

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>

Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов

А. А. Котельников¹ ✉, А. С. Натаров¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Экстремальные условия работы элементов современных конструкций, сложность их формы и большие габариты делают исключительно трудным и дорогим осуществление натурного или полунатурного эксперимента, особенно, если речь идет об установлении предельных (разрушающих) нагрузок, поэтому при прочностных расчетах необходимо прибегать к численным методам, к которым относится и метод конечных элементов. Метод конечных элементов не ограничен ни формой конструкции, ни способом приложения нагрузки. Наиболее ответственной частью конструкции являются сварные соединения. Нередки случаи, когда разрушение конструкции происходило в области сварки. В связи этим данная работа посвящена исследованию напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях пневматического баллона.

Методы. В данной статье используется расчет методом конечных элементов сварных соединений пневматического баллона в программном комплексе APM FEM.

Результаты. Приведенные в статье результаты исследования показывают, что распределение напряжений в сварных соединениях отличается в различных разрезах и расположении в конструкции.

Заключение. Применение метода конечных элементов позволяет оценить распределение напряжений в сварном соединении в конкретном сечении, таким образом, позволяя подобрать необходимое конструктивное исполнение и рационально расположить сварное соединение.

Ключевые слова: сварное соединение; метод конечных элементов; программный комплекс; распределение напряжений, разрез.

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

Для цитирования: Котельников А. А., Натаров А. С. Исследование распределения напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(4): 19-30. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019

Статья подписана в печать 28.06.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>

The Study of Stress Pattern Arising During Loading in Welded Joints by the Finite Elements Method

Anatoly A. Kotelnikov ¹ ✉, Artyom S. Natarov ¹

¹ Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kotelnikov1939@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The extreme working conditions of the elements of modern designs, the complexity of their shape and large dimensions make it extremely difficult and expensive to carry out a full-scale or semi-natural experiment, especially when it comes to establishing ultimate (breaking) loads, therefore, in strength calculations, it is necessary to resort to numerical methods, which include the finite elements method. The finite elements method is not limited by either the form of the structure or the method of applying the load. The most critical part of the design is welded joints. There are frequent cases when the structural failure occurred in the field of welding. In this regard, this work is devoted to the stress analysis arising during loading in welded joints of pneumatic cylinder.

Methods. This article uses finite elements analysis of welded joints of a pneumatic cylinder in the APM FEM software package.

Results. The research results presented in the article show that the stress pattern in welded joints differs in different sections and arrangement in the structure.

Conclusion. The use of the finite elements method allows us to evaluate the stress pattern in a welded joint in a particular section and to select the necessary design and rationally position the welded joint.

Key words: welded joint; finite elements method; software package; stress pattern, section.

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

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

For citation: Kotelnikov A. A., Natarov A. S. The Study of Stress Pattern Arising During Loading in Welded Joints by the Finite Elements Method. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(4): 19-30 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-4-19-30>.

Received 06.05.2019

Accepted 28.06.2019

Введение

Экстремальные условия работы элементов современных конструкций, сложность их формы и большие габариты делают исключительно трудным и дорогим осуществление натурного или полунатурного эксперимента, особенно,

если речь идет об установлении предельных (разрушающих) нагрузок. Поэтому при прочностных расчетах необходимо прибегать к численным методам, к которым относится и метод конечных элементов. Метод конечных элементов не ограничен ни формой

конструкции, ни способом приложения нагрузки [1].

Неотъемлемой частью выпускаемых локомотивов являются пневматические баллоны вместимостью 25-600 л., которые применяются в системах тормоза, автоматики и пожаротушения.

Условия их работы характеризуются наличием внутреннего статического давления, действующего краткое или длительное время при нормальной или пониженной температуре, выполняя при этом функции накопления и сохранения воздуха. В тормозных системах используются баллоны вместимостью 222, 250, 500, 600, в питательных – 120, 222, 250, запасные баллоны имеют вместимость 20, 55, уравнильные – 20, вспомогательные – 5 и 20 л. Для огнетушащей жидкости используется баллон вместимостью 260 л.

