

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АВТОМОБИЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. В. Родионов, С. В. Карпухин, С. В. Суменков

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
e-mail: dekauto@pguas.ru

Аннотация. Безотказность резьбовых соединений определяется стабильностью их затяжки, которая, в частности, зависит от наличия дефектов и примесей в структуре материала сопряженных деталей. В случае воздействия интенсивных вибраций возникают колебания со знакопеременными напряжениями, вызывающие не только перемещение дислокаций и дефектов, но и активизирующие проникновение разнообразных примесей. На основании результатов собственных исследований установлено, что ослабление первоначальной затяжки винтов в узлах отечественных легковых автомобилей является причиной трети отказов техники. Подчеркивается, что вопросы, связанные с контролем и обеспечением стабильности затяжки резьбовых соединений в условиях вибрационных воздействий, должны рассматриваться в комплексе с особенностями структуры материала. Целью исследований является повышение надежности автомобилей и других транспортно-технологических машин за счет разработки технологических и конструкционных решений, связанных с изготовлением и эксплуатацией узлов и агрегатов, имеющих резьбовые соединения.

На основании рассмотрения модели локальной дислокационной петли с облаком Коттрелла определено, что снижение модуля упругости приводит к возрастанию коэффициента податливости болта и, следовательно, к увеличению его деформации в условиях вибрационного воздействия. Это неизбежно вызывает уменьшение усилия предварительной затяжки резьбового соединения. Считается, что деформация и податливость болта в значительной степени определяется динамикой неоднородной структуры металла в условиях эксплуатации автомобилей. Предполагается, что основное влияние на податливость болта оказывают подвижные включения со значительным коэффициентом диффузии. Установлено, что с учетом поправки, зависящей от времени, вынужденная диффузия посторонних включений аналогична свободной диффузии. При этом длина перемещения примеси сопоставима с размером облака Коттрелла, то есть за время повторяющегося нагружения длина сегмента дислокации фактически остается неизменной. Это верно при определенном значении коэффициента диффузии, при большей величине которого с возрастанием длины дислокационного сегмента будет нарушаться стабильность модуля упругости, максимально возможное изменение, которого может составлять примерно десять процентов.

Предложенная модель, показывающая ослабление затяжки резьбовых соединений в условиях вибрации, верна для соединений, изготовленных методами со снятием стружки, потому что плотность дислокаций значительно зависит от технологического способа образования резьбы.

В результате дальнейших исследований планируется предложить на уровне патента Российской Федерации новое конструктивное решение обеспечения стабильности затяжки резьбового соединения в условиях вибрационного воздействия.

Ключевые слова: автомобиль, эксплуатация, безотказность, резьбовое соединение, дислокация, примесь, вибрация, облако Коттрелла.

Для цитирования: Родионов Ю. В., Карпухин С. В., Суменков С. В. Теоретическое обоснование безотказности резьбовых соединений автомобилей в процессе эксплуатации // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 3. – С. 135–141. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-3-135.

THEORETICAL JUSTIFICATION OF RELIABILITY OF THREADED CONNECTIONS OF CARS DURING OPERATION

Yu. V. Rodionov, S. V. Karpukhin, S. V. Sumenkov

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
e-mail: dekauto@pguas.ru

Abstract. The reliability of threaded connections is determined by the strength of their tightening, which, in particular, depends on the presence of defects and impurities in the material structure of the mated parts.

In the case of intense vibrations, vibrations with alternating stresses occur, causing not only the movement of dislocations and defects, but also activating the penetration of various impurities. Based on the results of our own research, it was found that the weakening of the initial tightening of screws in the nodes of domestic passenger cars is the cause of one-third of equipment failures. It is emphasized that issues related to monitoring and ensuring the stability of the tightening of threaded connections in conditions of vibration effects should be considered in conjunction with the features of the material structure. The goal of the research is to improve the reliability of vehicles and other transport and technological machines by developing technological and structural solutions related to the manufacture and operation of units and assemblies with threaded connections.

