

Анализ причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава

В. Ю. Рюшин¹, С. А. Чевычелов² ✉

¹ Тураевское машиностроительное конструкторское бюро "Союз",
тер. промзона Тураево, стр. 10, Московская область, г. Лыткарино 140080, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является выявление причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава.

Методами цветной дефектоскопии, рентгеноскопии и исследованием шлифов рассмотрены и изучены особенности микроструктуры сварного соединения корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава. Выявлены причины возникновения трещин корпусов сосудов высокого давления, которыми являются совокупность внутренних напряжений и особенности конструкций.

Результаты. Исходя из анализа микроструктуры вырезанных образцов следует, что штамповка силового элемента поставлялась без предварительной термообработки. Образование очагов трещин на внутренней поверхности силового элемента, в месте перехода сплава в район площадки крепления, в первую очередь связано с большими объемными внутренними напряжениями, которые дополнительно суммируются с поверхностными напряжениями от механообработки и термическими напряжениями при сварке. Исходя из полученных данных следует, что при использовании специализированной оснастки с медной подкладкой, обеспечивающей поддув инертного газа, сварочные напряжения в зоне шва уменьшаются на несколько порядков, по сравнению с участком, где оснастка была без медной подкладки.

В результате проведенного исследования выявлено, что причинами возникновения трещин корпусов сосудов высокого давления является совокупность внутренних напряжений вследствие отсутствия предварительной термической обработки силовых элементов из титанового сплава, входящих в состав сосуда высокого давления, а также напряжений, возникающих при сварке силового элемента с обечайками с учетом особенностей конструкции.

Заключение. Для устранения причины возникновения трещин была проведена дополнительная опытная работа, заключающаяся в наплавке ручной АДС усиительного валика в зону максимальных напряжений силового элемента. Предложенное решение оправдало ожидания – все корпуса сосудов высокого давления прошли гидравлические испытания, что позволило сохранить материальную часть.

Ключевые слова: сосуды высокого давления; титановый сплав; силовой элемент изделия; цветная дефектоскопия; рентгеноскопия; шлифы; термообработка; сварочные напряжения.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А. Анализ причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(4): 8-21. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-8-21>.

Поступила в редакцию 28.07.2022

Подписана в печать 19.08.2022

Опубликована 14.10.2022

Causes' Analysis of Cracks During Welding of High-Pressure Vessel Body Made of Titanium Alloy

Vadim Y. Ryumshin ¹, Sergey A. Chevychelov ² ✉

¹ Turaevskoe Machine-Building Design Bureau "Soyuz"
ter. Turaevo industrial zone, building 10, Moscow region, Lytkarino 140080, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

Abstract

Purpose of reseach is to identify the causes of cracks during welding of high-pressure vessel body made of titanium alloy.

Methods. Features of welded joint microstructure of high-pressure vessel body made of titanium alloy are described and studied by color flaw detection methods, fluoroscopy, and examination of the cuts. The causes of cracks in the bodies of pressure vessels are identified. The causes are a combination of internal stresses and structures features.

Results. Based on the analysis of cut samples microstructure, it follows that the stamping of the power element was supplied without preliminary heat treatment. The formation of crack foci on the inner surface of the power element, at the place of alloy transition to the area of the attachment site, is primarily associated with large volumetric internal stresses, which are additionally summed up with surface stresses from machining and thermal stresses during welding. Based on the obtained data, it follows that when using a specialized tooling with a copper backing that provides pressurization of inert gas, welding stresses in a weld area are reduced by several orders of magnitude compared to the area where the tooling was without copper backing. As a result of the study, it was revealed that the causes of cracks in the bodies of high-pressure vessels are a combination of internal stresses due to the lack of preliminary thermal treatment of power elements made of titanium alloy, which are part of a high-pressure vessel, as well as stresses arising during welding of the power element with shells, considering design features.

Conclusion. To eliminate the cause of cracks, additional experimental work was carried out. Surfacing the manual ADF of reinforcing roller into the zone of maximum stresses of the power element was done. The proposed solution met expectations - all the bodies of high-pressure vessels passed hydraulic tests, which made it possible to preserve material part.

Keywords: pressure vessels; titanium alloy; power element of the product; color flaw detection; fluoroscopy; splines; heat treatment; welding stresses.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ryumshin V. Y., Chevychelov S. A. Causes' Analysis of Cracks During Welding of High-Pressure Vessel Body Made of Titanium Alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(4): 8-21 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-4-8-21>.

Received 28.07.2022

Accepted 19.08.2022

Published 14.10.2022

Введение

Одним из основных материалов для производства деталей реактивных двигателей является титан и титановые сплавы, которые по своим физико-механическим свойствам и технологичности превосходят большинство современных конструкционных материалов, включая самые распространенные сталь и алюминий [1,2].

Ключевой проблемой использования титановых сплавов в машиностроении является широкий спектр вопросов, возникающих при сварке данного материала [3-8] в том числе аргонодуговой [9].

При проведении испытаний на предпрятии-изготовителе корпусов сосудов высокого давления, изготовленных из

укомплектованных силовых элементов определенной партии, происходило их разрушение в виде образование трещин в околошовной зоне сварного соединения, соединяющего силовой элемент и обечайку в районе площадки крепления со стороны силового элемента (рис. 1).

