

Исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой

С. А. Балашов¹, В. В. Зезюля¹, В. В. Булычев¹, Е. В. Агеева² ✉

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана
ул. Баженова, д. 2, г. Калуга 248000, Российская Федерация

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработать, провести апробацию методики и выполнить экспериментальное исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой.

Методы. Образцы для испытаний изготавливались из листовых заготовок алюминиевого сплава Д16 толщиной 1 мм посредством контактной точечной сварки. Особенностью предложенной схемы испытаний является реализация симметричного цикла нагружения. В процессе испытаний фиксировалось количество циклов до разрушения в зависимости от размаха колебаний. Для исключения винтового изгиба после вырезки проводился отжиг и термомеханическая правка. После снятия заусенцев и притупления острых кромок проводилась подготовка поверхности заготовок под сварку – химическое травление. Сварка образцов проводилась на машине для точечной сварки ТЕСНА 8214N. Ток сварки составлял 30 кА, продолжительность сварки 0,1 с, усилие на электродах 180 даН. Статическую прочность сварного соединения на срез исследовали на разрывной машине УТС 110М-5 1-У. Усилие разрушения составило 3,66 кН. Особенностью предложенной схемы испытаний является реализация симметричного цикла нагружения. В процессе испытаний фиксировалось количество циклов до разрушения в зависимости от размаха колебаний.

Результаты. В результате статистической обработки результатов исследования получена математическая зависимость линейного вида между логарифмами количеств циклов до разрушения и величиной размаха колебаний. В зависимости от размаха колебаний выявлены характерные зоны разрушения. Для обеспечения возможности сопоставления результатов вибрационной прочности, полученных при различных условиях закрепления образцов, предложено в качестве ординаты использовать размах виброперемещения на единицу длины образца.

Заключение. Предложена и апробирована методика исследования вибрационной прочности соединений, полученных контактной точечной сваркой, в условиях реализации симметричного цикла нагружения. Для исследованных образцов равноправность сварного соединения основному металлу достигается при значении логарифма отношения размаха виброперемещения на единицу длины образца равного 0,01.

Ключевые слова: сварное соединение; контактная точечная сварка; алюминиевые сплавы; вибрационная прочность; схема испытаний.

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

Для цитирования: Исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой / С. А. Балашов, В. В. Зезюля, В. В. Бульчев, Е. В. Агеева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 8-22. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-8-22>.

Поступила в редакцию 24.05.2022

Подписана в печать 15.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Study of Vibration Strength of D16 Aluminum Alloy Joints Welded Applying Resistance Spot Welding

Sergei A. Balashov ¹, Valerii V. Zezyulya ¹, Vsevolod V. Bulychev ¹,
Ekaterina V. Ageeva ² ✉

¹ Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University
2 Bazhenov str., Kaluga 248000, Russian Federation

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop and test a technique and perform an experimental study of the vibration strength of D16 aluminum alloy joints welded applying resistance spot welding.

Methods. Test coupons were made from 1 mm thick D16 aluminum alloy sheet blanks applying resistance spot welding. A feature of the proposed test is the implementation of a symmetrical loading cycle. During the tests, the number of cycles to failure depending on the range of vibrations was recorded. Annealing and thermomechanical straightening were carried out to exclude helical bending after cutout. After deburring and root facing, the surface of the coupons was prepared for welding using chemical etching. The coupons were welded using a TECNA 8214N spot welding machine. The welding current was 30 kA, the welding duration was 0.1 s, the electrodes force was 180 daN. The static shear strength of the welded joint was studied using a UTS 110M-5 1-U tensile testing machine. The breaking force was 3.66 kN. The peculiarity of the proposed test is the implementation of a symmetrical loading cycle. During the tests, the number of cycles to failure depending on the range of vibrations was recorded.