Пневматический баллон состоит из следующих конструктивных элементов: цилиндрической обечайки, изготовленной из листовой стали толщиной 5-6 мм; двух выпуклых днищ толщиной 6-8 мм; штуцера для присоединения воздухопровода и штуцера для поставки выпускного крана [2].

От качества и выбранного конструктивного исполнения сварного соединения зависит длительность непрерывной работы конструкции. Цель данной работы – исследовать распределение напряжений, возникающих при нагружении, в сварных соединениях пневматического баллона.

Материалы и методы

Для анализа напряженно деформируемого состояния сварных соединений была построена модель баллона со сварными швами. В качестве материала была принята сталь 10. В модели были построены два стыковых шва, соединяющих обечайку с днищами, и два тавровых шва, соединяющих обечайку со штуцерами. Модель стыкового шва имеет конструктивное исполнение стыкового шва С2 ГОСТ 14771-76. Модель таврового шва имеет конструктивное исполнение таврового шва Т6 ГОСТ 14771-76¹ [3, 4, 5].

Анализ напряжений проводился в точках на оси сварного шва, как показано на рис. 1.

К баллону было приложено давление 2,5 МПа, в том числе к поверхностям, относящимся к сварным швам.

Для анализа напряженно деформируемого состояния баллона была построена конечно-элементная сетка. Параметры сетки представлены в табл. 1. Сетки сварных соединений представлены на рис. 2 и 3.

Были произведены замеры значений напряжений по всему сечению верхнего таврового шва, бокового таврового шва, стыкового шва (см. рис. 1). Измерения проводились в характерных разрезах, которые представлены на рис. 4. Результаты исследований для верхнего таврового шва представлены в табл. 2, для бокового таврового шва – в табл. 3, для стыкового шва – в табл. 4 [5, 6, 7].

¹ ГОСТ 14771-71. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1977. 39 с.

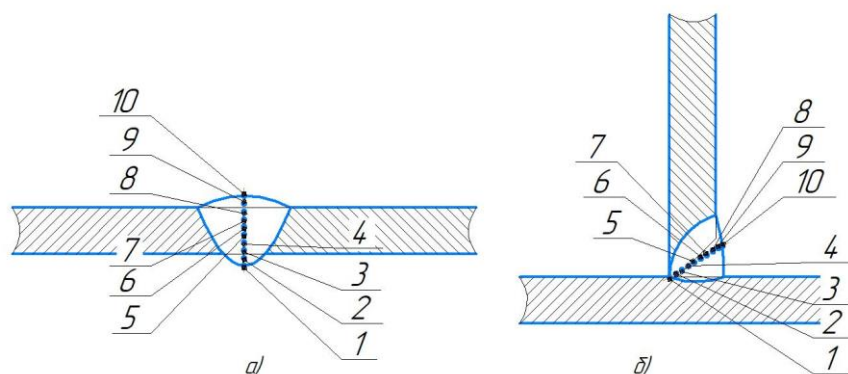


Рис. 1. Точки исследований напряжений сварных соединений: а – стыковой шов; б – тавровый шов

Fig. 1. The point of study of the stress of welded joints: a – - butt joint; b – T-joint

Таблица 1

Параметры сетки решателя APM FEM

Table 1

Parameters of the mesh solver APM FEM

Параметр сетки	Значение параметра
Вид КЭ элемента	4-узловой тетраэдр
Максимальная длина стороны элемента	20 мм
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	10
Коэффициент разрежения в объеме	1,5

