

УДК 621.791

doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-20-28

Изменение структуры и микротвердости неразъемных соединений силовых титановых конструкций из сплава VT23, выполненных электронно-лучевой сваркой

В.В. Григорьев, В.И. Муравьев, П.В. Бахматов

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Changes in the Structure and Microhardness of Permanent Joints of Load-Bearing Structures Made of Titanium Alloy VT23 by Electron Beam Welding

V.V. Grigoriev, V.I. Muravyev, P.V. Bakhmatov

Komsomolsk-on-Amur

Исследование влияния капиллярно-конденсированной влаги, процесса образования сварочной ванны и кристаллизация при электронно-лучевой сварке титановых сплавов на образование специфических дефектов является весьма актуальным. Обзор литературных источников показал, что проблему образования макропор размерами 0,1 мм исследовали многие ученые, но с использованием современных рентгеновских аппаратов при технологическом контроле неразъемных соединений, созданных электронно-лучевой сваркой, вдоль линии сплавления был выявлен специфический дефект — так называемые темные полосы. Представлены результаты сварки на установке 30E3000 деталей из сплава VT23. Проведены анализ результатов радиографического контроля, исследования макро- и микроструктуры и измерения микротвердости по сечению сварного шва в зонах усиления и корня. Сделан вывод о том, какого рода появляется специфический дефект, выдвинута теория о влиянии капиллярной конденсации в виде гидрида титана на возникновение этого дефекта, установлена причина различия микротвердости в зонах усиления и корня сварного шва.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, линия сплавления, пористость, титановые сплавы, капиллярно-конденсированная влага

The study of the influence of capillary-condensed moisture, the process of weld pool formation and crystallization on the formation of specific defects in electron beam welding of titanium alloys is a pressing task. A review of the literature shows that the problem of formation of macropores reaching 0.1 mm was investigated by many researchers, but the advent of modern x-ray machines allowed detecting a particular defect along the fusion line, the so-called dark stripes, during in-process control of permanent joints created by electron beam welding. The results of welding the alloy VT23 using an electronic beam welding machine 30E3000 are presented in the article. An analysis of the results of the radiographic control, a study of macro- and microstructure and measurements of microhardness of the cross section of the weld joint in the areas of strengthening and the weld root are performed. A conclusion about the type of the defect is made, a theory describing the effect of capillary condensation in the form of titanium hydride on the occurrence of the defect is put forward, and the reason for the difference in microhardness in the areas of strengthening and the weld root is established.

Keywords: electron beam welding, fusion line, porosity, titanium alloys, capillary-condensed moisture

Известно, что процесс сварки плавлением происходит при образовании сварочной ванны с последующей кристаллизацией жидкой фазы расплавленного металла под действием источника тепла (электрической дуги, электронного луча и др.) [1]. Температура сварочной ванны неравномерная, она достигает максимум 2300 °С. При этом из-за разницы скоростей теплоотвода и диффузионных процессов в металле шва наблюдается ликвация двух видов — дендритная и зональная. Вследствие разницы температур между сварным швом (СШ) и основным металлом (ОМ) в процессе охлаждения возникают структурные изменения (фазовые превращения) и значительные сварочные напряжения [2–4].

Наряду с известными особенностями сварки плавлением электронно-лучевой сварке (ЭЛС) присущи такие специфические дефекты, как неравномерное проплавление корня шва, корневые дефекты, глубокие кратеры и крупные раковины [5–9]. Самым распространенным дефектом при ЭЛС является пористость, которая может привести к усталостному разрушению сварных образцов. При этом возникают поры преимущественно малых размеров (0,1...1,2 мм). В большинстве случаев пористость фиксируется вблизи зоны сплавления. Микропористость, не выявляемая рентгеновским контролем, оказывает заметное влияние на предел усталостной прочности соединений [10].

В работе [11] рентгенографическими исследованиями и исследованиями макро- и микроструктуры обнаружено, что между включениями вольфрама и СШ имеется четкая граница, а для нерасплавленной вставки ее не существует. О начале плавления металла по границе зерен свидетельствует нерасплавленная вставка, в которой имеются поры. При использовании установки ГСПД-2 перемешивание расплава погруженным электродом позволило исключить порообразование и увеличить проплавляющую мощность [12–14].

В работах [14–16] установлено, что при электроимпульсном разряде в зоне контакта на поверхности титанового сплава происходит его разогрев с последующим плавлением и взрывом, сопровождающимся выбросом из точки плавления расплава и охлаждением исходной

нерасплавленной кромки, что приводит к образованию наплыва.

Цель работы — выявить изменения макро-, микроструктуры и микротвердости СШ и зоны термического влияния (ЗТВ) титанового сплава BT23 после ЭЛС на электронно-лучевой установке (ЭЛУ) 30E3000.

