

Малоцикловая усталость сварных конструкций, изготовленных из отечественных и импортных материалов

Максим А. Васечкин	¹	vmax77@mail.ru
Сергей В. Егоров	²	akvapaskal@mail.ru
Александр Б. Коломенский	²	kolomenskii_alek@inbox.ru
Евгений Д. Чертов	¹	ched@vsuet.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

² Воронежский государственный технический университет, Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026, Россия

Аннотация. В различных отраслях современного машиностроения в качестве конструкционных материалов широко используют коррозионно-стойкие стали и титановые сплавы. При этом возможно соединение деталей из отечественных и импортных сплавов при помощи автоматической аргодуговой электросварки, что приводит к образованию в сварном шве материала с неизученными свойствами. Сварные соединения являются концентраторами напряжений и в настоящее время отсутствуют сведения о малоцикловой усталости сварных соединений, полученных сплавлением отечественных и импортных материалов. В ходе проведенных исследований отработаны режимы сварки и термообработки стыковых сварных соединений, полученных из листовых титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей отечественного и импортного производства. Проведены ресурсные испытания на малоцикловую усталость опытных образцов сварных соединений. Испытания на малоцикловую усталость проводили на модернизированной испытательной машине УММ-10 при повторно-статическом растяжении с коэффициентом асимметрии +0,1 и при частоте 0,6–0,8 Гц. Максимальное растягивающее напряжение составляло 80% от временного сопротивления разрыву наименее прочного сплава в паре. Ось главных напряжений от внешнего нагружения во всех случаях была перпендикулярна сварному шву. Испытания проводили до разрушения образца. В результате исследований установлено, что все сварные соединения разрушались по линии сплавления, что объясняется одновременным действием геометрических и структурных концентраторов напряжений. При этом разрушение образцов, как правило, начиналось около шва со стороны наименее прочного сплава в паре. Так же установлено, что применение температур неполного отжига в сравнении с полным позволяет повысить циклическую долговечность для сварных соединений титановых сплавов в 1,3–2 раза. Из результатов сравнительных испытаний образцов из коррозионно-стойких сталей следует, что отечественная и импортная стали, а также их сварные соединения, обладают близкими свойствами – как по прочности, так и по повторно-статической долговечности.

Ключевые слова: сварные соединения, усталостная прочность, титановые сплавы, коррозионностойкие стали

Low-cycle fatigue of welded structures made from domestic and imported materials

Maxim A. Vasechkin	¹	vmax77@mail.ru
Sergey V. Egorov	²	akvapaskal@mail.ru
Alexandr B. Kolomensky	²	kolomenskii_alek@inbox.ru
Evgenii D. Chertov	¹	ched@vsuet.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

² Voronezh state technical university, Moskovsky Avenue, 14, Voronezh, 394026, Russia

Abstract. In various branches of modern engineering, corrosion-resistant steels and titanium alloys are widely used as structural materials. At the same time, it is possible to connect parts made from domestic and imported alloys using automatic argon-arc electric welding, which leads to the formation of a material with unexplored properties in the weld. Welded joints are stress concentrators and currently there is no information about low-cycle fatigue of welded joints obtained by fusing domestic and imported materials. In the course of the research, the modes of welding and heat treatment of butt welded joints obtained from sheet titanium alloys and corrosion-resistant steel of domestic and foreign production have been developed. Resource tests for low-cycle fatigue of samples of welded joints were carried out. Tests on low-cycle fatigue were carried out on the upgraded testing machine UMM-10 with repeated static stretching with an asymmetry factor of +0.1 and at a frequency of 0.6–0.8 Hz. The maximum tensile stress was 80% of the temporary tensile strength of the weakest alloy in the pair. The main stress axis from external loading in all cases was perpendicular to the weld. The tests were carried out until the destruction of the sample. As a result of research, it was established that all welded joints were destroyed along the fusion line, which is explained by the simultaneous action of geometric and structural stress concentrators. In this case, the destruction of the samples, as a rule, began near the seam from the side of the weakest alloy in the pair. It was also established that the use of temperatures of incomplete annealing in comparison with the full one allows to increase the cyclic durability for welded joints of titanium alloys by 1.3–2 times. From the results of comparative tests of samples of corrosion-resistant steels, it follows that domestic and imported steels, as well as their welded joints, have similar properties, both in strength and in re-static durability.