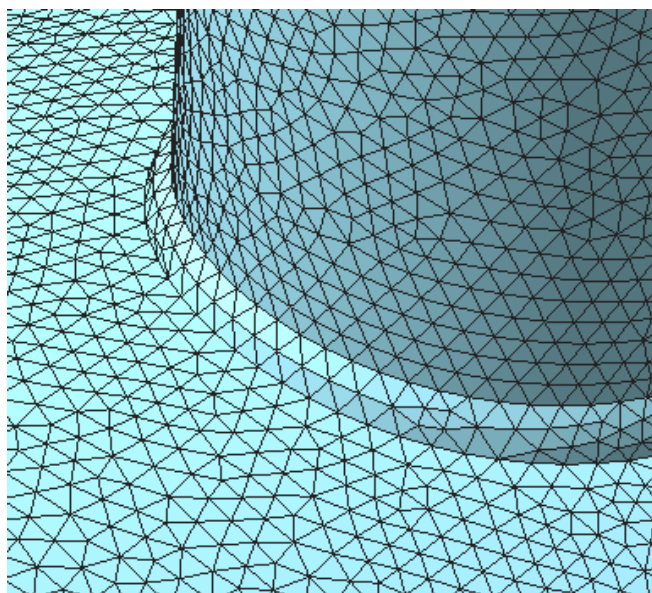


Рис. 2. Сетка верхнего таврового шва в системе APM FEM

Fig. 2. Grid of the upper T-joint in the APM FEM system

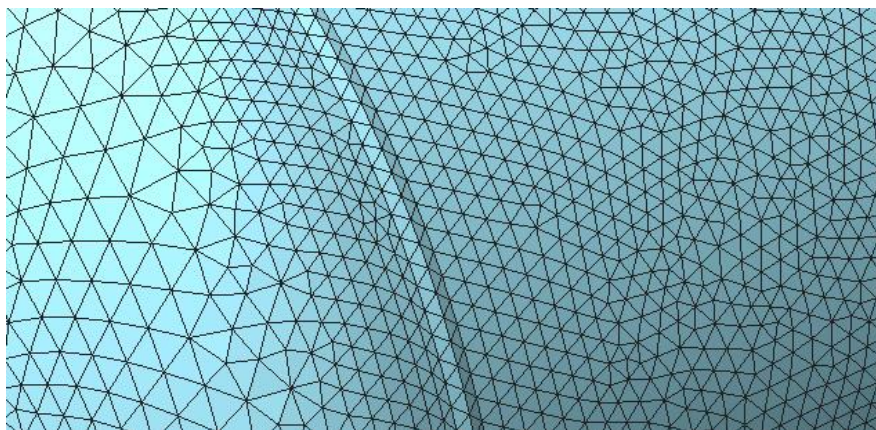


Рис. 3. Сетка стыкового шва в системе APM FEM

Fig. 3. Grid of a butt joint in APM FEM system

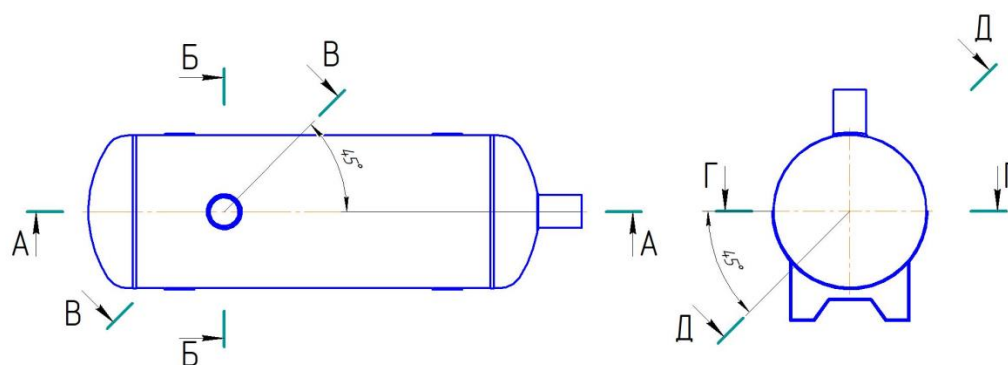


Рис. 4. Исследуемые разрезы

Fig. 4. Investigated Cuts

Таблица 2

Значения напряжений для верхнего таврового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 2

Stress values for the upper T-joint seam at the studied points
in the characteristic sections, MPa