Based on the consideration of the local dislocation pet model with the Cottrell cloud, it was determined that a decrease in the elastic modulus leads to an increase in the bolt's pliability coefficient and, consequently, to an increase in its deformation under vibration conditions. This inevitably causes a reduction in the pre-tightening force of the thread connection. It is believed that the deformation and pliability of the bolt is largely determined by the dynamics of the inhomogeneous structure of the metal in the operating conditions of cars. It is assumed that the main influence on the pliability of the bolt is provided by mobile inclusions with a significant diffusion coefficient. It was found that, taking into account the time-dependent correction, the forced diffusion of extraneous inclusions is similar to free diffusion. In this case, the length of the impurity change is comparable to the size of the Cottrell cloud, that is, during repeated loading, the length of the dislocation segment actually remains unchanged. This is true for a certain value of the diffusion coefficient, at a higher value of which the stability of the elastic modulus will be violated with increasing length of the dislocation segment, the maximum possible change of which may be approximately ten percent.

The proposed model showing the weakening of the tightening of threaded connections under vibration conditions is correct for connections made using chip removal methods, because the dislocation density depends significantly on the technological method of thread formation.

As a result of further research, it is planned to propose a new design solution at the level of the patent of the Russian Federation to ensure the stability of the tightening of the threaded connection under vibration conditions.

Keywords: vehicle, operation, failsafe, threaded connection, dislocation, impurity, vibration, Cottrell cloud.

Cite as: Rodionov, Yu. V., Karpukhin, S. V., Sumenkov, S. V. (2020) [Theoretical justification of reliability of threaded connections of cars during operation]. *Интеллект. Инновации. Инвестиции* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 3, pp. 135–141. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-3-135.

Введение

В грузовых и легковых автомобилях, а также других транспортно-технологических машинах, значительная часть узлов и агрегатов формируется резьбовыми соединениями (РС), которые определяют надежность этих соединений [1–5, 7, 11, 16]. Можно предположить, что безотказность и работоспособность РС зависит от исходной затяжки и её неизменностью в процессе эксплуатации [13]. В научной литературе описаны и проанализированы многочисленные примеры снижения первоначальной затяжки РС и её влияние на эксплуатационные свойства автомобилей и других технических устройств [6, 8, 10, 14]. Известно, что автомобиль ВАЗ-21213 имеет пятиступенчатую коробку перемены передач, блок зубчатых колес пятой передачи которой крепится валу винтом М10х80. В результате знакопеременных периодических нагрузок первоначальная затяжка винта ослабевает и увеличивается размах постороннего внешнего воздействия. В результате болт разрушается от усталости, что является причиной трети отказов данного автомобиля [9].

Решение научной проблемы безотказности РС в области эффективного развития автомобильного транспорта обеспечит его работоспособность и повысит эффективность обслуживания и минимизирует затраты ресурсов.

Вопросы, связанные с контролем и обеспечением стабильности затяжки РС в условиях вибрационных воздействий, должны рассматриваться в комплексе с особенностями структуры материала. В случае воздействия интенсивных вибраций возникают колебания со знакопеременными напряжениями, вызывающие не только перемещение дислокаций и дефектов, но и активизирующие проникновение разнообразных примесей [12].

Целью исследований является повышение надежности автомобилей и других транспортно-технологических машин за счет разработки технологических и конструкционных решений, связанных с изготовлением и эксплуатацией узлов и агрегатов, имеющих резьбовые соединения.

Теоретическое обоснование

Предлагается в рамках модели локальной дислокационной петли с облаком Коттрелла развить теорию снижения момента затяжки РС под действием микровибрации. Рассмотрим часть дислокации протяженностью l , которая в стабильном состоянии удерживается примесными атомами в прямолинейном виде (рисунок 1). При периодическом воздействии возникает деформация дислокации, при которой появляется диффузия посторонних включений. При этом число последних на дисло-

кационной линии $C_0 = l / L_{c0}$ (L_{c0} – длина сегмента дислокации). Протяженность дислокации сегмента увеличивается, а число точек крепления снижается,

т. е. происходит внутренняя диффузия включений в зоне деформации.