Методика проведения исследований. Для исследования макро- и микроструктуры СШ и ЗТВ провели ЭЛС образца из сплава BT23 толщиной $\delta = 50$ мм на ЭЛУ 30E3000 (рис. 1) без подготовки стыкуемых кромок под сварку на следующем режиме: ток сварки — 415 мА, ток фокусировки — 585 мА, ускоряющее напряжение — 60 кВ, скорость сварки — 7 мм/с, рабочее давление — $1 \cdot 10^{-3}$ Па, расстояние от торца пушки до детали — 200 мм.

Техническая характеристика ЭЛУ 30E3000

Мощность луча, кВт 30
Ускоряющее напряжение, кВ 60
Перемещение манипулятора по осям $x/y/z$, мм 3000/2000/2000
Скорость перемещения, мм/с 0,1...50
Габаритные размеры вакуумной камеры, мм 4000×3000×3000

После сварки образец раскроен на заготовки (рис. 2) на установке компании Danobat для последующих контроля качества (см. рис. 1), исследований микро- и макроструктуры, измерений микротвердости по сечению СШ и ОМ. Исследования микро- и макроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Nikon ECLIPSE и растровом электронном микроскопе Hitachi S 3400-N, измерение микротвердости — на микротвердометре Shimadzu HNV-2. Визуально-измерительный и радиографический контроль проводили с помощью радиографического комплекса ЭКСТРАВОЛЬТ-225.

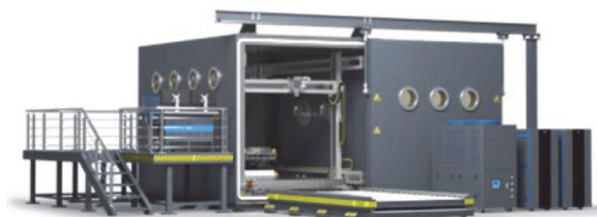


Рис. 1. Внешний вид ЭЛУ 30E3000

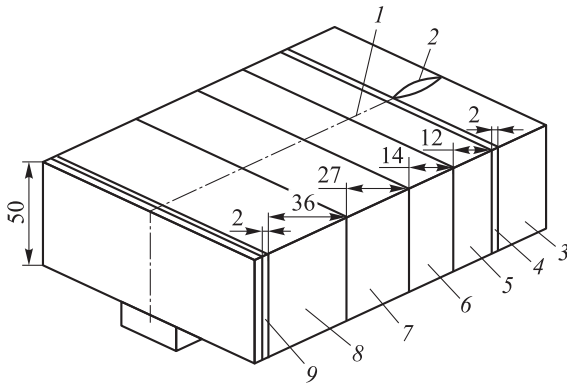


Рис. 2. Общий вид заготовки из сплава ВТ23 с указанием габаритов раскроя на образцы для исследования дефектов и микроструктуры: 1 — шов; 2 — технологический кратер; 3 — образец № 1; 4 — образец № 2; 5 — образец № 3; 6 — образец № 4; 7 — образец № 5; 8 — образец № 6; 9 — образец № 7

Техническая характеристика рентгеновского аппарата ЭКСТРАВОЛЬТ-225

Максимальное напряжение на трубке, кВ	225
Максимальный анодный ток трубки, мА	20
Максимальная мощность на аноде трубки, Вт	3000
Глубина просвечивания по стали, мм	76
Пределы регулировки высокого напряжения, кВ, с шагом 0,1 кВ	10...225
Пределы регулировки тока трубки, мА, с шагом 0,1 мА	0,5...20,0

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ рентгенограмм, полученных с помощью радиографического контроля (рис. 3), показал наличие специфического дефекта в виде темных полос по линиям сплавления в двух образцах (№ 7 и 3), скопления пор в усилении СШ в образце № 2 и несплавления в образце № 4. Причем в образце № 2 присутствуют цепочки пор, переходящие в темные полосы по глубине СШ (рис. 4).

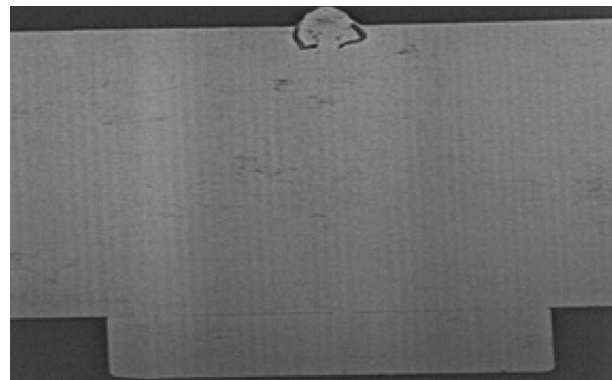
Необходимо отметить появление темных полос на механически обработанной поверхности шероховатостью Ra более 12,5 мкм, что может привести к неточности оценки качества СШ.