Точки	Разрез А-А	Разрез В-В	Разрез Б-Б
1	196,374	117,755	48,295
2	182,209	110,464	43,439
3	169,956	107,534	45,12
4	156,402	104,996	47,422
5	147,544	104,255	52,044
6	139,791	100,92	54,284
7	130,626	99,084	56,529
8	122,634	96,211	58,574
9	115,206	93,756	60,155
10	107,293	91,366	61,074

Таблица 3

Значения напряжений для бокового таврового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 3

Stress values for the lateral seam of the tee-examined points
in the characteristic sections, МПа

Точки	Разрез А-А	Разрез Д-Д	Разрез Г-Г
1	127,44	128,861	125,513
2	124,097	124,631	122,991
3	119,909	119,324	120,922
4	115,177	114,083	116,554
5	111,229	110,667	111,184
6	107,807	106,509	105,012
7	104,688	102,529	99,932
8	100,614	98,575	95,645
9	97,87	96,523	91,337
10	93,7	93,485	87,665

Таблица 4

Значения напряжений для стыкового шва в исследуемых точках
в характерных разрезах, МПа

Table 4

Stress values for the butt joint at the studied points in characteristic sections, МПа

Точки	Разрез А-А	Разрез Д-Д	Разрез Г-Г
1	40,105	48,984	48,37
2	40,928	49,342	48,996
3	42,235	49,616	49,386
4	44,253	49,938	49,605
5	47,253	50,406	50,376
6	49,628	50,857	50,897
7	49,915	51,403	51,207
8	50,874	51,763	51,953
9	52,177	52,092	52,359
10	53,477	52,329	52,891

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что наибольшие напряжения возникают в верхнем тавровом шве, соединяющем обечайку и верхний патрубок в разрезе А-А, причем распределение напряжений в различных разрезах неодинаково. В

разрезе А-А и В-В напряжения уменьшаются от корня шва к его верхней части, в разрезе Б-Б напряжения увеличиваются от корня к его верхней части (рис. 5). Распределение напряжений в боковом тавровом шве во всех разрезах одинаково – напряжения уменьшаются от корня шва к его верхней части, при-

чем разница между наибольшим и наименьшим значением значительно ниже, чем у верхнего таврового шва (рис. 6). В стыковом шве происходит увеличение напряжений от корня к его верхней части (рис. 7) [8, 9].

Таким образом было установлено, что распределение напряжений, возникающих при нагружении, зависит не только от типа сварного соединения, но и от его расположения в конструкции [10–19].

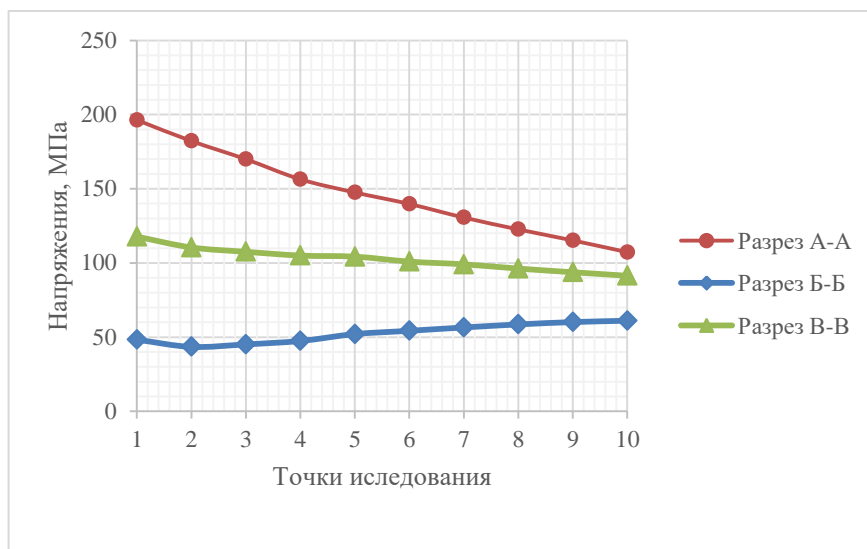


Рис. 5. Распределение напряжений в верхнем тавровом шве в характерных разрезах

Fig. 5. The distribution of stresses in the upper T-joint seam in the characteristic sections

