

Научная статья
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 620.19
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.021

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПОДВЕСОВ ПРОВОДОВ ЛЭП МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Александр Анатольевич Бердыченко¹, Сергей Геннадьевич Иванов²,
Михаил Алексеевич Гурьев³

^{1,2,3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ berd50@mail.ru

² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787df>

Аннотация. В работе проведены результаты исследований причин разрушения подвесов линий электропередач методами структурно-фазового металлографического анализа. В результате исследований установлено, что причиной разрушения скоб крепления линии ЛЭП в большинстве случаев является непараллельность осей резьбовых частей скобы крепления. Это не позволяет надёжно закрепить крепление на траверсе, что приводит к ослаблению резьбового соединения и возникновению дополнительных изгибающих циклических напряжений, вызывающих усталостное разрушение.

Ключевые слова: разрушение, усталость, металлографический анализ.

Для цитирования: Бердыченко А.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А. Исследование причин разрушения подвесов проводов ЛЭП методами структурно-фазового металлографического анализа // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 147–153. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.021.

Original article

RESEARCH INTO THE CAUSES OF SUSPENSION WIRES DESTRUCTION OF POWER TRANSMISSION LINES BY METHODS OF STRUCTURAL-PHASE METALLOGRAPHIC ANALYSIS

Alexander A. Berdychenko¹, Sergey G. Ivanov², Mikhail A. Guryev³

^{1,2,3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ berd50@mail.ru

² serg225582@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787df>

Abstract. The results of researches on the causes of suspension wires destruction of power transmission lines by methods of structural-phase metallographic analysis are described in this paper.

It was found out that the cause of the destruction of the power line fastening brackets is not the parallelism of the axes of the threaded parts of the fastening bracket in most cases. This particularity does not allow the fastening to be securely fastened to the traverse, as a result, it leads to a weaken-

© Бердыченко А.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., 2021

ing of the threaded connection and the occurrence of additional bending cyclic stresses, which cause fatigue failure.

Keywords: fracture, fatigue, metallographic analysis.

For citation: Berdychenko, A.A., Ivanov, S.G. & Guryev, M.A. (2021). Research into the causes of suspension wires destruction of power transmission lines by methods of structural-phase metallographic analysis. *Polzunovskiy vestnik*, 1,147-153. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.021

Ежегодно в Российской Федерации происходят сотни аварий высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), в результате которых без электроснабжения остается большое количество потребителей как предприятий, так и домохозяйств. Это приносит ощутимый экономический ущерб, в среднем около 0,3–0,5 % ВВП в результате недополучения прибыли из-за простоя обесточенных предприятий, различных потерь и затрат на ликвидацию последствий аварий. Наиболее частой причиной аварий линий ЛЭП является обрыв проводов. При этом физическое разрушение

(обрыв) самих проводов – менее распространенное явление по сравнению с разрушением подвесов этих проводов, что и является причиной обрыва проводов.

Характерным разрушением узлов крепления подвесов проводов ЛЭП является разрушение U образной скобы (рисунок 1), которые в соответствии с ТУ 3449 108-00111120-94 и ТУ 34 13.10310-90 изготавливаются из стального прута диаметром 24 мм, с резьбой на концах, двух упорных шайб с резьбой (поз. 2 и 4 на рисунке 1), двух шайб (поз. 1 и 3 на рисунке 1) и двух гаек.



Рисунок 1 – Узел крепления КГП-16-1 (а); элементы резьбового соединения (б), где 1, 3 – шайбы, 2, 4 – шайба упорная; гайки (в)

Figure 1 – Mounting unit KGP-16-1 (a); elements of the threaded connection (b), where 1, 3 – washers, 2, 4 – thrust washer; and nuts (in)

В результате визуального осмотра установлено, что форма скобы узла крепления имеет отклонения от чертежа узла крепле-

ния, приведённого в технических условиях. Согласно техническим условиям, оси резьбовых частей скобы должны быть параллельны

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПОДВЕСОВ ПРОВОДОВ ЛЭП МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

друг другу, в то время как у скобы, представленной на исследование, угол между ними составляет 30° (рисунок 1, а).