Исследование распределения дефектов по глубине СШ (см. рис. 4) выявило наличие дефектов при толщине образцов $\delta = 2...14$ мм (образцы № 7, 2, 3 и 4) и их отсутствие при $\delta = 27$ и 36 мм (образцы № 5 и 6).

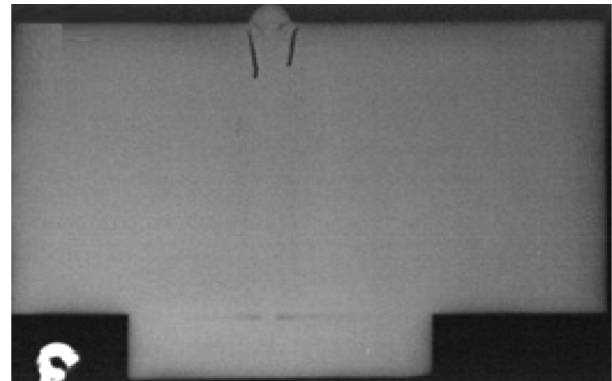
Исследованиями макроструктуры обнаружены поры, расположенные по линии сплавления по всей глубине СШ (рис. 5). Следует отме-

тить наличие пор в усилении СШ, обнаруженных после исправлении дефекта вогнутости.

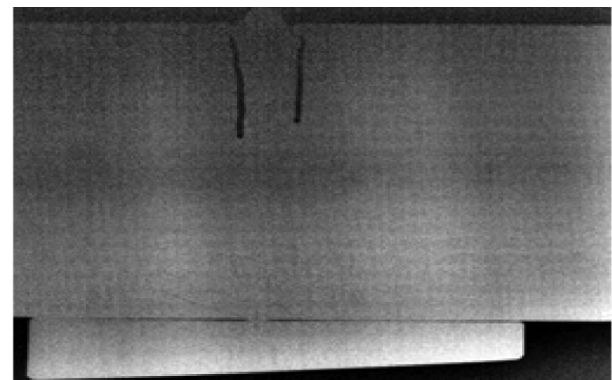
Исследованиями оптической микроскопии установлено, что поры в основном образуются по границам зерен в зоне сплавления СШ и ОМ (рис. 6). Причем размер некоторых пор составляет менее 0,1 мм, что практически невозможно выявить на рентгеновских снимках, полученных с помощью традиционно применяемых рентгеновских аппаратов. Обнаружена также незаконченная коагуляция (рис. 6, д), свидетельствующая о том, что высокая скорость сварки и особенности формирования парогазо-



a



б



в

Рис. 3. Рентгенограммы образцов № 2 (а), 3 (б) и 7 (в)

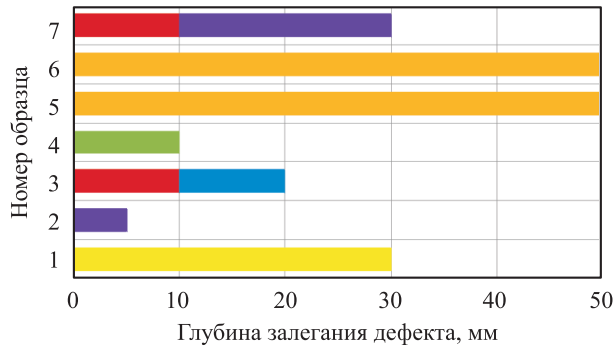


Рис. 4. Гистограмма залегания дефектов по толщине СШ ($\delta = 50$ мм) образцов, полученная с помощью радиографического контроля:
 — темные полосы; — цепочки пор;
 — несплавление; — непровар;
 — скопление пор; — нет четкости

вого канала не обеспечили выход зародышей пор из расплава сварочной ванны.

В целях исследования особенности формирования структуры металла в зонах усиления и корня СШ, установления рода специфического дефекта в виде темных полос и их влияния на сварные конструкции изготовили макрошлиф

указанных зон для последующего анализа микроструктуры и сравнения их микротвердости.

Исследованиями электронной микроскопии установлено наличие мелких пор, достигающих в диаметре 3 мкм, расположенных вдоль линии сплавления по направлению к корню СШ (рис. 7). Размеры пор указаны на рис. 7, з.

Известно [17], что пористость вызвана механической подготовкой поверхности, способствующей заполнению капиллярно-конденсированной влагой. Характер распределения пор по объему СШ неодинаков, особенно в зонах с низкой температурой свариваемых кромок (в зонах усиления и корня шва). Также закономерность приводит к плавлению границ зерен и сосредоточению капиллярно-конденсированной влаги в расплаве металла и к интенсивной кристаллизации.