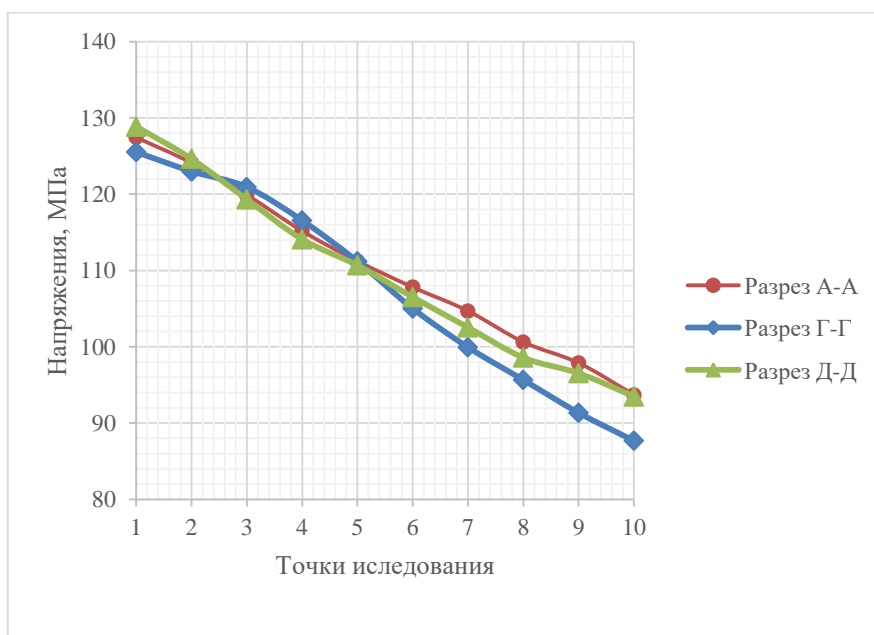


Рис. 6. Распределение напряжений в боковом тавровом шве в характерных разрезах

Fig. 6. The distribution of stresses in the side T-seam in the characteristic sections

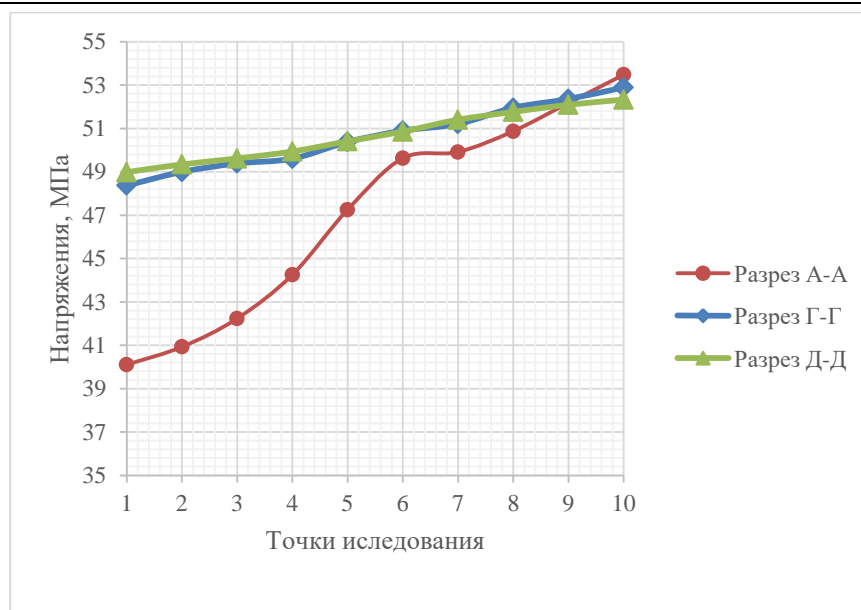


Рис. 7. Распределение напряжений в стыковом шве в характерных разрезах

Fig. 7. The distribution of stresses in the butt joint in the characteristic sections

Выводы

1. Был применен метод конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния сварных соединений баллона.