Keywords: welded joints, fatigue strength, titanium alloys, corrosion-resistant steel

Для цитирования

Васечкин М.А., Егоров С.В., Коломенский А.Б., Чертов Е.Д. Малоцикловая усталость сварных конструкций, изготовленных из отечественных и импортных материалов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 75–79. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-75-79

For citation

Vasechkin M.A., Egorov S.V., Kolomensky A.B., Chertov E.D. Low-cycle fatigue of welded structures made from domestic and imported materials. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 75–79. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-75-79

Введение

В различных отраслях современного машиностроения в качестве конструкционных материалов широко используют коррозионно-стойкие стали и титановые сплавы. В частности, в конструкцию трубопроводов современных изделий авиационной техники заложены унифицированные элементы, материалами которых являются импортные титановые сплавы и коррозионно-стойкие стали. В то же время прямолинейные участки трубопроводных коммуникаций изготавливают из отечественных сплавов и сталей. В настоящее время установлены следующие возможные пары сочетаний разнородных отечественных и импортных титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей при сборке трубопроводов в трассу [1–3]:

- OT4 + Ti-6Al-4V;
- BT1 – 0 + Ti-6Al-4V;
- ПТ-7М + Ti-6Al-4V;
- OT4 + T40;
- BT1 – 0 + T40;
- ПТ-7М + T40;
- сталь 12x18H10T + сталь AISI 321.

При соединении кольцевых стыков труб из отечественных и импортных сплавов аргонодуговой сваркой в сварном шве образуется материал с неизученными свойствами.

Ранее для представленных сочетаний отечественных и импортных материалов, были проведены экспериментальные исследования по оценке временного сопротивления разрыву. По результатам экспериментальных исследований установлено [1, 4]:

- разрушение опытных образцов происходит по основному металлу, наименее прочному из пары свариваемых материалов;
- применительно к сварным соединениям из титановых сплавов наибольшая прочность

соответствует образцам, отжиг которых проводился при температуре неполного отжига наиболее прочного материала в исследуемом сварном соединении.

Однако по одному временному сопротивлению разрыву невозможно судить о долговечности сварных соединений, являющихся геометрическими и структурными концентраторами напряжений [7–10].

В настоящее время отсутствуют сведения о малоциклового усталости сварных соединений отечественных и импортных титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей. Не установлены технологические режимы процесса сварки, а также оптимальные температурные режимы отжигов, способствующих повышению эксплуатационных характеристик сварных соединений.

Материалы и методы

В ходе проведенных исследований отработывалась технология сварки и термообработки стыковых сварных соединений из листовых титановых сплавов и коррозионно-стойких сталей отечественного и импортного производства с последующим проведением ресурсных испытаний на малоциклового усталость опытных образцов сварных соединений.

Опытные образцы изготавливались из листовых заготовок толщиной 1 мм, которые сваривались встык по ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» при помощи установки автоматической аргонодуговой сварки АДСВ-2. Режимы автоматической аргонодуговой сварки представлены в таблице 1. Полученные плоские сварные заготовки разрезались по схеме, приведенной на рисунке 1, собирались в пакет и фрезеровались в размеры, указанные на рисунке 2.

Таблица 1.

Режимы автоматической аргонодуговой сварки на постоянном токе без присадки для изготовления опытной партии образцов

Table 1.