Исследованием распределения микротвердости по сечению СШ в зонах усиления и корня установлено, что в зоне усиления СШ практически идентичен ОМ (средняя микротвердость составила 478 НВ), в зоне корня СШ по показателю микротвердости ниже почти на 20 %

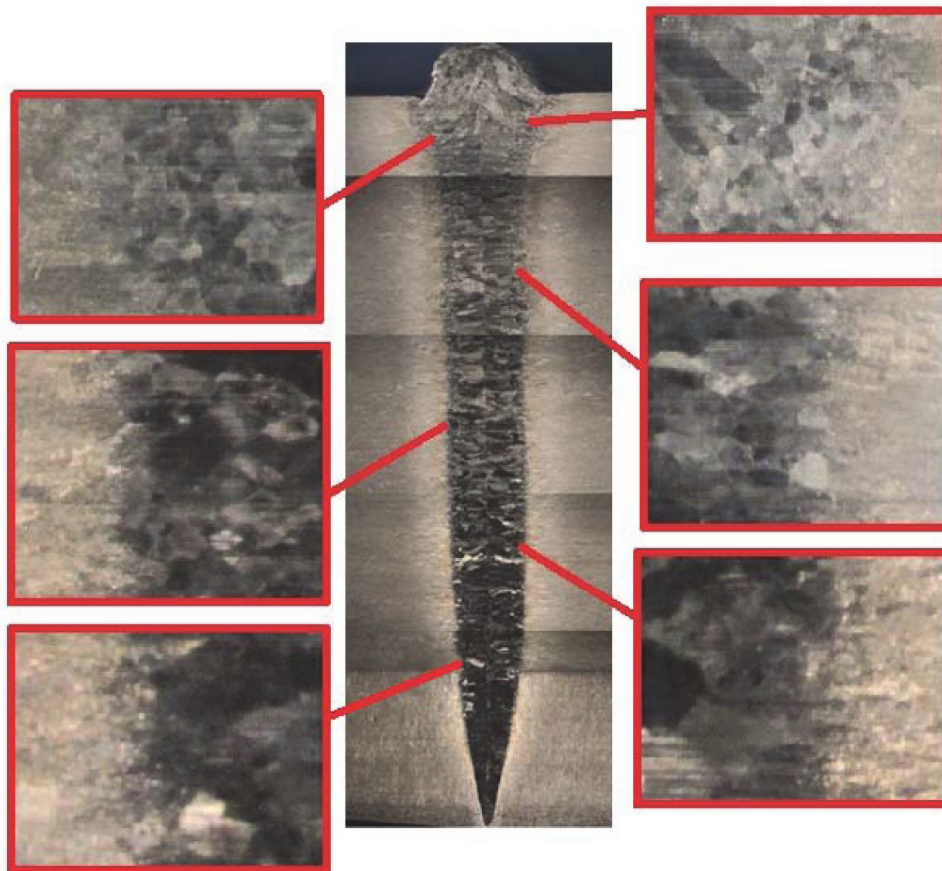


Рис. 5. Макроструктура образца № 5 с распределением пор по зонам сплавления