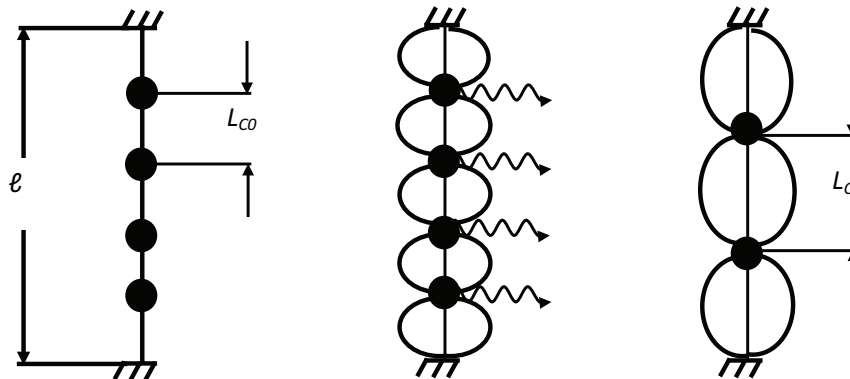


Рисунок 1. Модель ослабления затяжки резьбового соединения

Используя феноменологическое уравнение, рассмотрим процесс принудительной диффузии примеси в поле дислокационной деформации. Уравнение описывает диффузию в поле механических напряжений для средней скорости диффузионного дрейфа при условии, что их градиент направлен вдоль оси X

$$V_d = \frac{D\gamma V_0}{kT} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (1)$$

где

D – коэффициент диффузии посторонних включений;

γ – коэффициент, зависящий от концентрации атомов вещества;

V_0 – атомный объем;

σ – внешнее механическое напряжение;

k – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

Деформация дислокации согласно модели дислокационного трения Гранато и Люкке представляется выражением

$$S_d = \frac{8 \cdot b \cdot \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)}{\pi \cdot A [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega \cdot d)^2]^{1/2}}; \quad (2)$$

здесь,

b – величина вектора Бюргерса; $A = \pi \cdot \rho \cdot b^2$ – эффективная масса дислокации, отнесенная к единицы длины;

ρ – плотность материала;

σ_0 – амплитуда механического напряжения;

ω – частота циклического нагружения;

ω_0 – резонансная частота, зависящая от длины дислокационной петли l и равная $(C/A)^{1/2} \cdot \pi/l$; $C = 2 \cdot G \cdot b^2 / [\pi \cdot (1 - \nu)]$ – эффективное натяжение деформированной дислокации; n – число Пуассона;

G – модуль сдвига;

$d = B/A$; B – сила демпфирования, приходящаяся на единицу длины дислокации; j – случайная фаза.

Учитывая, что $\partial \sigma / \partial x = \rho \cdot \partial^2 S_d / \partial t^2$, для скорости диффузионного дрейфа будем иметь

$$\mathcal{G}_\alpha = -\mathcal{G}_{0d} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3)$$

где

$$\mathcal{G}_{0d} = \rho \cdot \frac{8 \cdot b \cdot \sigma_0 \cdot \omega^2}{\pi \cdot A \cdot k \cdot T} \cdot D \cdot \gamma \cdot V_0 \cdot [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega \cdot d)^2]^{-1/2}$$

Уравнение диффузии включений в поле дислокационной деформации с учетом (3) будет иметь вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mathcal{G}_{0d} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (4)$$

здесь $N(x, t)$ – концентрация включений в облаке Коттрелла.

Можно предположить, что с учетом поправки, зависящей от времени, вынужденная диффузия посторонних включений аналогична свободной диффузии. Поэтому функция Грина выглядит следующим образом

$$G(x, t; x_0, t_0) = [4 \cdot \pi \cdot D \cdot (t - t_0)]^{-1/2} \times \exp \left\{ - \frac{\left[x + \frac{\mathcal{G}_{0d}}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) - x_0 - \frac{\mathcal{G}_{0d}}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t_0 + \varphi) \right]^2}{4 \cdot D \cdot (t - t_0)} \right\}. \quad (5)$$