Торцы резьбы скобы имеют ярко выраженные вмятины, деформирующие первые витки резьбы. Упорная шайба поз. 2 (рисунок 1) полностью покрыта цветами побежалости тёмно-коричневого цвета. На упорной шайбе поз. 4 (рисунок 1) так же имеется пятно цветов побежалости коричневого цвета, но меньших размеров.

Нижняя часть скобы имеет значительную выработку глубиной порядка 1 мм, расположенную несимметрично относительно оси центра масс скобы. В области выработки на поверхности узла имеется пятно цветов побежалости тёмно-коричневого цвета (рисунок 1). Температура образования пятна с цветами побежалости такого цвета соответствует примерно 265°C [1, 2].

Разрушение скобы произошло в области второго-третьего витков конца резьбы. Резьбовая часть узла имеет повреждения как профиля резьбы, так и общую деформацию в виде искривления оси (рисунок 1, а).

Поверхности разрушения (изломы) имеют разный характер и разную степень окисленности (рисунок 2). Излом поз. 1 (рисунок 2) имеет менее окисленную, чем излом поз. 2 (рисунок 2), поверхность, что свидетельствует о более позднем его возникновении). Кроме того, излом поз. 2 характерен для усталостного разрушения при двустороннем изгибе со слабым локальным концентратором при низком механическом номинальном напряжении, а излом поз. 1 – усталостному разрушению при растяжении и одностороннем изгибе с концентратором напряжения по окружности при высоком номинальном механическом напряжении [3].



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Поверхности изломов узла, где а) – общий вид, б) – поверхность излома по поз. 1 на рисунке а), в) – поверхность излома по поз. 2 на рисунке а)

Figure 2 – Knot fracture surfaces, where a is a) general view, б) is a fracture surface according to pos. 1 in figure a), в) – fracture surface according to pos. 2 in figure a)

Профиль резьбы (рисунок 2, в) имеет повреждения в виде смятия вершин витков со стороны зарождения усталостной трещины, покрытые толстым слоем окислов тёмно-коричневого цвета (рисунок 3). На вершинах витков резьбы наблюдаются риски, расположенные на одной линии.



Рисунок 3 – Фрагмент узла, представленного на рисунке 2, б с деформированной резьбой, где 1 – линия плоскости шлифа, представленного на рисунке 4

Figure 3 – Fragment of the assembly shown in Figure 2, b with a deformed thread, where 1 is the line of the plane of the thin section in figure 4

Шайба резьбового соединения поз. 2 (рисунок 2, а, поз. 3, рисунок 1, б) имеет значительную вмятину от гайки на 1/3 площади соприкосновения гайки и шайбы, глубина которой достигает 0,8–1,0 мм. Причиной образования вмятины может быть неполное прилегание гайки к поверхности шайбы, возникшее из-за непараллельности осей резьбы скобы (см. рисунок 1, а). Резьба на упорных гайках (поз. 2 и 4, рисунок 1, б) деформирована.

Химический состав материала скобы подвеса определяли на эмиссионном спектрометре SOLARIS CCD Plus.

Результаты исследования химического состава стали (таблица 1) показали, что она изготовлена из стали 40ХА по ГОСТ 4543 2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали».

Таблица 1 – Результаты исследования химического состава стали скобы

Table 1 – The results of the study of the chemical composition of the steel staples

Элемент	Сталь скобы	Сталь 40Х*
	Содержание элементов, %	
1	2	3
C	0,381±0,021	0,36–0,44
Si	0,256±0,005	0,17–0,37
Mn	0,700±0,005	0,50–0,80

Продолжение таблицы 1/ Continuation of table 1

1	2	3
P	0,008±0,001	< 0,035
S	0,017±0,001	< 0,035
Cr	0,994±0,006	0,80–1,10
Ni	0,091±0,001	< 0,30
Cu	0,008±0,013	< 0,30
Mo	0,003±0,001	< 0,11