Results. As a result of the statistical analysis of the study results, a linear mathematical relationship between the logarithms of the number of cycles to failure and the amplitude of vibrations was obtained. Depending on the range of vibrations, characteristic zones of destruction were revealed. To provide the possibility of comparing the results of vibration obtained under different conditions of fixing the samples, it is proposed to use the range of vibration displacement per unit length of the workpiece as the ordinate.

Conclusion. A technique of studying the vibrational strength of joints welded by resistance spot welding under conditions of a symmetrical loading cycle is proposed and tested. For the studied coupons, the equality of the welded joint to the base metal is achieved at the value of the logarithm of the ratio of the range of vibration displacement per unit length of the coupons equal to 0.01.

Keywords: welded joint; resistance spot welding; aluminum alloys; vibration strength; test sequence.

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

For citation: Balashov S. A., Zezyulya V. V., Bulychev V. V., Ageeva E. V. Study of Vibration Strength of D16 Aluminum Alloy Joints Welded Applying Resistance Spot Welding. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 8-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-8-22>.

Received 24.05.2022

Accepted 15.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются в машиностроении при производстве тонкостенных конструкций различного назначения. Для соединения листовых заготовок наряду с технологиями сварки плавлением достаточно широко применяется контактная точечная сварка. Исследованию особенностей контактной точечной сварки заготовок из алюминиевых сплавов посвящено значительное количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов [1-5]. При этом основным видом оценки прочностных свойств сварных соединений является их статическая прочность на срез и на отрыв [6-8]. Эксплуатационные свойства сварных соединений в условиях знакопеременных нарезок исследованы гораздо менее полно. В работе [9] исследована усталостная прочность нахлестанных соединений из пластин алюминиевых сплавов толщиной 2 мм при циклическом нагружении на срез при коэффициентах асимметрии цикла нагружения $R=0...0,5$. В работе [10] исследована усталостная прочность на растяжение сварного соединения заготовок из сплава 1565ч толщиной 2 мм. В

данных работах показано, что усталостная прочность соединений зависит от многих параметров режима и условий сварки.

Следует, однако, отметить, что в процессе эксплуатации конструкции из алюминиевых сплавов часто испытывают трудно прогнозируемые виды циклического нагружения, вызванного, например, динамическими нагрузками и вибрацией [11-15]. Для данных видов эксплуатационных нагрузок нагружения результаты циклических испытаний на растяжение в условиях мягкого нагружения [9, 10] оказываются мало информативными для прогнозирования работоспособности сварного соединения. Для исследования работоспособности конструкций в условиях вибрации осуществляются вибрационные испытания, регламентированные такими нормативными документами, как ГОСТ ИСО 10816-1-97, ГОСТ Р 56646-2015, ГОСТ 25.101-83, ГОСТ 28231-89, ГОСТ 33787-2019. Однако методики исследования вибрационной прочности сварных соединений в данных нормативных документах не рассмотрены.

Целью настоящей работы являлась разработка, апробирование методики и экспериментальное исследование вибрационной прочности сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненных контактной точечной сваркой.

Материалы и методы

В качестве материала образцов был взят алюминиевый сплав Д16. Образцы изготавливались из листа толщиной 1 мм. Ширина заготовки составляла 20 мм, длина 120 мм. Образцы вырезались на гидравлических листовых ножницах VIMERCATI 2050x8. Для исклю-

чения винтового изгиба после вырезки проводился отжиг и термомеханическая правка. После снятия заусенцев и приотупления острых кромок проводилась подготовка поверхности заготовок под сварку- химическое травление. Так как интервал времени между окончанием травления и окончанием сварки согласно ОСТ 92-1152-2014 не должен превышать 9 часов, то операции травления и сварки образцов производились в течение одной рабочей смены (8 часов). Сварка образцов (рис.1) проводилась на машине для точечной сварки TECNA 8214N.



Рис. 1. Сварные образцы для испытаний

Fig. 1. Welded test samples

ток сварки составлял 30 кА, продолжительность сварки 0,1 с, усилие на электродах 180 даН. Данные режимы обеспечивают формирование сварного соединения с диаметром сварной точки более 4 мм (рис. 2), что соответствует требованиям ГОСТ 15878-79 для соединений группы А.