Усредним (5) для диапазона времени $|t - t_0| > T$, по интервалу $T - 2 \cdot \pi / \omega$ периодического воздействия и по независимой фазе j :

$$\langle G(x, t; x_0, t_0) \rangle_{T, \varphi} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{-i \cdot p(x - x_0) - p^2 \cdot D \cdot (t - t_0)\} \cdot j_0\left(\frac{p \cdot \vartheta_{0d}}{\omega}\right) dp, \quad (6)$$

где

$$j_0\left(\frac{p \cdot \vartheta_{0d}}{\omega}\right) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} \exp\left\{\pm i \cdot \left(\frac{p \cdot \vartheta_{0d}}{\omega}\right) \cdot \cos\beta\right\} \cdot d\beta. \quad (7)$$

Выполняя в (6) интегрирование и необходимые разложения, получим

$$\langle G(x, t; x_0, t_0) \rangle_{T, \varphi} = \frac{\exp\left(-\frac{S^2}{4 \cdot D \cdot \tau}\right)}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot \tau}} \cdot \left[1 + \frac{\vartheta_{0d}^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot D \cdot \tau} \cdot \left(\frac{S^2}{D \cdot \tau} - 2\right) + \dots\right] \quad (8)$$

здесь $S = x - x_0$; $\tau = t - t_0$, при условии $|t| > T$.

Первый член уравнения (8) – это функция Грина независимого проникновения, следующие характеризуют постороннее воздействие. Следовательно, если ограничиться двумя составляющими уравнения (8), то можно принудительную диффузию представить зависимостью независимой диффузии, если предположить

$$D^*(\tau) = D + \frac{\vartheta_{0d}^2}{2 \cdot \omega^2 \cdot \tau} \quad (9)$$

Уточним на основании уравнения (9) начальную задачу и исследуем диффузию из слоя конечной толщины $2r_0$, где r_0 – радиус облака Коттрелла вокруг дислокационной петли, в полуограниченное тело с отражающей границей

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D^*(t) \cdot \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (10)$$

$$N(x, t_0) = \begin{cases} N_0; 0 \leq x \leq 2r_0 \\ 0; 2r_0 < x < \infty \end{cases} \quad (11)$$

В данном случае считается, что ось X направлена вдоль диаметра болта.

Замена непостоянной в (10)

$$\tau^* = \int_{t_0}^t D^*(t') dt', \quad (12)$$

приводит (10) и (11) к виду

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau^*} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) N(x, \tau^*) = 0, \quad (13)$$

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_0, & 0 \leq x \leq 2r_0, \\ 0, & 2r_0 < x < \infty \end{cases} \quad (14)$$

Решение уравнения (13) с ограничением (14) имеет вид

$$N(x, \tau^*) = \frac{N_0}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{2r_0 - x}{2\sqrt{\tau^*}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{2r_0 + x}{2\sqrt{\tau^*}}\right) \right], \quad (15)$$

Значение τ^* определяется как

$$\tau^* = D(t - t_0) + \frac{(V_{0d}^2 \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right))}{2\omega^2}, \quad (16)$$

здесь $0 \leq x \leq 2r_0$; $\operatorname{erf}(y)$; – интеграл функции Гаусса.

Известно, что эффективный радиус облака Коттрелла в основном составляет несколько десятков мкм [5], поэтому рассмотрим диффузию из бесконечно тонкого слоя. При таком предположении выражение (15) упростится и примет вид

$$N(x, \tau^*) = \frac{N_0 \cdot 2r_0}{\sqrt{\pi \tau^*}} e^{-\frac{x^2}{4\tau^*}} \quad (17)$$

Считая, что протяженность сегмента дислокации L_c определяется выражением $N(\tau)$, в итоге получим

$$L_c = \frac{L_{c0}}{2r_0} \sqrt{\pi \tau^*} \quad (18)$$

Откуда следует, что длина перемещения примеси $L_d = \sqrt{\pi r^*}$ сопоставима с размером облака

Коттрелла, $L_c = L_{c0}$, т. е. за время повторяющегося нагружения τ длина сегмента дислокации фактически остается неизменной. Это верно при коэффициенте диффузии $D^* \leq 4r_0^2 / (\pi \tau^*)$. Если принять

$\tau \sim 10^3$ с и $2r_0 \sim 100$ мкм получаем $D^* \leq 3 \cdot 10^{-8}$ см²/с.