Modes of automatic argon arc welding with direct current without additives for the manufacture of an experimental batch of samples

Параметр режима автоматической аргонодуговой сварки Parameter of automatic argon-arc welding	Свариваемые материалы Welded materials	
	Титановые сплавы Titanium Alloys	Коррозионно-стойкие стали Corrosion resistant Steel
Сварочный ток, А Welding current, a	70–75	65–75
Скорость сварки, м/ч Welding speed, m / h	20–22	18–20
Напряжение дуги, В Arc voltage, V	8–9	8–9
Установочная длина дуги, мм Installation arc length, mm	1,0–1,5	1,0–1,5
Диаметр вольфрамового электрода, мм Diameter of tungsten electrode, mm	2,0–2,5	2,0–2,5
Расход аргона, л/мин, для защиты (Argon consumption, L/min, for protection):		
– дуги и шва (Arc and seam);	5–7	6–7
– обратной стороны шва (reverse side of the seam).	1–2	1–2

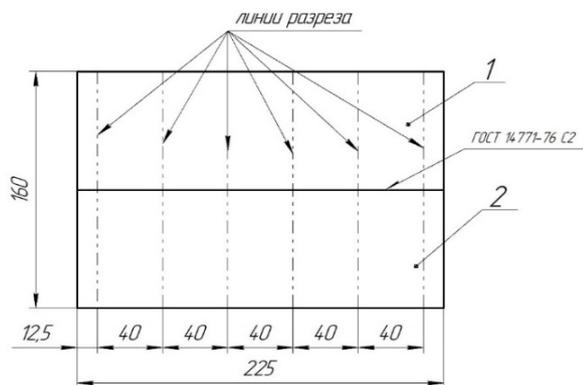


Рисунок 1. Схема получения заготовок для изготовления опытных образцов: 1 – листовая заготовка из материала № 1; 2 – листовая заготовка из материала № 2

Figure 1. The scheme of obtaining blanks for the manufacture of samples: 1 – sheet blank of material № 1; 2 – sheet blank of material № 2

Опытные образцы из титановых сплавов подвергали воздушному отжигу в лабораторных муфельных печах с выдержкой в течение 1 ч. Температуру отжига T_o выбирали в зависимости от температуры неполного отжига для наиболее прочного сплава в изучаемой паре, что связано с необходимостью восстановления пластичности и снятия остаточных напряжений, в первую очередь, для наиболее высокопрочного сплава [1, 5]. Для удаления поверхностных оксидов после отжига титановых образцов при $T_o = 650 - 750$ °C применяли пескоструйную обработку поверхности с избыточным давлением воздуха в сети не более 0,1 МПа. При отжиге с температурами менее 600 °C операцию удаления окалины перед травлением не осуществляли. Облагораживающее травление образцов производили в смеси HNO_3 (600–750 мл/л, плотностью 1,40 г/см³) и HF (180–220 мл/л, плотностью 1,13 г/см³) при температуре 20–23 °C в течение времени, необходимого для полного удаления газонасыщенного слоя. Полноту удаления контролировали по микротвердости поверхности на образцах-свидетелях [6].

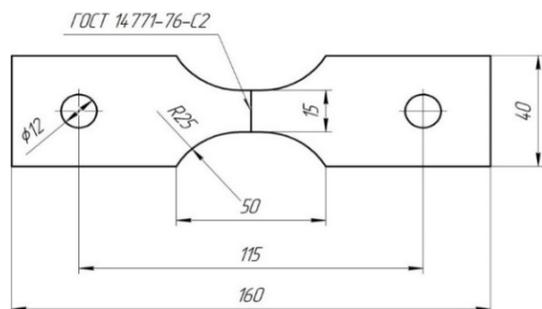


Рисунок 2. Опытный образец для проведения ресурсных испытаний на малоцикловую усталость
Figure 2. The prototype for endurance tests on low-cycle fatigue

Опытные образцы из коррозионно-стойких сталей не отжигали.

Испытания на малоцикловую усталость проводили на модернизированной испытательной машине УММ-10 при повторно-статическом растяжении с коэффициентом асимметрии $R = +0,1$ и при частоте $f = 0,6 - 0,8$ Гц. Максимальное растягивающее напряжение принимали равным $\sigma_{max} \approx 0,8\sigma_s$ (здесь σ_s – временное сопротивление разрыву наименее прочного сплава в паре). Ось главных напряжений от внешнего нагружения во всех случаях была перпендикулярна сварному шву. Испытания проводили до разрушения образца.