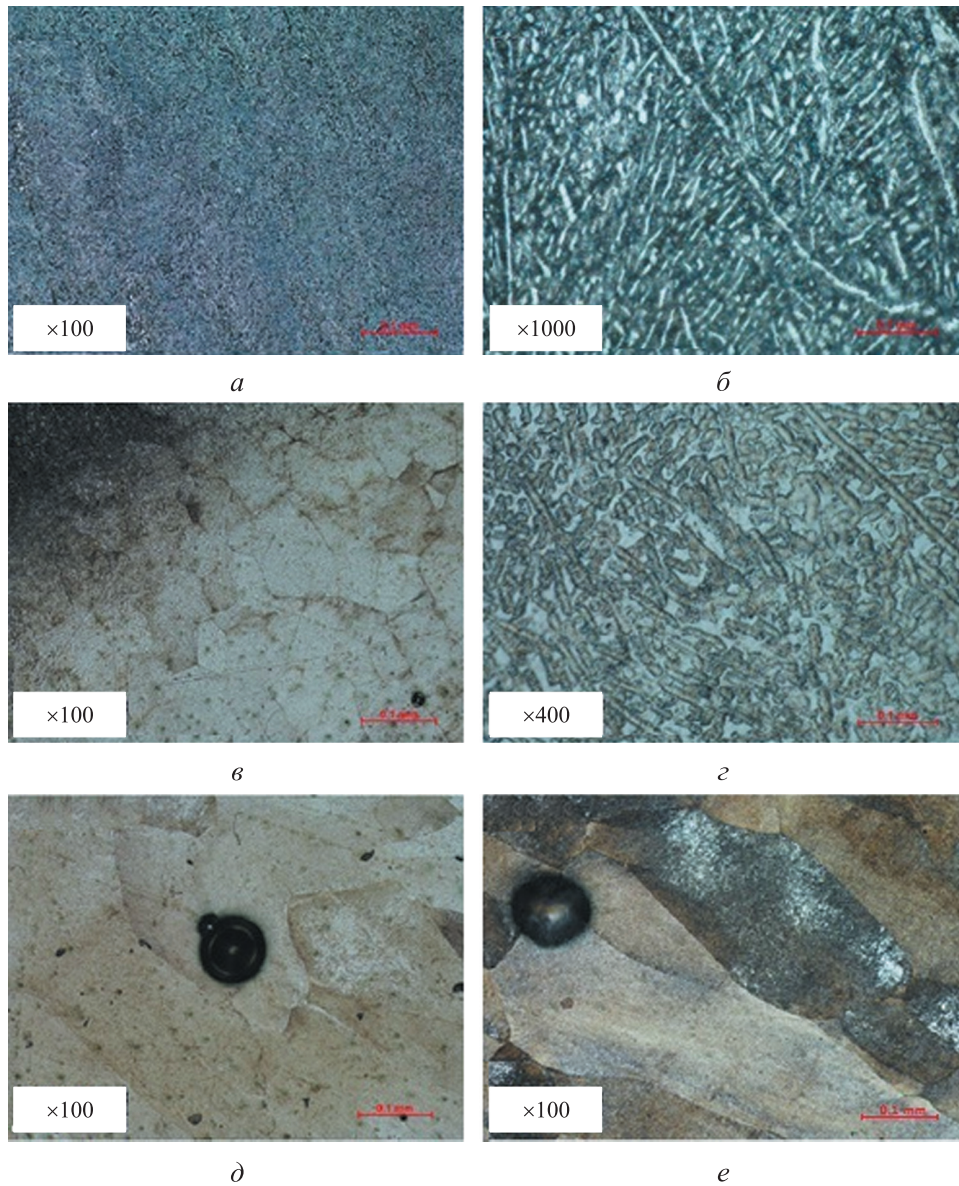


Рис. 6. Микроструктура зон:
 а, б — ОМ; в, г — СШ; д, е — поры, расположенные по линии сплавления

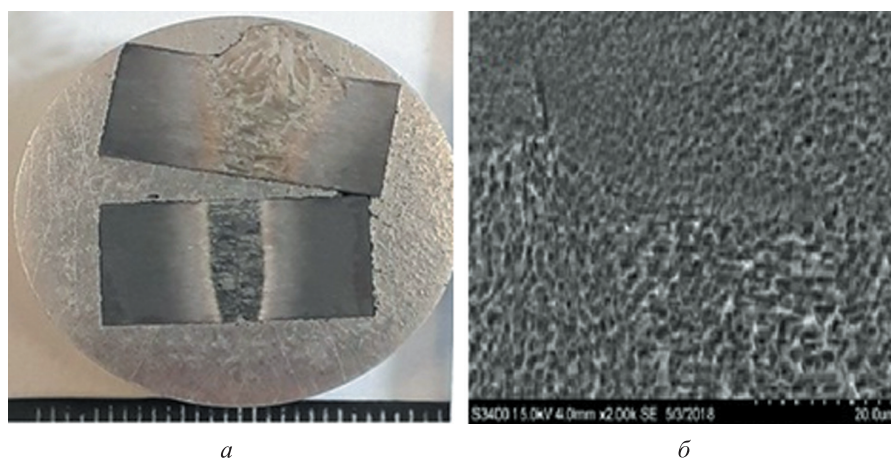


Рис. 7 (начало). Общий вид макрошлифа зон усиления и корня СШ (а) и растровая электронная микроскопия по зонам:
 б — граница сплавления в усилении СШ