При большем значении $D^* > 4r_0^2 / (\pi\tau^*)$, с возрастанием длины дислокационного сегмента будет нарушаться стабильность модуля упругости.

При определенных условиях ($n = 0,3$; $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $T = 400$ К; $\omega_0 \approx 90$ с⁻¹; $\rho = 7800$ кг/м³; $\sigma_0 \approx 10^5$ Н/м²; $\tau = 4 \cdot 10^4$ с; $l = 1$ мкм; $L_{c0} = 1$ нм;) $D_{max}^* = 1,3 D$, т.е. в процессе вибрационного воздействия приращение коэффициента диффузии составляет 30%.

При $2r_0 \sim 0,1$ мкм и $\tau = 4 \cdot 10^4$ с получаем $D^* < 3 \cdot 10^{-15}$ см²/с. В случае, когда $D^* > 3 \cdot 10^{-15}$ см²/с увеличение протяженности дислокационного сегмента будет приводить к изменению модуля упругости:

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{12(1-\nu)}{\pi^2} \cdot N_d \cdot L_{c0}^2 \cdot \frac{l_d^2}{4r_0^2} \quad (19)$$

Оценки показывают, что максимальное наблюдаемое изменение модуля упругости будет составлять достигать: $\frac{E}{E_0} \approx 0,9$ или $\frac{\Delta E}{E_0} \cdot 100\% \approx 10\%$

При вибрации снижение модуля упругости приведет к возрастанию деформации и увеличению коэффициента податливости болта, что вызовет снижение усилия начальной затяжки РС. При этом податливость для болта во время вибрационного воздействия

$$\lambda_B = (\lambda_B)_0 \cdot \frac{E_0}{E} \quad (20)$$

где

$(\lambda_B)_0$ – податливость для болта до циклического нагружения.

Заключение

Таким образом, в условиях эксплуатации авто-

мобилей динамика неоднородной структуры металла определяет податливость и деформацию болтов. По-видимому, основное влияние на рост величины λ_6 оказывают подвижные включения, коэффициент диффузии которых $D^* > 3 \cdot 10^{-15}$ см²/с.

Научной новизной исследований является определение зависимости коэффициента податливости материала болта и модуля упругости от физических параметров: диффузионной длины подвижных включений и параметров дислокации.

Предложенная модель, показывающая ослабление затяжки РС в условиях вибрации, верна для соединений, изготовленных методами со снятием стружки, т.к. плотность дислокаций значительно зависит от технологического способа образования резьбы. При эксплуатации автомобилей происходит изменение упругих свойств материала РС. При перерезании волокон материала в процессе изготовления, характерном для технологических методов со снятием стружки, создаются условия для увеличения плотности дислокаций, является для РС, изготовленных другими методами, например, методом пластического деформирования материала заготовки, представленный механизм объяснения ослабления затяжки не подходит, т.к. изменение пластических свойств в данном случае не существенно.

Практическая значимость полученных результатов заключается в установлении критериев подбора материала болта наиболее ответственных резьбовых соединений по физическим характеристикам материалов.

В результате дальнейших исследований планируется предложить на уровне патента Российской Федерации новое конструктивное решение обеспечения стабильности затяжки резьбового соединения в условиях вибрационного воздействия.