В результате визуального осмотра места разрушения после цветной дефектоскопии на обемх поверхностях силового элемента выявлена трещина, локализация которой с внутренней стороны привязана к площадке крепления рядом со варным швом (рис. 2).

Целью исследования является выявление причин возникновения трещин при сварке корпуса сосуда высокого давления из титанового сплава.



Рис. 1. Трещина, возникшая при гидравлических испытаниях в околошовной зоне

Fig. 1. Crack that occurred during hydraulic tests in the near-weld area

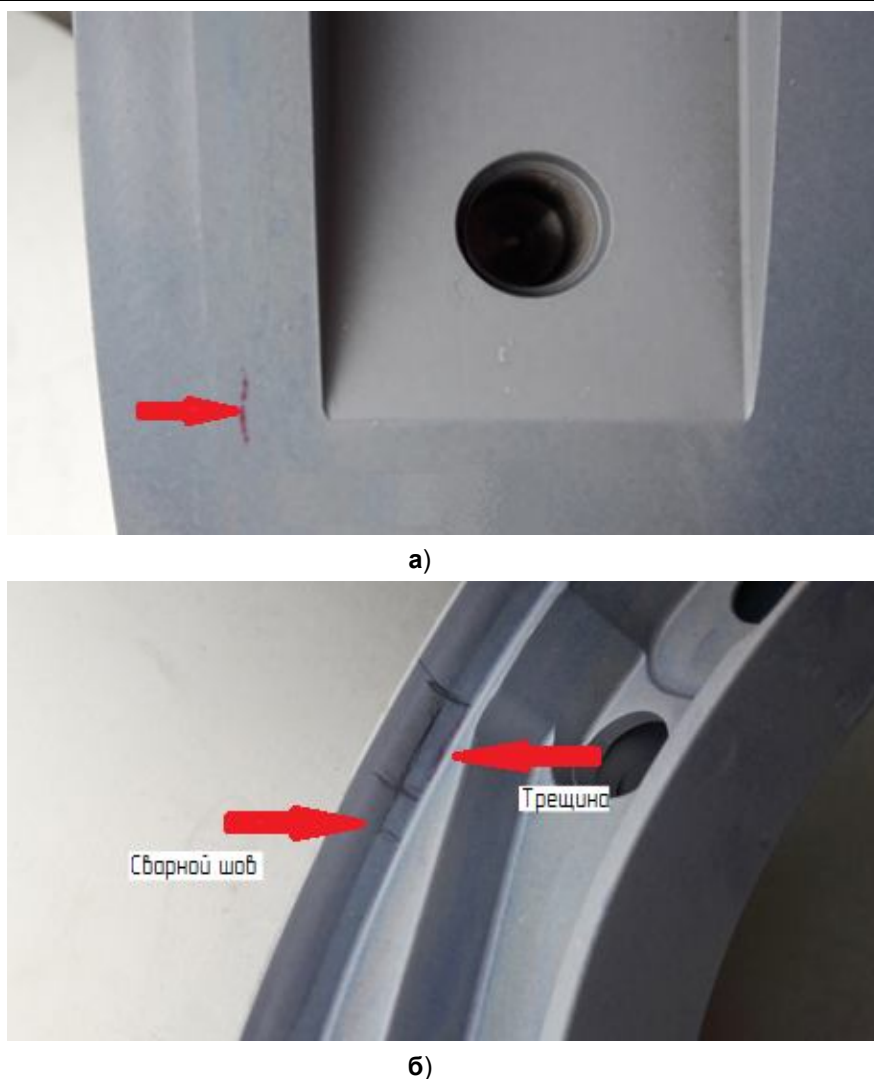


Рис. 2. Вид трещины, выявленный методом цветной дефектоскопии: **а** – наружная поверхность силового элемента; **б** – внутренняя поверхность силового элемента)

Fig. 2. Type of crack detected by color flaw detection: **a** – outer surface of load-bearing element; **b** – inner surface of force element)

Материалы и методы

Наличие влаги в аргоне ведет к повышению содержания водорода в металле шва, к образованию вольфрамовых включений и снижает эксплуатационные характеристики шва. Было проведено измерение точки росы, для определения наличия влаги в баллонах аргона, используемых для сварки корпуса сосуда высокого давления.

При поступлении новой партии газа на предприятие, каждый баллон подвергается проверке на наличие влаги гигрометром, если обнаруживается превышение по содержанию водяных паров, производится кантовка баллона на 24 часа с последующим открытием вентиля и сбросом влаги ¹.

¹ Сварка дуговая сплавов титана в среде защитных газов ПИ 1.4.1898-2003: Производственная инструкция. М.: ОАО НИАТ, 2003. 122 с.

Баллоны, которые используются для сварки корпусов сосудов высокого давления, проходят дополнительную проверку перед сваркой. Баллоны, в которых точка росы выше - 61 градус, не допускаются для сварки данного изделия и отправляются на кантовку, с последующим удалением влаги, после чего

используются для сварки ответственных узлов.

На рентгеновских снимках сварного шва, соединяющего силовой элемент и обечайки, дефектов обнаружено не было.

