Chu, Emily. High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes for High Power Hall Thrusters. *Papers of 32nd International Electric Propulsion Conference, Germany*, 2011. Available at: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2011index/IEPC-2011-053.pdf (accessed 20.05.2012).

7. Pererva, V. A., Karpovich, E. V., Fedosov, A. V. Razrabotka sposoba prognozirovaniya razmerov zony proplavlenniya dlya tekhnologii svarki polym katodom titanovykh sharoballonov [Development of penetration zone size prediction technique for hollow-cathode welding technology of spherical titanium tanks], *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2016, vol. 1, no. 5(79), pp. 47 – 52. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.59790

8. Ilyin, A. A., Kolachev, B. A., Polkin, I. S. *Titanovie splavi. Sostav, struktura, svoystva: Spravochnyk* [Titanium alloys. The composition, structure, properties Reference Guide]. Moscow, VIAS-MATI Publ., 2009. 520 p.

9. Wang, X. D., Huang, B. X., Wang, L., Rong, Y. H. Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed High-Strength Transformation-Induced Plasticity Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 39, no. 1, pp. 1–7. doi: 10.1007/s11661-007-9366-4

10. Zhang, M., Li, L., Fu, R. Y., Krizan, D., De Cooman, B. C. Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 438-440, pp. 296–299. doi: 10.1016/j.msea.2006.01.128

11. Krizan, J., De Cooman, B. C. Analysis of the strain-induced martensitic transformation of retained austenite in cold rolled micro-alloyed TRIP steel. *Steel Research International*, 2008, vol. 79, no. 7, pp. 513–522.

Поступила в редакцию 21.04.2016, рассмотрена на редколлегии 12.05.2016

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЗВАРНОГО ШВА ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПОЛИМ КАТОДОМ ВИСОКОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT6C

В. О. Перерва, О. В. Карпович, В. Г. Бессалій

Розглянуто зварювання високоміцного титанового сплаву VT6C, застосовуваного в конструкціях ракетної і авіаційної техніки. Досліджено вплив режимів зварювання порожнистим катодом в вакуумі на структуру зварних з'єднань. Проаналізовано макроструктуру і мікроструктуру на утворення дефектів. Виконано порівняльний аналіз структури зварних швів, виконаних зварюванням порожнистим катодом і зануреною дугою. Проведено дослідження мікротвердості серцевини і альфірованого шару у зразків, зварених порожнистим катодом. Досліджувано газонасичений шар на наявність тріщин.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, мікроструктура, макроструктура, полий катод, оплавлення крайок.

**STRUCTURE IN WELD WELDING HOLLOW CATHODE
HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY VT6S**

V. A. Pererva, E. V. Karpovich, V. G. Bessaly

Welding is considered a high-strength titanium alloy VT6S, used in the construction of rocket and aviation technology. The effect of welding conditions hollow cathode in a vacuum on the structure of welded joints. Analyzed macrostructure and microstructure on the defects of education. A comparative analysis of the structure of welds performed welding hollow cathode and submerged arc. Investigations of micro-hardness of the core layer and alfirovannogo in samples welded hollow cathode. We studied the gas-saturated layer for cracks.

Key words: high strength titanium alloys, electron beam welding, welding hollow-cathode, microstructure, melting edge.

Перерва Віктор Олександрович – ст. викладач, каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: Pererva.viktor@gmail.com.

Карпович Олена Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: kelv@ua.fm.

Бессалый Всеволод Григорьевич - ведущий специалист лаборатории сварки, Государственное предприятие "ПО ЮМЗ им. А. М. Макарова".

Pererva Viktor – Teacher, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine, e-mail: Pererva.viktor@gmail.com.

Karpovych Elena – PhD, Associate professor, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine, e-mail: kelv@ua.fm.

Bessalov Vsevolod - leading specialist welding laboratory, State Enterprise "Production Association Yuzhny Machine-Building Plant named after A.M. Makarov".