Литература

1. Егожев А. М., Алажев А. К. Общепарадигматические принципы повышения надежности резьбовых соединений сельскохозяйственных машин и орудий // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 6. – С. 35–39.
2. Егожев А. М. Эксплуатационная надежность резьбовых соединений // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 1. – С. 38–39.
3. Кучкин Д. С. Повышение надежности резьбовых соединений // Проблемы геологии и освоения недр: материалы Междун. конф. (Томск, 1-6 апреля, 2013). – Томск, 2013. – С. 376–377.
4. Липка В. М., Рапацкий Ю. Л. Влияние конструктивных и технологических факторов на надежность резьбовых соединений в машиностроительных изделиях // Вестник СевНТУ. – 2010. – № 110. – С. 196–201.
5. Мэзон У. Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела // Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1969. – 436 с.
6. Прокофьев А. Н. Технологическое повышение надежности резьбовых соединений // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2 (10). – С. 48–51.
7. Пучков П. В. Повышение надежности резьбовых соединений подвески пожарных автомобилей / Пучков П. В., Маслов А. В., Топоров А. В., Моисеев Ю. Н. // Вестник Воронежского института ГПС СЧС России. – 2015. – №3 (16). – С. 19–24.

8. Родионов Ю. В., Суменков С. В. Исследование надежности резьбовых соединений в процессе эксплуатации автомобилей // Современные проблемы и направления развития автомобильно-дорожного комплекса в Российской Федерации: сб. докладов Всерос. науч.-практич. конф. (Пенза, 23–25 октября, 2019 г.). – Пенза: ПГУАС, 2019. – С. 155–161.
9. Родионов Ю. В., Суменков С. В. Обеспечение стабильности затяжки резьбовых соединений при ремонте автомобилей: монография. – Пенза: ПГУАС, 2019. – 160 с.
10. Тойгомбаев С. К., Казимирчук А. Ф., Шнырев А. П. Повышение надежности и долговечности резьбовых соединений // Актуальные проблемы современной науки. – 2008. – № 6(44). – С. 168–171.
11. Тойгомбаев С. К. Повышение надежности резьбовых соединений // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. – 2013. – № 3 (59). – С. 45–46.
12. Тушинский Л. И. Структурная теория конструктивной прочности материалов: монография. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 400 с.
13. Фаскиев Х. А. Повышение долговечности соединения картера с шаровой опорой переднего моста грузового автомобиля / А. С. Зенкин, Н. М. Куляшова, С. В. Юдин // Современные исследования в сфере естественных, технических и физико-математических наук: сб. статей. – Киров. – 2018. – С. 532–540.
14. Федорова Л. В., Иванова Ю. С., Воронина М. В. Повышение надежности резьбовых соединений электромеханической обработкой // Записки Горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 456–461.
15. Шуваев В. Г., Шуваев И. В. Методы обеспечения надежности затяжки резьбовых соединений по критерию достижения предела упругих деформаций [Электронный ресурс]. // НиКа, 2016. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-obespecheniya-nadezhnosti-zatyazhki-rezbovykh-soedineniy-po-kriteriyu-dostizheniya-predela-uprugih-deformatsiy> (дата обращения: 09.12.2019).
16. Junker G., Strelow D. Untersuchungen uber die Mechanik des selbsttatigen Losens und die zweckmassige Sicherung von Schrfubenverbindungen. – Drahtwelt, 1966, Nr. 2, S. 103–114; Nr. 3, S. 175–182; Nr. 5, S. 317–335.