Для подтверждения получения в процессе сварки качественного сварного соединения несколько образцов было разрушено скручиванием сварной точки в тисках. Разрушение сварного соединения происходило по основному металлу вокруг сварной точки.

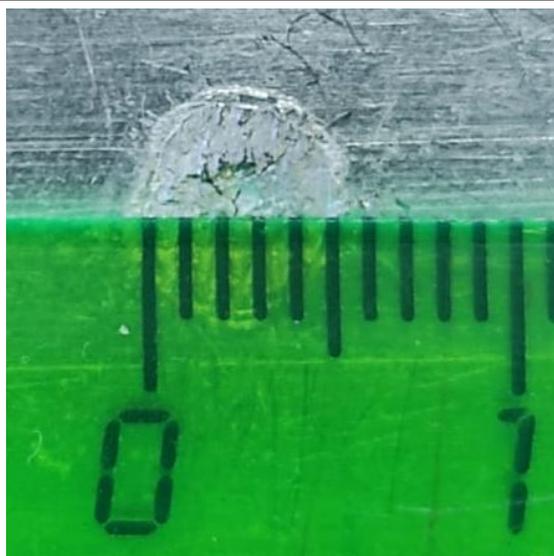


Рис. 2. Разрушенная сварная точка

Fig. 2. Destroyed weld point

Статическую прочность сварного соединения на срез исследовали на разрывной машине УТС 110М-5 1-У. Усилие разрушения составило 3,66 кН. Отсюда напряжение разрушения для сварной точки диаметром 4...5 мм составляет 291...186 МПа. Согласно ГОСТ 21631-76 отожжённый сплав Д16 имеет временное сопротивление при растяжении $\sigma_B = 145...235$ МПа. Согласно ОСТ 92-1114-80 минимально допустимая прочность сварных точек на срез для сплава АМг6 (наиболее близкого по свойствам сплава, приведенном в данном документе) должна составлять 1176 Н. Сказанное свидетельствует о высоких механических свойствах полученных сварных соединений.

Согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97 при вибрационных испытаниях в качестве контролируемых параметров нагружения используются виброперемещение, виброскорость и виброускорение. С

учетом этого при постановке эксперимента по исследованию вибрационной прочности сварных соединений целесообразно принять именно виброперемещение, которое может быть задано как размах колебаний одного закрепления испытываемого образца относительно другого. Частота вибрации составляла 50 Гц. Схема вибрационных испытаний пояснена на рис. 3.

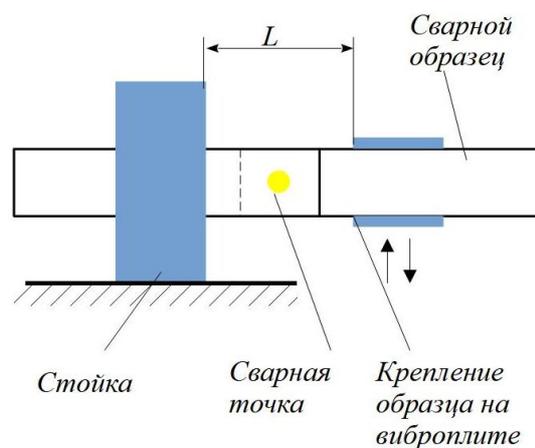


Рис. 3. Схема испытаний вибрационной прочности сварных образцов

Fig. 3. Welded coupons vibration strength testing diagram

Вылет образца между креплениями составлял $L = 40$ мм. Данная схема испытаний позволяет имитировать знакопеременное симметричное нагружение сварного образца, что затруднительно воспроизвести при испытании на растяжение-сжатие из-за потери устойчивости листовых образцов.

Следует отметить, что такой вид испытаний нельзя отнести к усталостным испытаниям с жестким нагружением, т. к. он не позволяет выделить именно пластическую деформацию сварного соединения [16,17]. В то же время сопостав-

ление размаха виброперемещений при испытаниях и зарегистрированных при эксплуатационных нагрузках всей конструкции позволяет сделать более обоснованную оценку работоспособности сварных соединений в условиях воздействия вибрационных нагрузок.