Проведен визуальный осмотр поверхности кольцевых сварных швов №1 (обечайка + силовой элемент + обечайка) корпуса сосуда высокого давления (рис. 3).

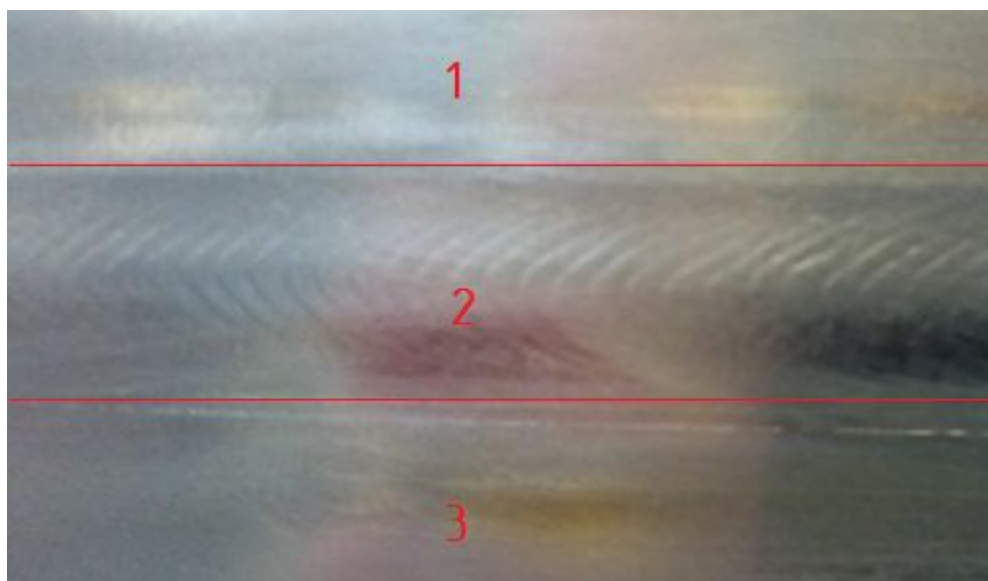


Рис. 3. Внешний вид исследуемого сварного соединения: участки 1 – обечайка; 2 – сварной шов; 3 – силовой элемент

Fig. 3. Appearance of the tested welded joint: sections 1 – shell; 2 – welded joint; 3 – power element

Проверка толщины стенкомером, вырезанного образца силового элемента в месте трещины показала – толщина стенки сплава по всей длине трещины и толщина стенок основного металла в зоне сварки составляет 1.8 мм, что соответствует требованиям конструкторской документации.

Изучена внутренняя поверхность вырезанных образцов. На снимках, сделанных с помощью микроскопа, выявлены множественные очаги зарождения

трещин в районе прилегания площадки крепления силового элемента (рис. 4).

Проверка микроструктуры торцевой части образца показала, что структура сплава неоднородная, зерна разнонаправленные. Микроструктура соответствует 5 баллу (9-балльной шкалы) инструкции № 1054-76 «Металлографический анализ титановых сплавов» (Всероссийский институт авиационных материалов) (рис. 5 – зона трещины, рис. 6 – зона основного металла).

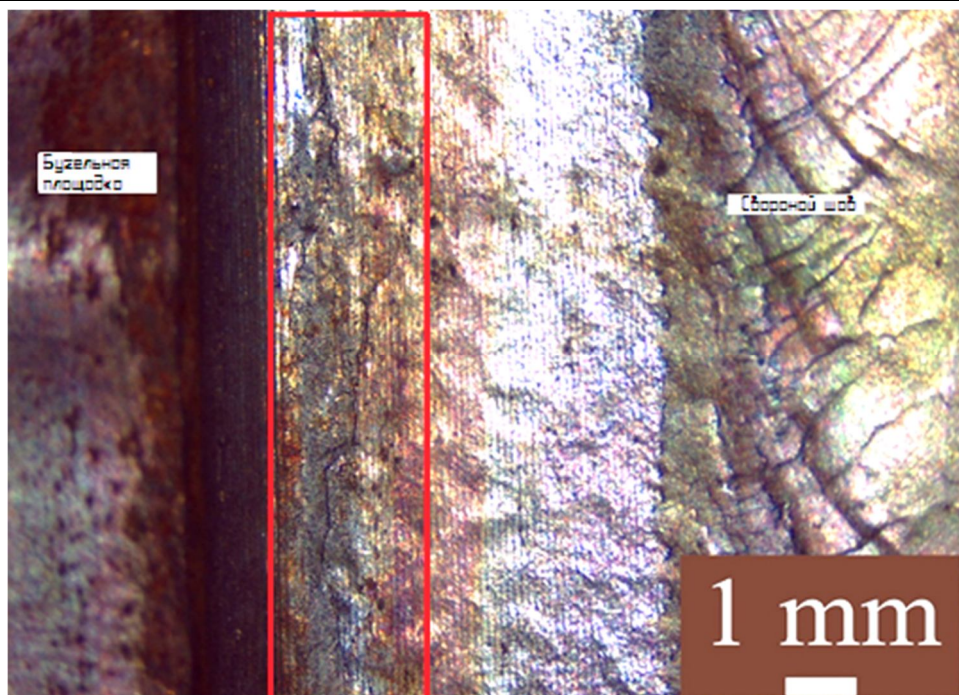


Рис. 4. Места зарождения трещин (внутренняя сторона шва)

Fig. 4. Points of cracks origin (inner side of a weld)

Твёрдость сердцевины сварного шва и поверхностного слоя составляет 390-410 HV, в сравнении с основным металлом, твёрдость которого равна

370-390 HV. Можно сделать вывод, что альфированный слой на поверхности и внутри сварного соединения отсутствует [10].