2. С помощью программного комплекса АРМ FEM были получены значения напряжений в сварных соединениях в различных разрезах.

3. Установлено, что в различных типах сварных соединений и в различных разрезах распределение значений напряжений неодинаково.

4. Установлено, что максимальное изменение напряжений происходит в тавровом шве, соединяющем обечайку и патрубок, наименьшее – в стыковом шве, соединяющем обечайку и днище.

Список литературы

1. Каплун А.Б., Морозов Е. М, Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Едиориал, 2003. 272 с.
2. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / под ред. С. А. Куркина. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.
3. Алпеева Т. В., Емельянов В. М., Котельников А. А. Роботизированная сварка многосортаментных трубчатых элементов: монография. Курск, 2011. 128 с.
4. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов в расчётах сварных конструкций: монография. Курск, 2014, 125 с.

5. Родионова И. Н., Алпеева Е. В., Котельников А. А. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчёта сварных конструкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2013. №4. С. 111-113.
6. Евсигнеева Н. А., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2018. №3. С. 45-48.
7. Абышев К. И., Котельников А. А. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной конструкции // Сварочное производство. 2016. №2. С. 3-6.
8. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трёхмерных конструкций в среде APM Structure 3D. М., 2006. 288 с.
9. Системы автоматизированного проектирования в сварке. Методические указания к выполнению практических работ / сост. М. А. Иванов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 145 с.
10. Бокарев Д. И. Основы систем автоматизированного проектирования в сварке. Воронеж, 2006. 264 с.
11. Программное обеспечение машинной графики / А. А. Котельников, А. Ю. Головенков, А. С. Натаров, В. Ю. Рюмшин. Курск, 2019. 232 с.
12. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Компьютерное моделирование в сварочном производстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2, ч.1. С. 134-138.
13. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Анализ кинематики сборочно-сварочных установок // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2, ч. 3. С. 116-120.
14. Котельников А. А., Абышев К. И., Алпеева Е. В. Расчёт на прочность сварных конструкций методом конечных элементов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. №2. С. 36-40.
15. Котельников А. А., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов при расчёте сварной двутавровой балки // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. №1. С. 14-16.
16. Котельников А. А., Алпеева Е. В. Применение метода конечных элементов при выборе материала сварных конструкций // Сварочное производство. 2015. №2. С. 3-5.
17. Котельников А. А. Родионова И. Н., Алпеева Е. В. Применение функционально-стоимостного анализа для определения эффективности программ для расчёта сварных конструкций методом конечных элементов // Заготовительное производство в машиностроении. 2015. №2. С.45-47.

18. Натаров А. С., Котельников А. А. Метод конечных элементов при расчёте остаточных напряжений воздушных баллонов для железнодорожного транспорта // Технология машиностроения. 2019. №7. С. 24-28.

19. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. Calculation welded structures by the finiteelement method // Welding International. 2017. Vol. 31, no. 2. P. 122-125.

References

1. Kaplun A.B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of an engineer: a practical guide]. Moscow, Edional Publ., 2003, 272 p. (In Russ.).

2. Ed. by Kurkin S. A. *Proektirovanie svarnykh konstruksii v mashinostroenii* [Design of welded structures in mechanical engineering]. Moscow, *Mashinostroenie*, 1975, 376 p. (In Russ.).

3. Alpeeva T. V., Emelyanov V. M., Kotelnikov A. A. *Robotizirovannaya svarka mnog-osortamentnykh trubchatykh elementov* [Robotic welding of multi-sorted tubular elements]. Kursk, 2011, 128 p. (In Russ.).

4. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. *Primenenie metoda konechnykh elementov v raschetakh svarnykh konstruksii* [Application of the finite element method in the calculations of welded structures]. Kursk, 2014, 125 p. (In Russ.).