Твёрдость материала скобы подвеса определяли на приборе Виккерса. Измеренная твёрдость составила $HV_{10} = 258 \pm 23$. На основании данных сравнительной таблицы твёрдости, приведённой в DIN 50150, сталь с такой твёрдостью должна иметь предел прочности $\sigma_b = 820 \pm 80$ МПа, что, согласно ГОСТ 4543-71, хорошо совпадает с пределом прочности для стали 40Х, прошедшей закалку и высокий отпуск: $\sigma_b = 860$ МПа. Полученные данные позволяют оценить разрушающую нагрузку для исследуемой скобы. Исходя из условий прочности

$$\sigma_{max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{k}; \quad \sigma_{max} = \frac{2P_{max}}{\pi D^2};$$

$$P_{max} = \frac{\sigma_T \pi D^2}{2k};$$

где σ_{max} и P_{max} – максимальные напряжение и разрушающая нагрузка, D – диаметр, σ_T – предел текучести металла, k – коэффициент запаса прочности (для углеродистых сталей $k = 2,5–4,0$). Предел текучести для стали 40Х с $\sigma_b = 860$ МПа согласно ГОСТ 4543 71 должен составлять 720 МПа. Тогда даже при $k = 4,0$ разрушающая нагрузка $P_{max} = 163$ КПа, в то время как разрушающая нагрузка для крепления КГП 16 1 согласно ТУ 3449 108 00111120-94 и ТУ 34 13.10310-90 составляет 160 КПа. Таким образом, прочность стали, из которой изготовлена скоба исследуемого крепления, соответствует требованиям технических условий ТУ 3449 108 00111120-94 и ТУ 34 13.10310-90.

Структурные исследования материала скобы

В результате исследования макроструктуры профиля резьбы в области, прилегающей к поверхности разрушения, представленной на рисунке 2, б, на наклонной поверхности профиля резьбы обнаружены трещины глубиной 0,3–0,5 мм, ориентированные параллельно поверхности разрушения (рисунок 4, а). Витки резьбы несколько деформированы (наклонены) в сторону гайки. Поверх-

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПОДВЕСОВ ПРОВОДОВ ЛЭП МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

ность профиля резьбы имеет меньшую травимость.

Сердцевина скобы имеет ферритно-перлитную структуру с некоторой полосчатостью. Микротвердость сердцевины скобы 275–300 кгс/мм². Поверхностная зона резьбы с пониженной травимостью имеет толщину 300–350 мкм. Микротвердость в ней снижается в направлении поверхности от 275–300 до

190 кгс/мм², что свидетельствует об обезуглероживании металла в этой области, причиной которого является нагрев поверхности до температуры порядка 265 °С (см. п. 1, 3). Металл, прилегающий к поверхности излома, представленной на рисунках 2, в и 3 не имеет следов пластического течения (рисунок 4, б). Поверхность резьбы покрыта слоем окисла толщиной порядка 20 мкм.