Результаты и обсуждение

Результаты ресурсных испытаний на малоцикловую усталость опытных образцов сварных соединений представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2.

Результаты испытаний на малоцикловую усталость опытных образцов сварных соединений из коррозионно-стойких сталей

Table 2.

The results of tests on low-cycle fatigue test samples of welded joints of corrosion-resistant steel

Свариваемые стали Welded steel	Количество циклов до разрушения Number Cycles to destruction	Зона и тип разрушения Zone and type of destruction
12x18H10T + 12x18H10T	39785	Усталостное разрушение по линии сплавления с образованием усталостной трещины и зоны долома Fatigue fracture in the line of fusion with the formation of fatigue crack and the area of the scrap
	35318	
	12812	
	18212	
AISI 321 + AISI 321	23385	
	17352	
	31294	
	22281	
12x18H10T + AISI 321	20800	
	17396	
	25324	
	20278	
	21925	
	22055	
	17941	

На рисунке 4 представлены примеры разрушения при испытании опытных образцов сварных соединений на малоцикловую усталость.

Анализ результатов испытаний образцов из титановых сплавов показал, что практически все разрушения имели усталостный характер. Исключения составляли только отдельные случаи квазистатического разрушения (без выраженной усталостной трещины) для сварных соединений со стороны наименее прочного металла (BT1-0, T40, ПТ-7М), когда температура отжига превышала температуру начала рекристаллизации данного металла.

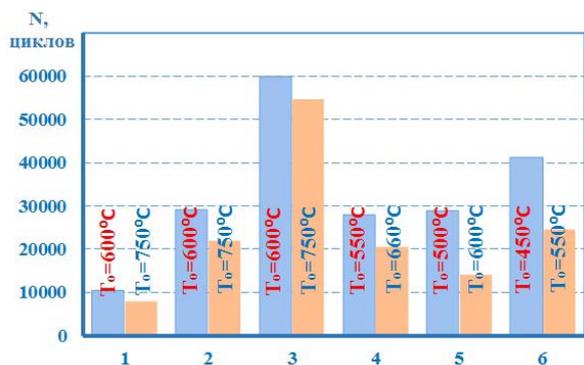


Рисунок 3. Среднее количество N циклов до разрушения опытных образцов из сочетания титановых сплавов: 1) OT4 + Ti-6Al-4V; 2) PT-7M + Ti-6Al-4V; 3) VT1 – 0 + Ti-6Al-4V; 4) OT4 + T40; 5) PT-7M + T40; 6) VT1 – 0 + T40

Figure 3. The average number of N cycles until the destruction of prototypes of a combination of titanium alloys: 1) OT4 + Ti-6Al-4V; 2) PT-7M + Ti-6Al-4V; 3) VT1 – 0 + Ti-6Al-4V; 4) OT4 + T40; 5) PT-7M + T40; 6) VT1 – 0 + T40

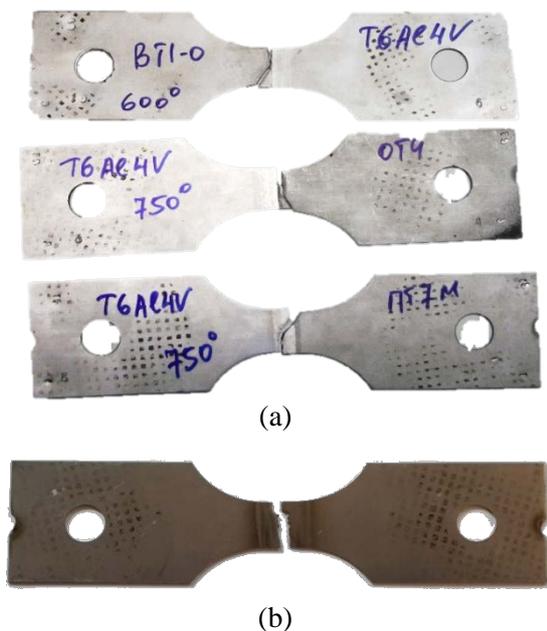


Рисунок 4. Типичный вид разрушений образцов сварных соединений: (а) – из титановых сплавов; (б) – из коррозионно-стойких сталей