Для испытания образцов был использован вибрационный стенд СВ-2М с

изготовленной оснасткой для крепления образцов (рис. 4). Постановка эксперимента осуществлялась с учетом рекомендаций, приведенных в работах [18, 19].

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний сварных образцов на вибрационную прочность приведены в табл. 1.



Рис. 4. Лабораторная установка для испытаний

Fig. 4. Laboratory testing setup

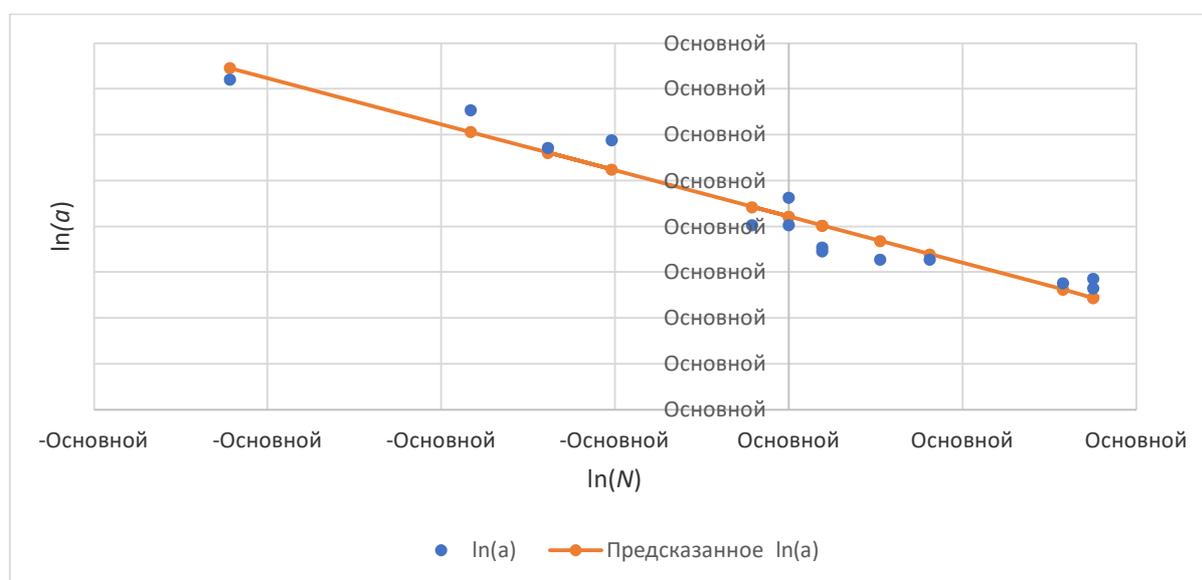
Статистической обработкой данных [20] получили уравнение регрессии $\ln(a) = 8,42 - 4,03 \ln(N)$.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 5.

Образцы 1...12 разрушились по сварной точке (рис. 6, а). Образцы 1...3 и 14 разрушились по основному металлу вне сварного соединения (рис. 6, б).

Таблица 1. Результаты испытаний сварных образцов на вибрационную прочность**Table 1.** Test results of vibration strength of welded coupons

| № | Продолжительность испытания, с / Testing time, s | Количество циклов до разрушения N / Number of cycles to failure, N | Амплитуда колебаний a , мм / Vibrations amplitude a , mm |
|----|--|--|--|
| 1 | 4 | 200 | 2,4 |
| 2 | 6 | 300 | 2,4 |
| 3 | 5 | 250 | 2,2 |
| 4 | 4 | 700 | 1,5 |
| 5 | 14 | 700 | 1,3 |
| 6 | 20 | 1000 | 1,1 |
| 7 | 24 | 1200 | 1,1 |
| 8 | 63 | 3150 | 1,0 |
| 9 | 63 | 3150 | 0,9 |
| 10 | 212 | 10600 | 1,0 |
| 11 | 1860 | 93000 | 0,5 |
| 12 | 2580 | 129000 | 0,6 |
| 13 | 9420 | 471000 | 0,4 |
| 14 | 36240 | 1812000 | 0,2 |