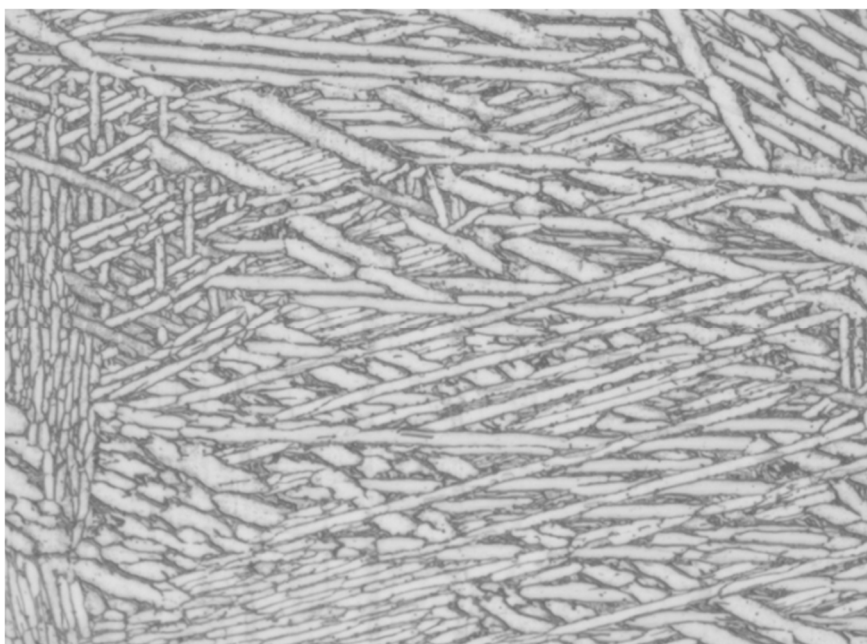


Рис. 5. Микроструктура основного металла

Fig. 5. Base metal microstructure

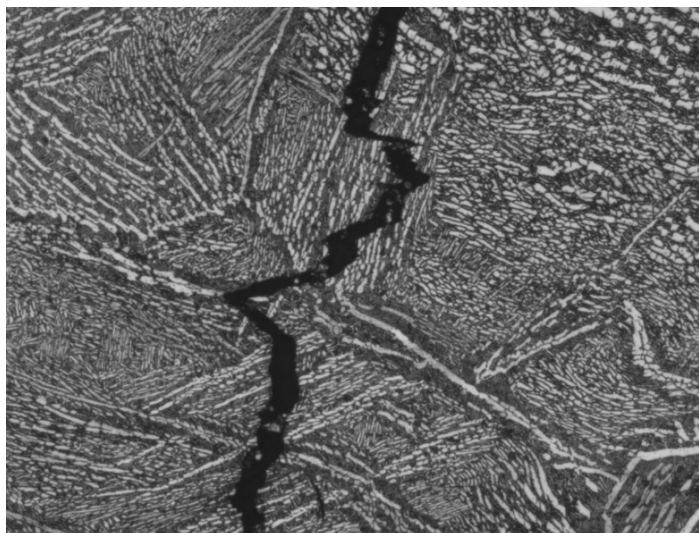


Рис. 6. Микроструктура сплава в зоне трещины

Fig. 6. Alloy microstructure in the crack area

Результаты и их обсуждение

Исходя из анализа микроструктуры вырезанных образцов следует, что штамповка силового элемента поставлялась без предварительной термообработки. Структура силового элемента, не подвергнутого предварительно отжигу, имеет объемно неоднородную макро- и микроструктуру (табл. 1), характеризующуюся большими объемными внутренними напряжениями. Микроструктура после отжига более выровненная и более однородная, по сравнению со структурой сплава, который не прошел термообработку, что увеличивает способность металла к процессу пластической релаксации напряжений [11-16].

Образование очагов трещин на внутренней поверхности силового элемента, в месте перехода сплава в район площадки крепления, в первую очередь связано с большими объемными внутренними напряжениями, которые дополнительно суммируются с поверх-

ностными напряжениями от механообработки и термическими напряжениями при сварке.

Проведенный расчет в специальном программном комплексе SolidWorks [17] позволил установить влияние процесса сварки силового элемента сосуда высокого давления и обечаек на образование напряжений и деформаций в сварном соединении, а также в околошовной зоне и прилегающем металле (рис. 7).