Figure 4. A typical form of destruction of samples of welded joints: (a) – of titanium alloys; (b) – of corrosion-resistant steels

ЛИТЕРАТУРА

1 Vasechkin M.A., Davydov O.Yu., Kolomenskii A.B., Egorov S.V. Effect of welding and heat treatment regimes on the mechanical properties of various titanium alloy welded joints // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. V. 54. № 7–8. P. 525–530. doi: 10.1007/s10556–018–0512–1

2 Шашкова Ю.Е. Применение титана и титановых сплавов для различных отраслей промышленности. Основные свойства и преимущества // Сфера нефтегаз. 2011. № 3. С. 166–167.

Разрушение по линии сплавления можно объяснить одновременным действием геометрических (подрезы) и структурных (крупнозернистая β -превращённая микроструктура) концентраторов напряжений. Усталостное разрушение, как правило, начиналось около шва со стороны наименее прочного сплава в паре.

Можно отметить, что применение температур неполного отжига в сравнении с полным позволяет повысить циклическую долговечность для сварных соединений из отечественных и импортных титановых сплавов в 1,3–2,0 раза.

Из результатов сравнительных испытаний образцов из коррозионностойких сталей следует, что повторно-статическая долговечность сварных соединений из сталей 12x18H10T + AISI 321 находится приблизительно на уровне долговечности образцов, изготовленных только из стали AISI 321. Разрушение во всех случаях носило усталостный характер и начиналось по линии сплавления. Повторно-статическая долговечность образцов, изготовленных из отечественной стали 12x18H10T, в среднем оказалась приблизительно на 17% выше, чем у образцов из стали AISI 321. Это можно объяснить несколько большим исходным уровнем предела её прочности σ_s (68,3 кг/мм² – для стали 12x18H10T против 65,8 кг/мм² – для стали AISI 321).

Заклучение

1. Разрушение сварных соединений разноимённых сплавов практически во всех случаях носит усталостный характер и происходит по линии сплавления или по зоне термического влияния со стороны наименее прочного сплава в паре.

2. Применение режимов неполного отжига в сравнении с полным отжигом позволяет повысить циклическую долговечность для сварных соединений из разноимённых титановых сплавов в 1,3–2,0 раза.

3. Отечественная сталь 12x18H10T и импортная сталь AISI 321, а также их сварные соединения обладают близкими свойствами как по прочности, так и по повторно-статической долговечности.

3 Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.

4 Васечкин М.А., Егоров С.В., Коломенский А.Б., Чертов Е.Д. Временное сопротивление разрыву сварных конструкций, изготовленных из отечественных и импортных материалов // Вестник ВГУИТ. 2015. № 4(66). С. 61 – 65.

5 Производственная инструкция ПИ 1.2.587–02. Термическая обработка полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов. М.: ВИАМ. 29 с.

6 Производственная инструкция ПИ 1.2.132–79. Удаление окалины и альфированного слоя с поверхности полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов. М.: ВИАМ. 13 с.

7 Bai R. et al. Study on welding sequence of butt-welded structures based on equivalent heat source parameter // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2018. V. 163. P. 15–22.

8 Liang W., Deng D. Investigating the influence of external restraint on welding distortion in thin-plate welded structures by means of numerical simulation technology // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1063. № 1. P. 012082. doi: 10.1088/1742-6596/1063/1/012082

9 Hector R., Naoki O., Hidekazu M., Sherif R. Development of a Practical Straightening Simulation for Welded Structures Using Inherent Strain Method // KnE Engineering. 2018. V. 3. № 1. P. 332–343. doi: 10.18502/keg.v3i1.1438

10 Bhatti A.A., Barsoum Z., Khurshid M. Development of a finite element simulation framework for the prediction of residual stresses in large welded structures // Computers & Structures. 2014. V. 133. P. 1–11.