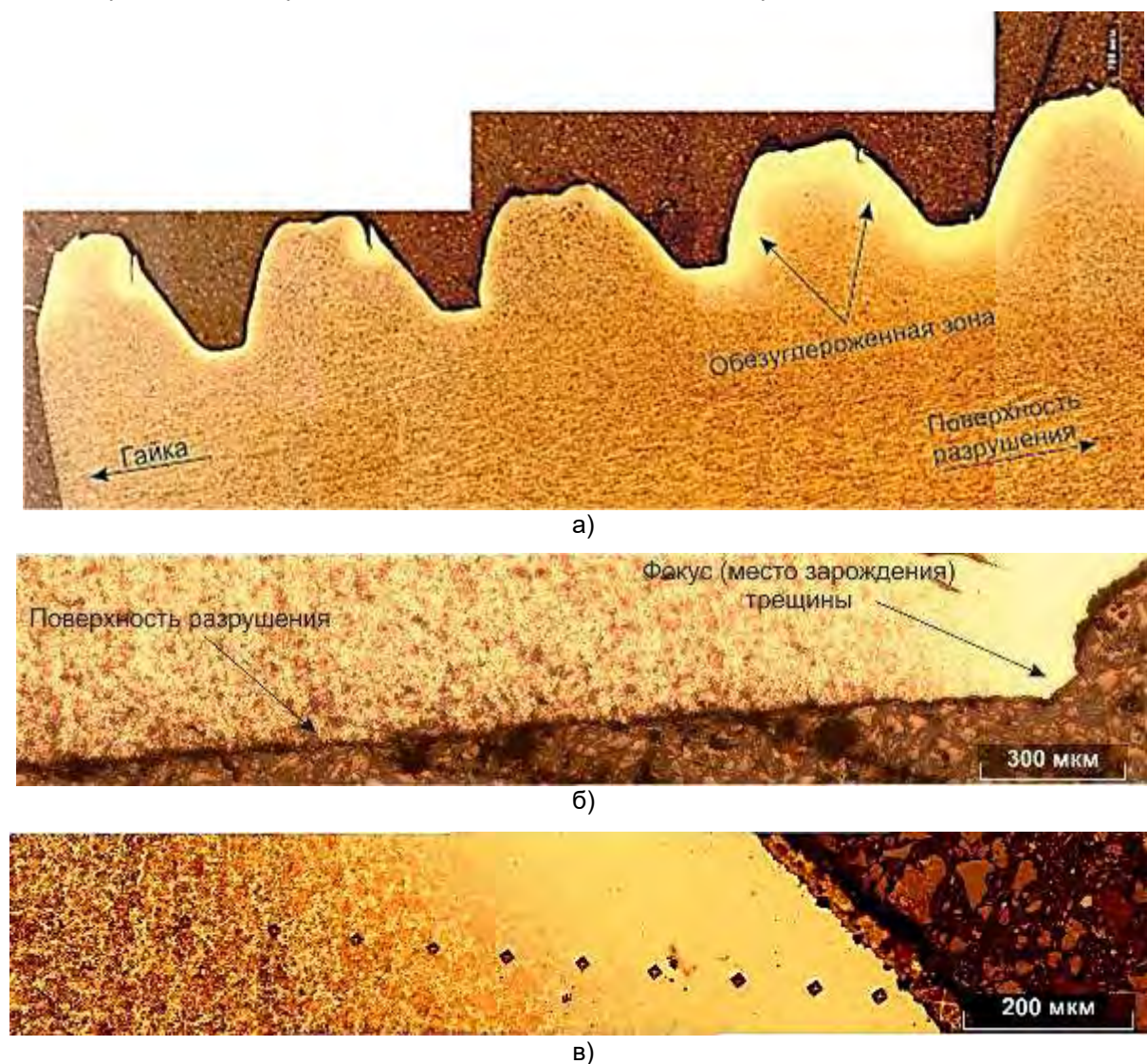


Рисунок 4 – Макроструктура профиля резьбы в плоскости, указанной «1» на рисунке 3 (а), микроструктура фокуса трещины и поверхности излома (б), микроструктура поверхностных слоёв профиля резьбы с обезуглероживанным слоем (в)

Figure 4 – Macrostructure of the thread profile in the plane indicated by «1» in Figure 3 (a), microstructure of the crack focus and fracture surface (б), microstructure of surface layers of a thread profile with a decarburized layer (в)

Микроструктура прилегающего к поверхности разрушения металла (поз. 1, рисунок 2, а, б) характерна для усталостного разрушения при растяжении и одностороннем из-

гибе с концентратором напряжения по окружности при высоком номинальном напряжении (рисунок 5). Металл в этой зоне не претерпел пластической деформации, что свидетельству-

ет о скачкообразном развитии трещины, характерном для усталостного разрушения резьбового соединения [4–8]. Микротвердость сердцевины металла 275–300 кгс/мм², а в обезугле-

роженной зоне снижается в направлении от сердцевины к поверхности от 275–300 до 190 кгс/мм².