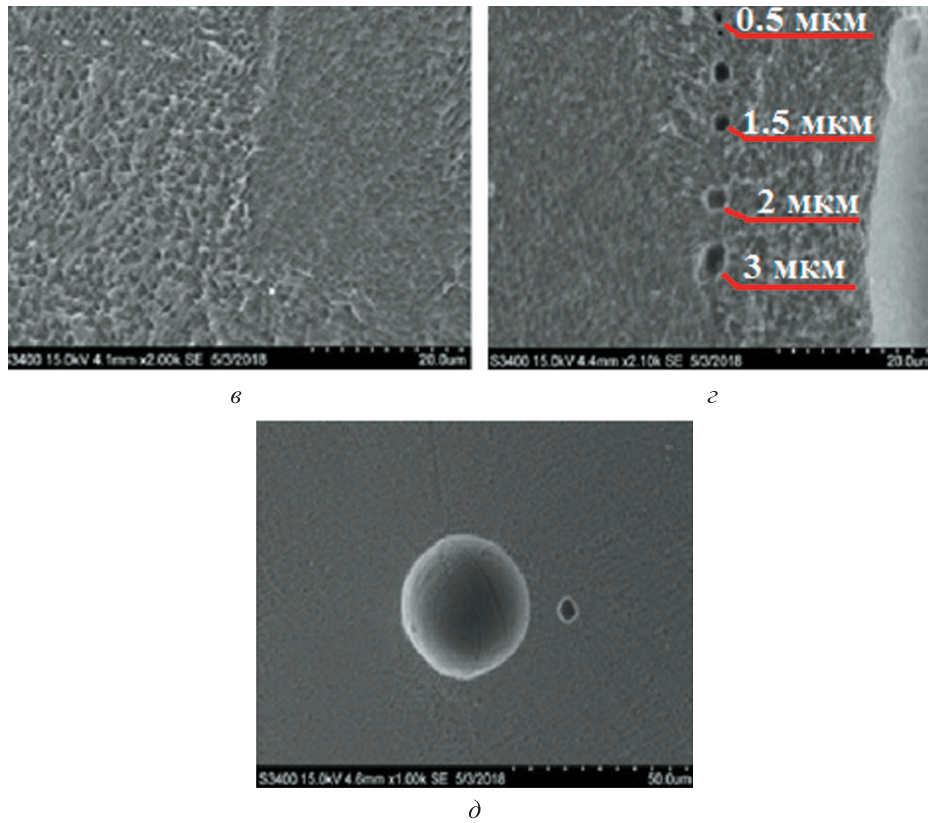


Рис. 7 (окончание). Общий вид макрошлифа зон усиления и корня СШ (а) и растровая электронная микроскопия по зонам:
 в — граница сплавления в усилении СШ; з, д — пористость пор, расположенных по линии сплавления СШ в направлении корня

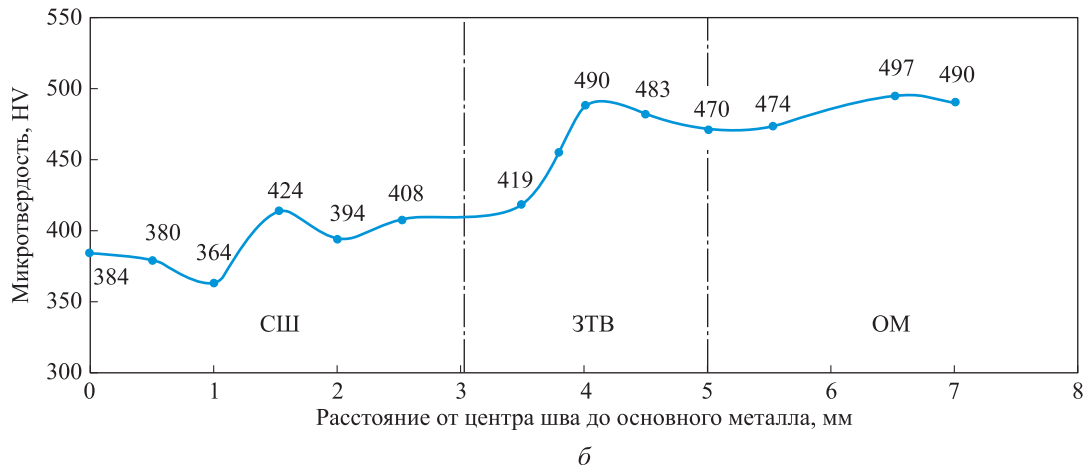
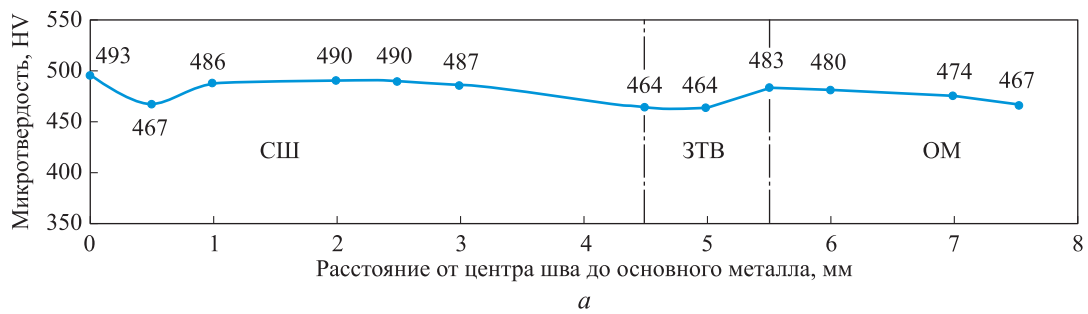


Рис. 8. Распределение микротвердости по зонам СШ:
 а — усиление СШ; б — корень СШ

(рис. 8). Такая закономерность связана со структурными изменениями в процессе сварки и с последующей повторной подваркой усиления СШ при исправлении вогнутости, что свидетельствует о возможности использования повторного нагрева расфокусированным электронным лучом для получения свойств СШ, идентичных свойствам ОМ.