REFERENCES

1 Vasechkin M.A., Davydov O.Yu., Kolomenskii A.B., Egorov S.V. Effect of welding and heat treatment regimes on the mechanical properties of various titanium alloy welded joints. Chemical and Petroleum Engineering. 2018. vol. 54. no. 7–8. pp. 525–530. doi: 10.1007/s10556-018-0512-1

2 Shashkova Yu. E. Use of titanium and titanium alloys for various branches of industry. Main properties and advantages. Sfera neftegaz [Sphere oil and gas]. 2011. no. 1. pp. 166–167. (in Russian)

3 Glazunov S.G., Yasinskii K.K. Titanium alloys for aviation technology and other branches of industry. Tekhnologiya legkikh splavov [Light alloy technology]. 1993. no. 7–8. pp. 47–54. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим А. Васечкин к.т.н., доцент, кафедра технической механики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vmax77@mail.ru

Сергей В. Егоров аспирант, кафедра технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет, Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026, Россия, akvapaskal@mail.ru

Александр Б. Коломенский д.т.н., профессор, кафедра технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет, Московский проспект, 14, г. Воронеж, 394026, Россия, kolomenskii_alek@inbox.ru

Евгений Д. Чертов д.т.н., профессор, кафедра технической механики, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ched@vsuet.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Максим А. Васечкин написал рукопись, отредактировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Сергей В. Егоров обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

Александр Б. Коломенский предложил методику проведения эксперимента

Евгений Д. Чертов консультация в ходе исследования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 30.10.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 03.12.2018

4 Vasechkin M.A., Egorov S.V., Kolomenskii A.B., Chertov E.D. Ultimate breaking strength of welded joints prepared from domestic and foreign materials. Vestnik VGUET [Proceedings of VSUET]. 2015. no. 4. pp. 61–65. (in Russian)

5 Production instruction PI 1.2.587–02. Termicheskaya obrabotka polufabrikatov i detalej iz titanovykh splavov [Heat treatment of semi-finished products and parts made of titanium alloys]. Moscow, VIAM. 29 p. (in Russian)

6 Production instructions PI 1.2.132–79. Udaleniye okaliny i al'firovannogo sloya s poverhnosti polufabrikatov i detalej iz titanovykh splavov [Removal of scale and gas-saturated layer from the surface of semi-finished products and parts made of titanium alloys]. Moscow, VIAM. 13 p. (in Russian)

7 Bai R. et al. Study on welding sequence of butt-welded structures based on equivalent heat source parameter. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2018. vol. 163. pp. 15–22.

8 Liang W., Deng D. Investigating the influence of external restraint on welding distortion in thin-plate welded structures by means of numerical simulation technology. Journal of Physics: Conference Series. 2018. vol. 1063. no. 1. pp. 012082. doi: 10.1088/1742-6596/1063/1/012082

9 Hector R., Naoki O., Hidekazu M., Sherif R. Development of a Practical Straightening Simulation for Welded Structures Using Inherent Strain Method. KnE Engineering. 2018. vol. 3. no. 1. pp. 332–343. doi: 10.18502/keg.v3i1.1438

10 Bhatti A.A., Barsoum Z., Khurshid M. Development of a finite element simulation framework for the prediction of residual stresses in large welded structures. Computers & Structures. 2014. vol. 133. pp. 1–11.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Maxim A. Vasechkin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technical mechanics, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vmax77@mail.ru

Sergey V. Egorov graduate student, department of welding technology and diagnostics, Voronezh state technical university, Moskovsky Av., 14, Voronezh, 394026, Russia, akvapaskal@mail.ru

Alexandr B. Kolomensky Dr. Sci. (Engin), professor, department of welding technology and diagnostics, Voronezh state technical university, Moskovsky Av., 14, Voronezh, 394026, Russia, kolomenskii_alek@inbox.ru

Evgenii D. Chertov Dr. Sci. (Engin), professor, department of technical mechanics, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ched@vsuet.ru

CONTRIBUTION

Maxim A. Vasechkin wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Sergey V. Egorov review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Alexandr B. Kolomensky proposed a scheme of the experiment

Evgenii D. Chertov consultation during the study

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 10.30.2018

ACCEPTED 12.3.2018