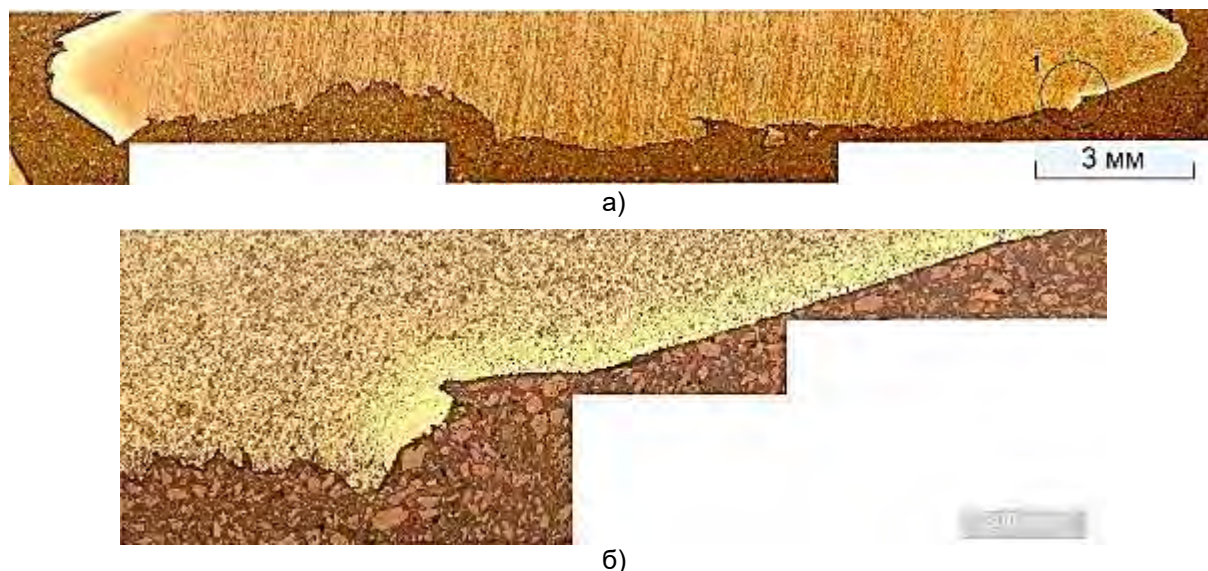


Рисунок 5 – Макроструктура металла вблизи поверхности разрушения, представленной на рисунках 2, а, б (а) и микроструктура области «1» на рисунке 5, а (б)

Figure 5 – Macrostructure of the metal near the fracture surface shown on Figures 2, a, b, (a) and the microstructure of the region «1» in Figures 5, a (b)

Анализ полученных результатов

Разрушение скобы крепления происходило в два этапа:

1. На первом этапе разрушение произошло по поверхности, показанной на рисунках 2, а (поз. 2) и 2, в, доказательством чему является большая степень окисленности этой поверхности. Характер поверхности разрушения свидетельствует о том, что скоба длительное время подвергалась циклическим изгибающим нагрузкам с низким напряжением. Инициатором возникновения трещины при таких условиях мог стать любой элемент резьбы, являющийся, по сути, слабым концентратором напряжений. Нештатным в этих условиях явилось возникновение циклических изгибающих напряжений. Причиной их возникновения могло стать несоответствие формы скобы требованиям технических условий, а именно не параллельность осей резьбы скобы. Такое явление не дало возможности надёжно закрепить крепление к траверсе, что подтверждается неравномерной выработкой на шайбе. Это создало условия для возникновения некоторого статического изгибающего момента, ослабления резьбового соединения и привело к возникновению циклических

изгибающих нагрузок, приводящих к усталостному разрушению.

2. На втором этапе произошло разрушение скобы крепления по поверхности, показанной на рисунках 2, а (поз. 1) и 2, б. Характер поверхности разрушения свидетельствует о том, что скоба разрушилась от одновременно действующих растягивающих и циклических односторонних изгибающих нагрузках с высоким номинальным напряжением. Концентратором напряжения явилась впадина профиля резьбы. После разрушения первой ветви скобы вся нагрузка крепления передается на оставшуюся ветвь (площадь сечения металла, сопротивляющегося действующим нагрузкам, уменьшилась вдвое). Кроме того, из-за возникшей несимметричности приложения нагрузки к креплению, возник односторонний значительный изгибающий момент, величина которого циклически изменялась в связи с действием ветровой нагрузки. Такие условия привели к сравнительно быстрому окончательному разрушению крепления.