Выводы

1. По результатам исследования образцов после ЭЛС на установке 30Е3000, включавшего в себя рентгенографический контроль, макро- и микроисследования и определение микротвердости по сечению сварного шва в зонах усиления и корня, установлено следующее:

- появление микропористости связано с неудовлетворительной подготовкой стыкуемых кромок под сварку, обусловленной попаданием продуктов капиллярно-конденсированной влаги в расплав в зоне плавления по границам зерен и, возможно, распадом влаги с образованием пор, заполненных гидридом титана;

- чувствительность рентгенографического комплекса ЭКСТРАВОЛЬТ-225 позволяет выявлять темные полосы, которые представляют собой цепочки мелких пор размером 2...3 мкм, расположенных вдоль линий сплавления, обнаруженные растровой электронной микроскопией (см. рис. 7, з);

- темные полосы также могут иметь вид следов механической обработки с шероховатостью Ra более 12,5 мкм;

- микротвердость в зоне исправления вогнутости усиления подваркой идентична микротвердости ОМ, микротвердость в зоне корня на 20 % ниже значений микротвердости ОМ, что свидетельствует о возможности использования повторного нагрева расфокусированным электронным лучом для получения свойств СШ, идентичных свойствам ОМ.

2. Необходимы дальнейшие исследования формирования СШ и парогазового канала при ЭЛС, влияния наличия гидрида титана на образование несвойственного дефекта, а также ЭЛС титанового сплава ВТ20.

Литература

- [1] Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова Думка, 1986. 240 с.
- [2] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Долотов Б.И. *Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов*. Москва, Эком, 2009. 752 с.
- [3] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Дебеляк А.А. Определение возможности расчета остаточных деформаций по тепловым полям при сварке тонких пластин встык. *Ученые записки КнАГТУ*, 2010, № IV 1(4), с. 68–80.
- [4] Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, МИСИС, 2005. 432 с.
- [5] Папуша А.Г., Андреев А.Н. Анализ дефектов в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, т. 1, № 13, с. 424–426.
- [6] Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Кинетика взаимодействия частиц в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. *Сварочное производство*, 2012, № 12, с. 18–22.
- [7] Шевелев А.Д., Замков В.Н., Гуревич С.М. Особенности электронно-лучевой сварки сплава ВТ6 больших толщин. *Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Сб. докл. 1-й Всесоюзн. конф.*, Киев, Наукова Думка, 1980, с. 306–310.
- [8] Шевелев А.Д., Замков В.Н., Локшин В.Е. Однопроходная электронно-лучевая сварка листов титана больших толщин в нижнем положении. *Автоматическая сварка*, 1980, № 4, с. 69–70.
- [9] Fishgoit A.F., Kolachev V.A., Mamaev A.A., Shtemler Y.M. Diffusion of hydrogen during and after electron beam welding titanium alloys. *Welding International*, 1993, no. 3, pp. 230–233, doi: 10.1080/09507119309548380
- [10] Брагухин А.Г., ред. *Штамповка, сварка, пайка и термообработка титана и его сплавов в авиастроении*. Москва, Машиностроение, 1997. 600 с.
- [11] Муравьев В.И., Шаробарин В.Г., Богатов Ю.Д. Оценка качества сварных шпангоутов из сплава ВТ20. *Авиационная промышленность*, 1986, № 5, с. 75–77.

- [12] Долотов Б.И. *Сварка погруженным вольфрамовым электродом*. Москва, Машиностроение, 2004. 208 с.
- [13] Горынин И.В., Чечулин Б.Б. *Титан в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1990. 400 с.
- [14] Долотов Б.И., Муравьев В.И., Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Макаров К.А. Перемешивание металла в ванне при сварке погруженным вольфрамовым электродом. *Сварочное производство*, 1998, № 2, с. 15–16.
- [15] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Плетнев Н.О., Дебеляк А.А. Влияние напряженного состояния на структуру и свойства при сварке конструкций из сталей и сплавов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2016, т. 59, № 4, с. 251–255, doi: 10.17073/0368-0797-2016-4-251-255
- [16] Sansonnets L., Haidar J. Lowke J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, vol. 33, pp. 148–157, doi: 10.1088/0022-3727/33/2/309
- [17] Редчиц В.В., Фролов В.А., Лукин В.И., Казаков В.А. *Пористость при сварке цветных металлов*. Москва, Издательский центр Технология машиностроения, 2002. 448 с.