References

1. Egozi, A. M., Aliev, A. K. (2016) [General Methodological principles of improving the reliability of threaded connections agricultural machinery and implements]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines]. Vol. 6, pp. 35–39. (In Russ.).
2. Egozi, A. M. (2011) [Reliability of carving connections]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machines]. Vol. 1, pp. 38–39. (In Russ.).
3. Kuchkin, D. S. (2013) [Improving the reliability of threaded connections]. *Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskiiy universitet* [National research Tomsk Polytechnic University]. pp. 376–377. (In Russ.).
4. Lipka, V. M., Rapacki, J. L. (2010) [Influence of constructive and process-ing factors on the reliability of threaded connections in mechanical engineer-data products]. *Vestnik SevNTU* [Vestnik SevNTU]. Vol. 110, pp. 196–201. (In Russ.).
5. Mason, W. (1969) *Primenenie fizicheskoy akustiki v kvantovoy fizike i fizike tverdogo tela* [The use of physical acoustics in quantum physics and solid state physics]. Moscow: World, 436 p.
6. Prokofiev, A. N. (2006) [Technological improvement of reliability of threaded connections]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk state technical University]. Vol. 2 (10), pp. 48–51. (In Russ.).
7. Puchkov, P. V., Maslov, A. V., Toporov, A. V., Moiseev, Yu. N. (2015) [Improving the reliability of threaded connections for the suspension of fire trucks]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS SCHS Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of Russia]. Vol. 3 (16), pp. 19–24. (In Russ.).
8. Rodionov, Yu. V., Sumenkov, S. V. (2019) [Study of reliability of threaded connections in the process of car operation]. *Sovremennyye problemy i napravleniya razvitiya avtomobil'no-dorozhnogo kompleksa v Rossiyskoy Federatsii: sb. dokladov Vseros. (Natsion.) nauch.-praktich. conf. (23–25 oktyabrya 2019 g.)* [Current problems and directions of development of the road complex in the Russian Federation. collection of reports of the all-Russian (National) scientific and practical. conf. (October 23–25, 2019).]. Penza:PGUAS, pp. 155–161. (In Russ.).
9. Rodionov, Yu.V. (2019) *Obespechenie stabilnosti zatyazhki rezbovykh soedinenii pri remonte avtomobiley* [Ensuring the stability of the tightening of threaded connections when repairing cars]. Penza: PGUAS, 160 p. (In Russ.).
10. Toigonbaev, S. K., Kazimierzuk, A. F., Shnyrev, A. P. (2008) [Improving the reliability and durability of threaded connections]. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki* [Actual problems of modern science]. Vol. 6 (44), pp. 168–171. (In Russ.).
11. Toigonbaev, S. K. (2013) [Improving the reliability of threaded connections]. *Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V. P. Goryachkina* [Bulletin OF the Moscow state Agroengineering University named after V. P. Goryachkina]. Vol. 3 (59), pp. 45–46. (In Russ.).

12. Tushinsky, L. I. (2004) *Strukturnaia teoriia konstruktivnoi prochnosti materialov* [Structural theory of structural strength of materials]. Novosibirsk: NSTU, 400 p. (In Russ.).

13. Faskiev, H. A. (2018) [Improving the durability of the crankcase connection with the ball bearing of the front axle of a truck]. *V sbornike: Sovremennyye issledovaniya v sfere yestestvennykh, tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk: Sbornik rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [In the collection: Modern research in the field of natural, technical, and physical and mathematical Sciences: a Collection of research results]. Kirov, pp. 532–540. (In Russ.).

14. Fedorova, L. V., Ivanova, Yu. S., Voronina, M. V. (2017) [Improving the reliability of threaded connections by Electromechanical processing]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. Vol. 226, pp. 456–461. (In Russ.).

15. Shuvaev, V. G., Shuvaev, I. V. (2016) [Methods for ensuring the reliability of tightening threaded connections by the criterion of reaching the limit of elastic deformations]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*. [Proceedings of the international Symposium “Reliability and quality”]. Vol. 2, pp. 134–135. (In Russ.).

16. Junker, G., Strelow, D. (1966) Untersuchungen über die Mechanik des selbsttätigen Losens und die zweckmassige Sicherung von Schraubverbindungen. *Drahtwelt*, Nr. 2, S. 103–114; Nr. 3, S. 175–182; Nr. 5, S. 317–335. (In Deuts.).

Информация об авторах:

Юрий Владимирович Родионов, доктор технических наук, профессор, декан автомобильно-дорожного института, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
e-mail: dekauto@pguas.ru

Сергей Владимирович Карпухин, магистрант, направление подготовки 23.04.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Сергей Вячеславович Суменков, магистрант, направление подготовки 23.04.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

Статья поступила в редакцию: 13.02.2020; принята в печать: 28.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Yuri Vladimirovich Rodionov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Automobile and Road Institute, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
e-mail: dekauto@pguas.ru

Sergey Vladimirovich Karpukhin, graduate student, training direction 23.04.03 Operation of transport and technological machines and complexes, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

Sergey Vyacheslavovich Sumenkov, graduate student, training direction 23.04.03 Operation of transport-technological machines and complexes, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

The paper was submitted: 13.02.2020.

Accepted for publication: 28.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.