**Рис. 5.** Результаты испытаний на вибрационную прочность**Fig. 5.** Vibration strength test results

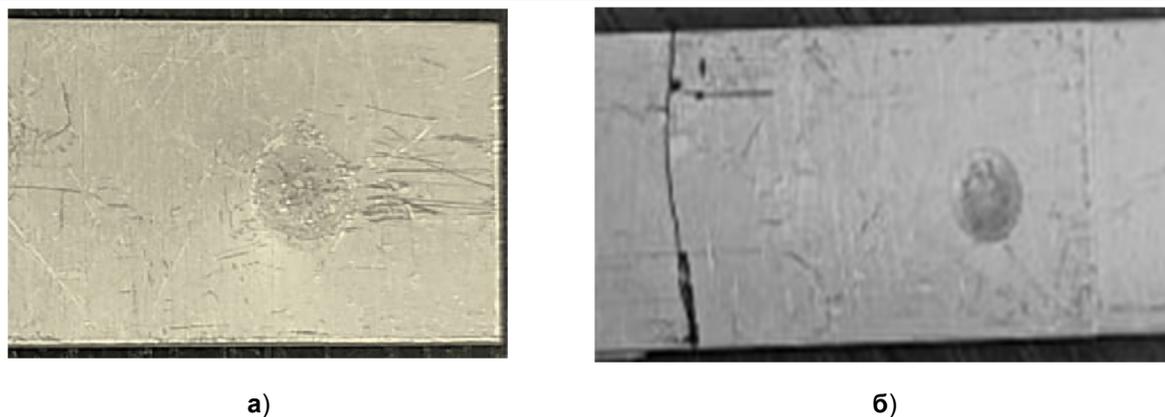


Рис. 6. Виды разрушения сварных образцов при испытании на вибрационную прочность: **а** – разрушение по сварной точке, **б** – разрушение по основному металлу

Fig. 6. Types of destruction of welded coupons during vibration strength testing: **a** – destruction at the welded point, **b** – destruction at the base metal

Коэффициент корреляции составил $r = -0,96$, что свидетельствует о сильной линейной связи между параметрами $\ln(a)$ и $\ln(N)$. Следует также отметить, что статистическая обработка результатов испытаний может быть выполнена без учета зоны разрушения образцов. Разрушение образцов 13 и 14 по основному металлу свидетельствует о том, что при данных размахах колебаний сварная точка перестает быть фактором, определяющим общую вибрационную прочность изделия.

Проведённые исследования позволяют также высказать предположение, требующее более детальной экспериментальной проверки, что при статистической обработке результатов эксперимента в качестве ординаты целесообразно принять параметр $\ln\left(\frac{a}{L}\right)$. В этом случае получили линейную зависимость

$$\ln\left(\frac{a}{L}\right) = -1,75 - 0,23 \ln(N).$$

Параметр $\ln\left(\frac{a}{L}\right)$ характеризует

размах вибрационных колебаний на единицу длины образца, что дает предпосылки для сопоставления результатов испытаний вибрационной прочности образцов, полученных при различных условиях их закрепления.

Проведенные эксперименты показали, что в исследованном случае равноправность сварного соединения основному металлу достигается при размахе вибрационных колебаний $a < 0,4$ мм или при $\frac{a}{L} < 0,01$.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке ресурсосберегающих технологий испытания сварных образцов на вибрационную прочность в различных условиях и состояниях [21-25].

Выводы

1. Предложенная методика испытания сварных образцов на вибрационную прочность может быть реализована на вибрационном стенде СВ-2М и позволяет имитировать знакопеременное симметричное нагружение листового образца с нахлесточным сварным соединением, что затруднительно воспроизвести при испытании на растяжение-сжатие из-за потери устойчивости листовых образцов.