References

- [1] Gurevich S.M., Zamkov V.N., Blashchuk V.E. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego splavov* [Metallurgy and welding technology of titanium and its alloys]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1986. 240 p.
- [2] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Dolotov B.I. *Obespecheniye nadezhnosti konstruksiy iz titanovykh splavov* [Ensuring the reliability of structures made of titanium alloys]. Moscow, Ekom publ., 2009. 752 p.
- [3] Murav'yev V.I., Bakhmatov P.V., Debelyak A.A. Definition of an opportunity to calculate residual deformations on thermal fields at welding thin plates end-to-end. *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*, 2010, no. 4 1(4), pp. 68–80 (in Russ.).
- [4] Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow MISIS publ., 2005. 432 p.
- [5] Papusha A.G., Andreyev A.N. Analysis of defects in weld connections implemented by electron-beam welding. *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2017, vol. 1, no. 13, pp. 424–426 (in Russ.).
- [6] Novokreshchenov V.V., Rodyakina R.V. Kinetics of particle interactions in penetration channel at electron-beam welding. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2012, no. 12, pp. 18–22 (in Russ.).
- [7] Shevelev A.D., Zamkov V.N., Gurevich S.M. Features of electron beam welding of VT6 alloy of large thickness. *Aktual'nyye problemy svarki tsvetnykh metallov. Sbornik dokladov 1-y Vsesoyuznoy konferentsii* [Actual problems of welding of non-ferrous metals. Collection of reports of the 1st all-union conference]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1980, pp. 306–310.
- [8] Shevelev A.D., Zamkov V.N., Lokshin V.E. Single-pass electron-beam welding of titanium sheets of large thickness in the lower position. *Avtomaticheskaya svarka*, 1980, no. 4, pp. 69–70 (in Russ.).
- [9] Fishgoit A.F., Kolachev B.A., Mamaev A.A., Shtemler Y.M. Diffusion of hydrogen during and after electron beam welding titanium alloys. *Welding International*, 1993, no. 3, pp. 230–233, doi: 10.1080/09507119309548380
- [10] *Shtampovka, svarka, payka i termoobrabotka titana i ego splavov v aviastroenii* [Stamping, welding, brazing and heat treatment of titanium and its alloys in aircraft industry]. Ed. Bratukhin A.G. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1997. 600 p.
- [11] Murav'yev V.I., Sharobarin V.G., Bogatov Yu.D. Quality assessment of welded frames of alloy VT20. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1986, no. 5, pp. 75–77 (in Russ.).
- [12] Dolotov B.I. *Svarka pogrzhennym vol'framovym elektrodom* [Tungsten Electrode Welding]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2004. 208 p.
- [13] Gorynin I.V., Chechulin B.B. *Titan v mashinostroyenii* [Titanium in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1990. 400 p.

- [14] Dolotov B.I., Murav'yev V.I., Mar'in B.N., Ivanov Yu.L., Makarov K.A. Mixing metal in the bath during welding with a submerged tungsten electrode. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1998, no. 2, pp. 15–16 (in Russ.).
- [15] Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Pletnev N.O., Develyak A.A. Influence on the stress state on the structure and properties of welded steel and alloy structures. *Steel in Translation*, 2016, no. 4, pp. 256–259, doi: 10.3103/S0967091216040070
- [16] Sansonnets L., Haidar J. Lowke J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, vol. 33, pp. 148–157, doi: 10.1088/0022-3727/33/2/309
- [17] Redchits V.V., Frolov V.A., Lukin V.I., Kazakov V.A. *Poristost' pri svarke tsvetnykh metallov* [Porosity when welding non-ferrous metals]. Moscow, Tekhnologiya mashinostroyeniya publ., 2002. 448 p.

Статья поступила в редакцию 18.11.2018

Информация об авторах

ГРИГОРЬЕВ Владимир Владимирович — ведущий инженер кафедры «Машиностроение и металлургия». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

МУРАВЬЁВ Василий Илларионович — доктор технических наук, профессор-консультант кафедры «Машиностроение и металлургия». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина д. 27, e-mail: vmuravyev@mail.ru).

БАХМАТОВ Павел Вячеславович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение и металлургия». Комсомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

Information about the authors

GRIGORIEV Vladimir Vladimirovich — Leading Engineer, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

MURAVYEV Vasilii Illarionovich — Doctor of Science (Eng.), Consulting Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: vmuravyev@mail.ru).

BAKHMATOV Pavel Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Department, Mechanical Engineering and Metallurgy. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: mim@knastu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Изменение структуры и микротвердости неразъемных соединений силовых титановых конструкций из сплава VT23, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 1, с. 20–28, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-20-28

Please cite this article in English as:

Grigoriev V.V., Muravyev V.I., Bakhmatov P.V. Changes in the Structure and Microhardness of Permanent Joints of Load-Bearing Structures Made of Titanium Alloy VT23 by Electron Beam Welding. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 1, pp. 20–28, doi: 10.18698/0536-1044-2019-1-20-28