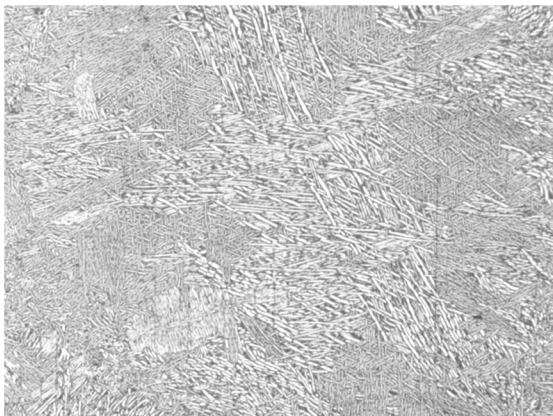
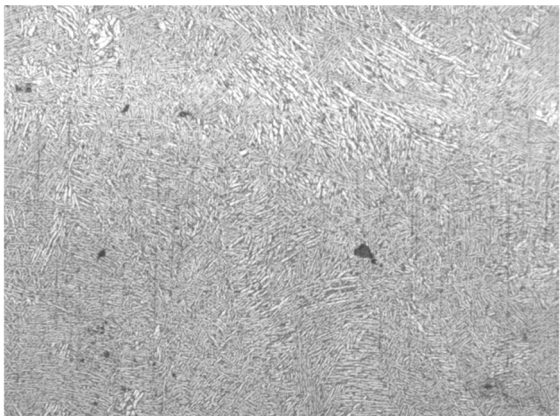
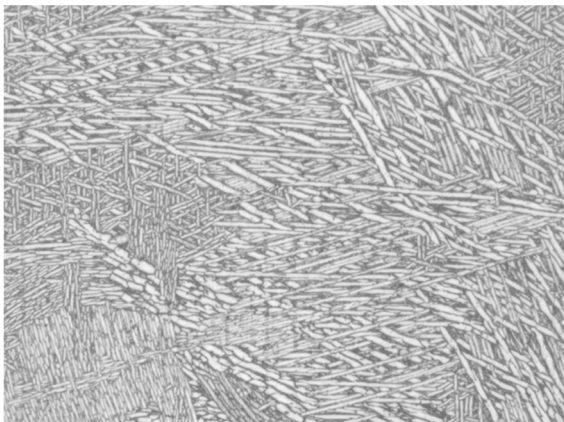
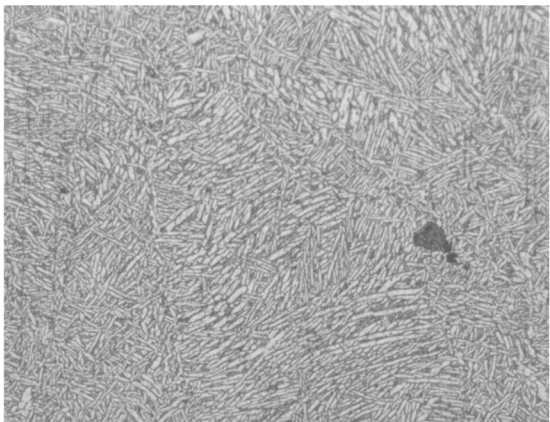
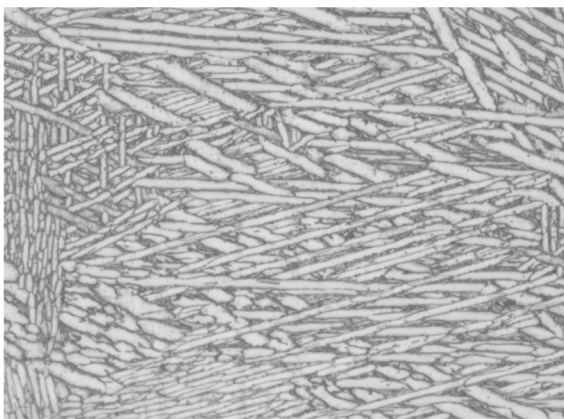
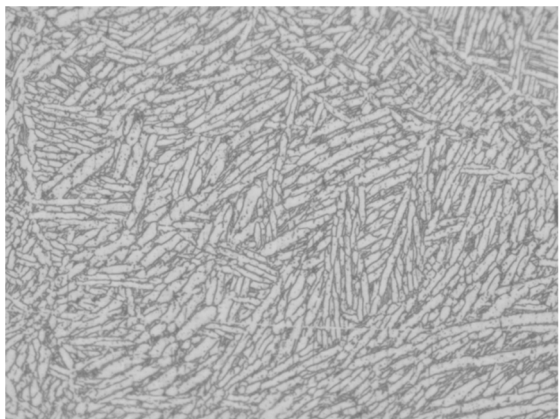
Исходя из полученных данных следует, что при использовании специализированной оснастки с медной подкладкой, обеспечивающей поддув инертного газа, сварочные напряжения в зоне шва уменьшаются на несколько порядков, по сравнению с участком, где оснастка была без медной подкладки, но с учетом особенностей конструкции силового элемента, заключающихся в резком переходе площадки крепления к основному металлу, после сварки остаются эквивалентные напряжения, равные

около 700 МПа, что является критическим показателем напряжений для данного материала даже несмотря на

последующую термообработку после сварки по режиму 640 градусов Цельсия в течение полутора часов [18, 19].