2. В логарифмических координатах выявлена линейная зависимость с хорошей степенью корреляции между ве-

личиной размаха колебаний и числом циклов до разрушения образца.

3. Предложено в качестве ординаты применять отношение размаха колебаний к длине базы, на которой зафиксирован данный размах колебаний, что дает предпосылки для сопоставления результатов испытаний вибрационной прочности образцов, полученных при различных условиях их закрепления. Для исследованных образцов равноправность сварного соединения основному металлу достигается при значении данного параметра менее 0,01.

Список литературы

1. A review on resistance spot welding of aluminum alloys / Sunusi Marwana Manladan, Farazila Yusof, S. Ramesh, Fadzil Jamaludin, Zhen Luo, Sansan Ao. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017.90. P.605–634.

2. Parametric Optimization for Resistance Spot-Welded Thin-Sheet Aluminium Alloy 5052-H32 / Abioye T.E., Anas N.M., Irfan M.K., Anasyida A. S., Zuhailawati H. // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 44. 7617–7626 (2019).

3. Study on the Weld-Bonding Process Optimization and Mechanical Performance of Aluminum Alloy Joints / Mingfeng Li, Yanjun Wang, Zhen Niu, Shanglu Yang // *Automotive Innovation*. 2020. Vol. 3. P. 221–230.

4. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. No. 5-8. P. 885–895.

5. Астафьева Н. А., Бузин А. С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов // *Вестник ИрГТУ*. 2018. №7 (138). С.10-18.

6. Parameter optimisation and failure load prediction of resistance spot welding of aluminium alloy 57547 / Đurić A., Klobčar D., Milčić D., Markovic B. // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 659 (2019), doi:10.1088/1757-899X/659/1/012042

7. Quantifying structure-property relationships during resistance spot welding of an aluminum 6061-T6 joint / Turnage S., Darling K., Rajagopalan M., Whittington W., Tschopp M., Peralta P., Solanki K. // arXiv preprint arXiv:160504251, 2016.

8. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Ключков Г.Г. Исследование свойств сварных соединений алюминиевого сплава В1341, выполненных контактной точечной сваркой // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 7. С. 8-12.

9. Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy / Florea R.S., Bammann D.J., Yeldell A., Solanki K.N., Hammi Y. // Materials and Design. 2013. Vol. 45. P. 456-465.

10. Андреева Л.П., Овчинников В.В., Сидоров А.А. Оптимизация размеров точечных соединений при электроконтактной сварке алюминиевых сплавов // Современные материалы, техника и технологии. 2015. №3. С. 23-32.

11. Зарецкий М.В., Сидоренко А. С. Напряженное состояние авиационной конструкции со сварными соединениями при случайных колебаниях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №12. С. 476-482.

12. Власова Е. Е., Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Долговечность авиационной конструкции со сварными соединениями при случайном нагружении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №9. С. 376-389.

13. Герасимов О.Н., Доросинский А.Ю., Березин М.Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. №3 (19). С. 37-42.

14. Особенности проверки изделий ракетно-космической техники на вибропрочность / М.А. Зайцев, Д.В. Остапенко, Д.С. Швецова, Т.А. Королева, Журавлев В.Ю. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 1. № 14. С. 189-191.

15. Развитие экспериментальной базы прочностных исследований ЦИАМ / Ю.А. Ножницкий, Б.А. Балугев, Ю.А. Федина, Д.В. Шадрин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2019. № 57. С. 55-69.

16. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4 (21). С.35-40.

17. Мыльников В. В. Кондрашкин О. Б., Шетулов Д. И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. 177 с.

18. Когаев В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 354 с.

19. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 302 с.

20. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2011. 287 с.

21. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 2 (23). С. 6-15.

22. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, М.А. Скотникова, Ю.А. Фадин, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

23. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, С.Е. Александров, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Н. Сергеев, Д.В. Малий, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

24. Триботехнические характеристики композиционных покрытий с матрицей из полигетероарилена пм-дадфэ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при трении скольжения в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, Д.А. Провоторов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3 (66). С. 17-28.

25. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочнённых углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х / А.Д. Бреки, Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова, О.В. Толочко, С.Е. Александров, А.А. Лисенков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.В. Малий, А.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11-23.

References

1. Sunusi Marwana Manladan, Farazila Yusof, S. Ramesh, Fadzil Jamaludin, Zhen Luo, Sansan Ao. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90, pp.605–634.

2. Abioye T.E., Anas N.M., Irfan M.K., Anasyida A. S., Zuhailawati H. Parametric Optimization for Resistance Spot-Welded Thin-Sheet Aluminum Alloy 5052-H32. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 44. 7617–7626 (2019).

3. Mingfeng Li, Yanjun Wang, Zhen Niu, Shanglu Yang. Study on the Weld-Bonding Process Optimization and Mechanical Performance of Aluminum Alloy Joints. *Automotive Innovation*, 2020, vol. 3, pp.221–230.

4. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 5-8, pp. 885–895.

5. Astafyeva N. A., Buzin A. S. Issledovanie vliyaniya vidov predvaritel'noi obrabotki na kachestvo svarnykh oblegchennykh konstruksii iz alyuminievykh splavov [Investigation of the influence of types of pretreatment on the quality of welded lightweight structures made of aluminum alloys]. *Vestnik IrGTU = Bulletin of IrSTU*, 2018, no.7 (138), pp.10-18.

6. Đurić A., Klobčar D., Milčić D., Markovic B. Parameter optimization and failure load prediction of resistance spot welding of aluminum alloy 57547. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659* (2019), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012042>

7. Turnage S., Darling K., Rajagopalan M., Whittington W., Tschopp M., Peralta P., Solanki K. Quantifying structure-property relationships during resistance spot welding of an aluminum 6061-T6 joint. arXiv preprint arXiv:160504251, 2016.

8. Gureeva M.A., Grushko O.E., Klochkov G.G. Issledovanie svoistv svarnykh soedinenii alyuminievogo splava V1341, vpolnennykh kontaktnoi tochechnoi svarkoi [Investigation of the properties of welded joints of aluminum alloy B1341 made by contact spot welding]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Procurement production in mechanical engineering*, 2016, no. 7, pp. 8-12.

9. Florea R.S., Bammann D.J., Yeldell A., Solanki K.N., Hammi Y. Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2013, vol. 45, pp. 456-465.

10. Andreeva L.P., Ovchinnikov V.V., Sidorov A.A. Optimizatsiya razmerov tochechnykh soedinenii pri elektrokontaktnoi svarke alyuminievykh splavov [Optimization of the sizes of point joints during electric contact welding of aluminum alloys]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2015, no.3, pp. 23-32.

11. Zaretsky M.V., Sidorenko A. S. Napryazhennoe sostoyanie aviatsionnoi konstruksii so svarnymi soedineniyami pri sluchainykh kolebaniyakh [The stressed state of an aircraft structure with welded joints at random fluctuations]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulsU. Technical Sciences*, 2018, no.12, pp. 476-482.

12. Vlasova E. E., Zaretsky M.V., Sidorenko A.S. Dolgovechnost' aviatsionnoi konstruksii so svarnymi soedineniyami pri sluchainom nagruzhении [Durability of an aircraft

structure with welded joints under random loading]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulSU. Technical Sciences*, 2019, no.9, pp. 376-389.

13. Gerasimov O.N., Dorosinsky A.Yu., Berezin M.N. Issledovanie vliyaniya vozdeistviya vibratsionnykh nagruzok na konstruktsionnye materialy izdelii elektronnoi tekhniki [Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex Systems*, 2017, no.3 (19), pp. 37-42.