5. Rodionova I. N., Alpeeva E. V., Kotelnikov A. A. *Primenenie funktsional'-no-stoimostnogo analiza dlya opredeleniya effektivnosti programm dlya rascheta svarnykh konstruksii metodom konechnykh elementov* [The use of functional-cost analysis to determine the effectiveness of programs for the calculation of welded structures by the finite element method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta». Seriya: Ekonomika. Sotsiologiya. Menedzhment = Proceedings of the Southwest State University. Series: Economy. Sociology. Management*, 2013, no. 4, pp. 111-113 (In Russ.).

6. Evsigneeva N. A., Kotelnikov A. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstruksii* [Application of the finite element method in the calculation of the welded structure]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production Publ.*, 2018, no.3, pp. 45-48 (In Russ.).

7. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi konstruksii* [Application of the finite element method in the calculation of welded structures]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production Publ.*, 2016, no. 2, pp. 3-5 (In Russ.).

8. Zamriy A.A. *Proektirovanie i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruksii v srede APM Structure 3D* [Design and finite element analysis of three-

dimensional structures in the APM Structure 3D environment]. Moscow, 2006, 288 p. (In Russ.).

9. (Eds.) Ivanov M.A. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu prakticheskikh rabot [Computer-aided design systems in welding]. Chelyabinsk, *Publishing Center of SUSU*, 2010, 145 p. (In Russ.).

10. Bokarev D. I. *Osnovy sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya v svarke* [Fundamentals of computer-aided design in welding]. Voronezh, 2006, 264 p. (In Russ.).

11. Kotelnikov A. A., Golovenkov A. Yu., Natarov A. S., Ryumshin V. Yu. Programmnoe obespechenie mashinnoi grafiki [Software machine graphics]. Kursk, 2019, 232 p. (In Russ.).

12. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Komp'yuternoe modelirovaniye v svarochnom proizvodstve [Computer modeling in the welding industry]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, part 1, pp. 134-138 (In Russ.).

13. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Analiz kinematiki sborochno-svarochnykh ustanovok [Analysis of the kinematics of assembly-welding plants]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 2, part 3, pp. 116-120 (In Russ.).

14. Kotelnikov A. A., Abyshev K. I., Alpeeva E. V. Raschet na prochnost' svarnykh konstrukttsii metodom konechnykh elementov [Calculation of the strength of welded structures by the finite element method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2013, no.2, pp. 36-40 (In Russ.).

15. Kotelnikov A. A., Alpeeva E. V. Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete svarnoi dvutavrovoy balk [The use of the finite element method in the calculation of a welded I-beam]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2014, no.1, pp. 14-16 (In Russ.).

16. Kotelnikov A. A., Alpeeva E. V. Primenenie metoda konechnykh elementov pri vybore materiala svarnykh konstrukttsii [The use of the finite element method when choosing the material of welded structures]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding production*, 2015, no. 2, pp. 3-5 (In Russ.).

17. Kotelnikov A. A., Rodionova I. N., Alpeeva E. V. Primenenie funktsional'no-stoimostnogo analiza dlya opredeleniya effektivnosti programm dlya rascheta svarnykh kon-

struktsii metodom konechnykh elementov [The use of functional-cost analysis to determine the effectiveness of programs for the calculation of welded structures by the finite element method]. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroyeni* = *Procurement in mechanical engineering*, 2015, no. 2, pp. 45-47 (In Russ.).

18. Natarov A.S., Kotelnikov A.A. Metod konechnykh elementov pri raschete ostatoknykh napryazhenii vozdukhnykh ballonov dlya zheleznodorozhnogo transporta [The finite element method for calculating the residual stresses of air cylinders for railway transport]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* = *Engineering Technology*, 2019, no.7, pp. 24-28 (In Russ.).

19. Abyshev K. I., Kotelnikov A. A. Calculation welded structures by the finiteelement method. *Welding production*, 2017, vol. 31, no. 2, pp. 122-125.

Информация об авторах / Information about the Authors

Котельников Анатолий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kotelnikov1939@ yandex.ru

Anatoly A. Kotelnikov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Engineering Department of Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: kotelnikov1939@ yandex.ru

Натаров Артём Сергеевич, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nart_11@mail.ru

Artyom S. Natarov, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation e-mail: nart_11@mail.ru