Таблица 1. Микроструктура образцов сплава VT20 (силовой элемент) до и после термообработки

Table 1. Microstructure of VT20 alloy samples (power element) before and after heat treatment

Сплав	Микрошлифы / Microslips	
	До термообработки / Before heat treatment	После термообработки / After heat treatment
X50		
X100		
X200		

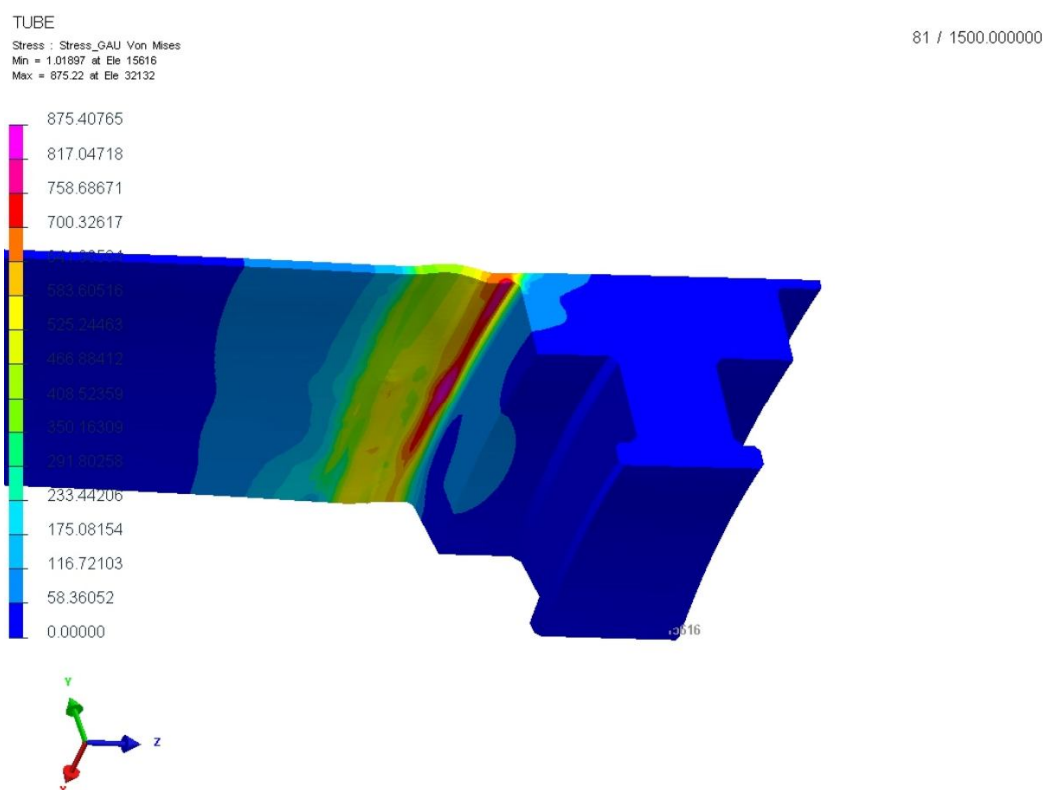


Рис. 7. Расчет остаточных напряжений и деформаций в зоне сварного соединения

Fig. 7. Calculation of residual stresses and deformations in welded joint area

Расчет методом конечных элементов процесса [17] гидравлических испытаний с учетом требований чертежа – нагрузка 500 Н/см^2 , позволил проанализировать поведение корпуса сосуда высокого давления при нагрузках, а также учесть полученные напряжения при испытаниях в суммарных напряжениях всей конструкции, в особенности в местах возникновения трещин. Напряжения в районе площадки крепления, исходя из данных, полученных при расчете, равны 450-490 МПа, средние напряжения по корпусу сосуда высокого давления равны 360-390 МПа.

Выводы

В результате проведенного исследования выявлено, что причинами воз-

никновения трещин корпусов сосудов высокого давления являются совокупность внутренних напряжений вследствие отсутствия предварительной термической обработки силовых элементов из титанового сплава, входящих в состав сосуда высокого давления, а также напряжений, возникающих при сварке силового элемента с обечайками с учетом особенностей конструкции.

С учетом нагрузки, возникающей при гидравлических испытаниях на прочность, суммарные напряжения, даже после термической обработки после сварки, превышают предел прочности материала изделия (BT20), вследствие чего происходит разрушение корпусов сосудов высокого давления в зонах максимальных напряжений (перехода

основного металла в район площадки крепления).

Для устранения причины возникновения трещин была проведена дополнительная опытная работа, заключающаяся в наплавке ручной аргоно-дуговой сваркой усилительного валика в зону

максимальных напряжений силового элемента. Предложенное решение оправдало ожидания – все корпуса сосудов высокого давления прошли гидравлические испытания, что позволило сохранить материальную часть и сократить убытки.