14. Zaitsev M.A., Ostapenko D.V., Shvetsova D.S., Koroleva T.A., Zhuravlev V.Yu. Osobennosti proverki izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki na vibro-prochnost' [Features of testing rocket and space technology products for vibration resistance]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics*, 2018, vol. 1, no. 14, pp. 189-191.

15. Scissors Yu.A., Baluyev B.A., Fedina Yu.A., Shadrin D.V. Razvitie eksperimental'noi bazy prochnostnykh issledovaniy TsIAM [Development of the experimental base of strength studies of CIAM]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*, 2019, no. 57, pp. 55-69.

16. Erasov V.S., Nuzhny G.A. Zhestkii tsikl nagruzheniya pri ustalostnykh ispytaniyakh [Rigid loading cycle during fatigue tests]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2011, no.4 (21), pp.35-40.

17. Mylnikov V. V. Kondrashkin O. B., Shetulov D. I. *Tsiklicheskaya prochnost' i dolgovechnost' konstruktsionnykh materialov* [Cyclic strength and durability of structural materials]. N. Novgorod, NNGASU Publ., 2018, 177 p.

18. Kogaev V.P. *Raschet na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Calculation of strength under stresses, variables in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 354 p.

19. Shkolnik L.M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy* [Methods of fatigue tests]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978, 302 p.

20. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2011, 287 p.

21. Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Sergeev A.N., Tikhonova I.V., Kutepov S.N., Kuzovleva O.V., Ageev E.V. Perspektivnye stali dlya kozhukhov domennykh agregatov [Promising steels for blast furnace casings]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2017, vol. 7, no. 2 (23), pp. 6-15.

22. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Skotnikova M.A., Fadin Yu.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev A.N., Ageev E.V. Issledovanie protivoznosnykh svoystv plastichnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego dispersnye chastitsy sloistogo modifikatora treniya [Investigation of anti-wear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (64), pp. 75-82.

23. Medvedeva V.V., Breki A.D., Krylov N.A., Alexandrov S.E., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Sergeev A.N., Maliy D.V., Provotorov D.A. Tribotekhnicheskie svoystva plastichnykh smazochnykh kompozitsionnykh materialov s napolnitelyami iz dispersnykh chastits medi i tsinka [Tribotechnical properties of plastic lubricating composite materials with fillers from dispersed particles of copper and zinc]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 2 (65), pp. 109-119.

24. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Fadin Yu.A., Starikov N.E., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Ageev E.V., Provotorov D.A. Tribotekhnicheskie kharakteristiki kompozitsionnykh pokrytii s matritsei iz poligeteroarilena pm-dadfe i napolnitelyami iz nanochastits dikhal'kogenidov vol'frama pri trenii skol'zheniya v srede zhidkogo smazochnogo materiala [Tribotechnical characteristics of composite coatings with a matrix of polyheteroarylene pm-dadfe and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles during sliding friction in a liquid lubricant medium]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 3 (66), pp. 17-28.

25. Breki A.D., Koltsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Alexandrov S.E., Lisenkov A.A., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Maliy D.V., Sergeev A.N., Ageev E.V., Gvozdev A.E. Antifriktsionnye svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove alyuminiya, uprochnennykh uglerodnymi nanovoloknami, pri trenii po stali 12Kh [Antifriction properties of composite materials based on aluminum reinforced with carbon nanofibers during friction on 12X steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 4 (21), pp. 11-23.

Информация об авторах / Information about the Authors

Балашов Сергей Александрович, аспирант кафедры колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: balashovsa@student.bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6729-9850>

Sergey A. Balashov, Post-Graduate Student of the Department of Wheeled Machines and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: balashovsa@student.bmstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6729-9850>

Зезюля Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: zezyulya-valera@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7442-5608>

Valery V. Zezyulya, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: zezyulya-valera@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7442-5608>

Булычев Всеволод Валериевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой колесных машин и прикладной механики, Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: vs.bulychev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8250-7088>

Vsevolod V. Bulychev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation, e-mail: vs.bulychev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8250-7088>

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>

Ekaterina V. Ageeva, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8457-6565>