Таким образом, причиной разрушения скобы крепления линии ЛЭП явилась непараллельность осей резьбовых частей скобы крепления. Такое явление не позволило надёжно закрепить крепление на траверсе, что привело со временем к ослаблению

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПОДВЕСОВ ПРОВОДОВ ЛЭП МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

резьбового соединения и возникновению дополнительных изгибающих циклических напряжений, вызвавших усталостное разрушение. Причиной деформации скобы вряд ли мог стать производственный дефект. Вероятнее всего деформация возникла при нарушении технологии монтажа подвеса, а именно применение скобы, не соответствующей размерам траверсы, к которой она крепится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Ю.Е., Адашкин А.М. Справочник молодого термиста. М.: Высшая школа, 1986. 239 с.
2. Официальная страница ярославского мастера Ильи Куликова: сайт. Ярославль. URL: <http://www.bestbulat.ru/art26.html> (дата обращения: 08.02.2021). Текст электронный.
3. Гордеева Т.А., Зайцев А.М., Фридман Я.Б. Строение и анализ изломов металлов. М.: «Машгиз», 1960. 128 с.
4. Дроздов М.А. Усталостное разрушение болтов, шпилек и гаек. Предел выносливости крепежа. Текст: электронный // Сайт Метизно-фланцевого завода. URL: http://www.12821-80.ru/tech/121-Ustalost_boltov_gaek_shpilek. (дата обращения: 08.02.2021).
5. Про крепеж: сайт. URL: <http://pro-krepezh.ru/oslablenie-boltov-rezbovyyhkrepezhnyihdetaleyotvibratsii/>. Текст: электронный (дата обращения: 08.02.2021).
6. Усталостное разрушение высокопрочных болтов в строительных стальных конструкциях / Л.И. Гладштейн, Н.И. Кельберин, В.И. Мейтин, Р.А. Милюевский // Промышленное и гражданское строительство, 2007. № 12. С. 24–27.
7. Романов А.Н. Закономерности усталостного разрушения металлических материалов // Металловедение и термическая обработка металлов, 2006. № 9. С. 19–27.
8. Шанявский А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 179. С. 32–44.

Информация об авторах

А. А. Бердыченко – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Современные специальные материалы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, заведующий лабораторией Центра коллективного пользования лабораторно-исследо-

вательским оборудованием Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

REFERENCES

1. Sedov, Yu.E. & Adaskin, A.M. (1986). *Handbook of a young thermist*. Moscow: Higher school. (In Russ.).
2. Oficial'naya stranica yarovskogo мастера Ил'i Kulikova. (2020). Retrieved from <http://www.bestbulat.ru/art26.html>. (In Russ.).
3. Gordeeva, T.A., Zaitsev, A.M., Fridman, Ya.B. (1960). *Structure and analysis of metal fractures*. Moscow: «Mashgiz». (In Russ.).
4. Drozdov, M.A. (2011). *Ustalostnoe razrushenie boltov, shpilek i gaek. Predel vynoslivosti krepezh*. Retrieved from http://www.12821-80.ru/tech/121-Ustalost_boltov_gaek_shpilek. (In Russ.).
5. *Pro krepezh* (2021). Retrieved from <http://pro-krepezh.ru/oslablenie-boltov-rezbovyyhkrepezhnyihdetaleyotvibratsii/>. (In Russ.).
6. Gladstein, L.I., Kel'berin, N.I., Meitin, V.I. & Milievsky, R.A. (2007). Fatigue destruction of high-strength bolts in building steel structures. *Industrial and civil construction*, (12), 24–27. (In Russ.).
7. Romanov A.N.(2006). Laws of fatigue fracture of metallic materials. *Metallurgy and heat treatment of metals*, (9), 19–27. (In Russ.).
8. Shanyavsky, A.A. (2012). Models of initiation and development of fatigue fracture under the surface of metals. *Scientific Vestnik of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, (179), 32–44. (In Russ.).

Information about the authors

A. A. Berdychenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Modern Special Materials, Polzunov Altai State Technical University.

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Center for Shared Use of Laboratory and Research Equipment, Polzunov Altai State Technical University.

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.02.2021; одобрена после рецензирования 26.02.2021; принята к публикации 01.03.2021.

The article was received by the editorial board on 05 Feb 21; approved after reviewing on 26 Feb 21; accepted for publication on 01 Mar 21.