Список литературы

1. Хорев М. А., Хорев А. И. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития // *Материаловедение*. 2005. № 7. С. 25-34. EDN KNXORH.
2. Бабко А. П., Клешина О. Н. Технологические особенности лазерной сварки титановых сплавов // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 года*. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 24-26. EDN NBUAYL.
3. Онучин С. В., Проскурин В. Д. Автоматическая аргонодуговая сварка криволинейных швов изделий из титана // *Промышленность: новые экономические реалии и перспективы развития: сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием): в 2 ч., Оренбург, 17 мая 2017 года*. Оренбург: Агентство Пресса, 2017. С. 232-237. EDN ZNMRZH.
4. Солодков М. Ж., Сеница А. Н. Компьютерное моделирование температурных полей при сварке титана // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Международной научно-технической конференции / редколлегия: М.Е. Лустенков [и др.]*. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2019. С. 169. EDN CZKDWА.
5. Барменков В. В. Особенности сварки титана // *Вестник магистратуры*. 2019. № 1-2(88). С. 74-75. EDN YVSSRN.
6. Owa T., Kondo T., Takizawa H. *Welding Int.* 2010. Vol.24. P. 182-187.
7. Шишкин М. В. Сварка титана // *Научному прогрессу – творчество молодых*. 2018. № 2. С. 55-56. EDN YKWAPB.
8. Улановская А. И., Евин А. М., Бахматов П. В. Исследование влияния качества присадочной проволоки на свойства сварных соединений из сплава ВТ 20 // *Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXI Международной научно-практической конференции: в 2 ч. / под ред. Е.В. Протопопова*. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. С. 335-339. EDN RWYOPB.

9. Технологические особенности сварки титана импульсной дугой / С. А. Соловьёв, В. И. Денисов, Б. А. Матюшкин, А. А. Толкачев // Сварочное производство. 2017. № 3. С. 3-8. EDN WOFJJM.
10. Коломенский А. Б., Шахов С. В., Коломенский Б. А. Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 132-139. EDN YKJXFX.
11. Zhu Z.X., Marimuthu M., Kuzmikova L. et al. Influence of Ti/N ratio on simulated CGHAZ microstructure and toughness in X70 steels // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. Vol. 18, no. 1. P. 45-51.
12. Yan W., Shan Y.Y., Yang K. Influence of TiN inclusions on the cleavage fracture behavior of low-carbon microalloyed steels // Metallurgical and Materials Transactions A. 2007. Vol. 38, no. 6. P. 1211-1222.
13. Echeverría A., Rodriguez-Ibabe J. M. The role of grain size in brittle particle induced fracture of steels // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 346, no. 1-2. P. 149-158. DOI 10.1016/S0921-5093(02)00538-5. EDN KLILV.
14. Влияние термической обработки на формирование структуры и уровень механических свойств высоколегированного титанового сплава / И. Р. Козлова, Е. В. Чудаков, Н. В. Третьякова [и др.] // Вопросы материаловедения. 2019. № 4(100). С. 28-41. DOI 10.22349/1994-6716-2019-100-4-28-41. EDN SQBXNP.
15. Рюмшин В. Ю., Чевычелов С. А. Исследование возможности применения активизирующего флюса для повышения производительности аргонодуговой сварки жаропрочного никелевого сплава ХН60ВТ // Сварочное производство. 2022. № 9. С. 45-49.
16. Структурно-фазовые превращения при сварке высоколегированного сплава титана / В. И. Михайлов, И. Р. Козлова, С. В. Кузнецов [и др.] // Вопросы материаловедения. 2021. № 3(107). С. 63-81. DOI 10.22349/1994-6716-2021-107-3-63-81. EDN UXULMN.
17. Программное обеспечение машинной графики / А.А. Котельников, А.Ю. Головенков, А.С. Натаров, В.Ю. Рюмшин. Курск: Юго-Западный гос. ун-т., 2019. 231 с.
18. Лясоцкая В. С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов / под ред. Б.А. Колачева. М.: Экомет, 2003. 351 с. EDN QMZLMD.
19. Хорев А. И. Основы термической обработки и сварки высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов // Технология машиностроения. 2013. № 8. С. 5-11. EDN RTKTVD.

References

1. Horev M. A., Horev A. I. Titanovye splavy, ih primeneniye i perspektivy razvitiya [Titanium alloys, their application and prospects lit up]. Materialovedeniye, 2005, no. 7, pp. 25-34.

2. Babko A. P., Kleshnina O. N. Tekhnologicheskie osobennosti lazernoj svarki titanovykh splavov [Technological features of laser welding of titanium alloys]. *Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij: materialy II Vserossijskoj nacional'noj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchennyh* [Youth and Science: actual problems of fundamental and applied research. Materials of the II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj universitet Publ., 2019, pp. 24-26. EDN NBUAYL.

3. Onuchin S. V., Proskurin V. D. Avtomaticheskaya argonodugovaya svarka krivolinejnykh shvov izdelij iz titana [Automatic argon arc welding of curved seams of titanium products]. *Promyshlennost': novye ekonomicheskie realii i perspektivy razvitiya. Sbornik statej I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Industry: New economic realities and development prospects: collection of articles of the I All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Orenburg, Agentstvo Pressa Publ., 2017, pp. 232-237. EDN ZNMRZH.

4. Solodkov M. Zh., Sinica A. N. Komp'yuternoe modelirovanie temperaturnykh polej pri svarke titana [Computer simulation of temperature fields during titanium welding]: *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Materials, equipment and resource-saving technologies: Materials of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, 2019, pp. 169. EDN CZKDW.

5. Barmenkov V. V. Osobennosti svarki titana [Features of titanium welding]. *Vestnik magistratury = Bulletin of the Magistracy*, 2019, no. 1-2(88), pp. 74-75. EDN YVSSRN.

6. Owa T., Kondo T., Takizawa H. *Welding Int.* 2010, vol.24, pp. 182-187.

7. Shishokin M. V. Svarka titana [Welding of titanium]. *Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodyh = Scientific progress – creativity of the young*, 2018, no. 2, pp. 55-56. EDN YKWAPB.

8. Ulanovskaya A. I., Evin A. M., Bahmatov P. V. Issledovanie vliyaniya kachestva prisadochnoj provoloki na svoystva svarnykh soedinenij iz splava VT 20 [Investigation of the influence of the quality of filler wire on the properties of welded joints made of alloy VT 20]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Trudy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Metallurgy: Technologies, innovations, quality. Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference]. Novokuzneck: Sibirskij gosudarstvennyj industrial'nyj universitet Publ., 2019, pp. 335-339. EDN RWYOPB.

9. Solov'ev S. A., Denisov V. I., Matyushkin B. A., Tolkachev A. A. Tekhnologicheskie osobennosti svarki titana impul'snoj dugoj [Technological features of titanium pulsed arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2017, no. 3, pp. 3-8. EDN WOFJMM.

10. Kolomenskij A. B., Shahov S. V., Kolomenskij B. A. Vliyanie gazonasyshchennyh sloyov i oksidnyh plyonok na udarnuyu vyazkost' titanovyh splavov razlichnyh grupp prochnosti [The effect of gas-saturated layers and oxide films on the impact strength of titanium alloys of various strength groups]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2017. vol. 13, no. 2, pp. 132-139. EDN YKJXFX.
11. Zhu Z.X., Marimuthu M., Kuzmikova L. et al. Influence of Ti/N ratio on simulated CGHAZ microstructure and toughness in X70 steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 45-51.
12. Yan W., Shan Y.Y., Yang K. Influence of TiN inclusions on the cleavage fracture behavior of low-carbon microalloyed steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 38, no. 6, pp. 1211-1222.
13. Echeverría A., Rodriguez-Ibabe J. M. The role of grain size in brittle particle induced fracture of steels. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 346, no 1-2, pp. 149-158. DOI 10.1016/S0921-5093(02)00538-5. EDN KLIILV.
14. Kozlova I. R., CHudakov E. V., Tret'yakova N. V. [i dr.]. Vliyanie termicheskoy obrabotki na formirovanie struktury i uroven' mekhanicheskikh svojstv vysokolegirovannogo titanovogo splava [The effect of heat treatment on the formation of the structure and the level of mechanical properties of a high-alloy titanium alloy]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of Materials Science*, 2019, no.4(100), pp. 28-41. DOI 10.22349/1994-6716-2019-100-4-28-41. EDN SQBXNP.
15. Ryumshin V. Yu., Chevychelov S. A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya aktiviruyushchego flyusa dlya povysheniya proizvoditel'nosti argonodugovoj svarki zharoprochnogo nikellevogo splava HN60VT [Investigation of the possibility of using an activating flux to increase the productivity of argon arc welding of heat-resistant nickel alloy HN60W]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2022, no. 9, pp. 45-49.
16. Mihajlov V. I., Kozlova I. R., Kuznecov S. V. [i dr.]. Strukturno-fazovye prevrashcheniya pri svarke vysokolegirovannogo splava titana [Structural-phase transformations during welding of high-alloy titanium alloy]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of Materials Science*, 2021, no. 3(107), pp. 63-81. DOI 10.22349/1994-6716-2021-107-3-63-81. EDN UXULMN.
17. Kotelnikov A.A., Golovenkov A.Yu., Natarov A.S., Ryumshin V.Yu. *Programmnoe obespechenie mashinnoj grafiki* [Machine graphics software]. Kursk, YUgo-Zapadnyj gos. un-t Publ., 2019. 231 p.
18. Lyasockaya V. S. *Termicheskaya obrabotka svarnyh soedinenij titanovyh splavov* [Heat treatment of welded joints of titanium alloys]; ed by B.A. Kolacheva. Moscow, Ekomet Publ., 2003. 351 p. EDN QMZLMD.

19. Horev A. I. Osnovy termicheskoy obrabotki i svarki vysokoprochnykh ($\alpha+\beta$)-titanovykh splavov [Fundamentals of heat treatment and welding of high-strength ($\alpha+\beta$)-titanium alloys]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical Engineering Technology*, 2013, no. 8, pp. 5-11. EDN RTKTVD.

Информация об авторах / Information about the Authors

Рюмшин Вадим Юрьевич, главный сварщик,
АО Тураевское машиностроительное
конструкторское бюро "Союз", Московская область,
г. Лыткарино, Российская Федерация,
e-mail: rouch220@yandex.ru

Vadim Y. Ryumshin, Chief Welder,
JSC Turaevskoe Machine-Building Design
Bureau "Soyuz", Moscow region,
Lytkarino, Russian Federation,
e-mail: rouch220@yandex.ru

Чевычелов Сергей Александрович, кандидат
технических наук, заведующий кафедрой
«Машиностроительные технологии
и оборудование», Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: tschsa@yandex.ru

Sergey A. Chevychelov, Cand. of Sci.
(Engineering), Head of the Machine-building
Technologies and Equipment Department,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: tschsa@yandex.ru