

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 5. С. 225–235.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (5): 225–235.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.014.072-027.45

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-225-235

EDN: XCINDG

К ВОПРОСУ ОГРАНИЧЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НЕСУЩИХ БАЛОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Александр Аверьянович Алексеев

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Рассматривая ограниченную долговечность как свойство конструкции непрерывно сохранять работоспособность в течение ресурсных пределов времени в условиях случайной интенсивности нагруженности элементов балки, происходящих в процессе эксплуатации, автором предложено определение ресурса как основного критерия долговечности на уровне вероятностей возможного отказа и разрушения отдельных элементов моста или балки в целом.

Цель работы. Разработать методы, определяющие долговечность, на основе анализа повреждений, представляющих собой случайный, нестационарный процесс нагружения. Автором предлагается кумулятивная модель квазимонотонного процесса накопления повреждений и формы отказа элементов балки.

Результаты. Получены результаты расчета процесса накопления повреждений в балках. Процесс рассматривается как квазимонотонный. Выражены зависимости величин нагруженностей от напряжений, включая этапы изменения вероятностных характеристик не только материалов конструкции, но и уровней изменения режимов нагружения от роста повреждений. Ограничения долговечности балок пролетных строений оцениваются как номинальными напряжениями, так и суммарными повреждениями в более опасном сечении.

Ключевые слова: долговечность, надежность, ремонтпригодность, остаточный ресурс, срок службы, физический износ

Для цитирования: Алексеев А.А. К вопросу ограниченной долговечности несущих балок металлических пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 5. С. 225–235. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-225-235. EDN: XCINDG

ORIGINAL ARTICLE

TOWARD LIMITED DURABILITY OF LOAD-BEARING BEAMS OF METAL BRIDGE SPANS

Aleksandr A. Alekseev

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The paper considers the limited durability as a structural property which continuously maintains operability during certain time under random loading of beam elements and proposes the definition for durability as the main criterion of failure and destruction of beam elements or beam as a whole.

Methodology: Structural analysis; cumulative model of quasi-monotonic damage accumulation and failure of beam elements.

Purpose: To develop methods to determine the durability based on damages representing a random, non-stationary loading process.

Research findings: The damage accumulation is calculated for beams. The process is considered as quasi-monotonic. Stress-strain curves are obtained, including changes in probabilistic characteristics of not only structural materials, but also loading modes from the damage growth. The durability limitations of span girders are estimated both by nominal stresses and total damage in the more dangerous section.

Keywords: durability, reliability, repairability, residual life, service life, physical wear

For citation: Alekseev A.A. Toward Limited Durability of Load-Bearing Beams of Metal Bridge Spans. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (5): 225–235. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-225-235. EDN: XCIHDG

Ограниченная долговечность определяется как свойство конструкции пролетных строений мостов сохранять ресурсную работоспособность до предельного состояния, характеризуемого параметрами расчетной грузоподъемности, служебным и остаточным ресурсом, а также фактором ремонтпригодности, и может быть представлена функцией вида

$$\varnothing = D_p - D_t, \quad (1)$$

где D_p – повреждения элементов балки, способствующие разрушению; D_t – накопление повреждений за время эксплуатации.

Параметр D_t в формуле (1) обозначает преимущественное воздействие образовавшихся повреждений, возрастающих в основном не только за счет проявления морального и физического износа конструкции, но и динамического воздействия временной подвижной нагрузки [1, 2, 3]. Уравнение (1) характеризует момент неустойчивости из-за равенства освобождающейся части энергии деформации и энергии, связанной с работой поверхностного натяжения. Энергетический подход эквивалентен анализу интенсивности напряжений, согласно которому разрушение наступает в тот момент, когда в материале элементов балки пролетных строений достигают критической формы распределения напряжений по сечению.

Теория линейной механики разрушения позволяет для оценки ограниченной долговечности элементов конструкции найти и оценить командные де-

фекты, нагруженность и их напряженное состояние, представляемые зависимостью Ирвина в виде [4]

$$K^2 = E \cdot \Theta, \quad (2)$$

где K – критический показатель интенсивности напряжений, равен $\sigma_i \sqrt{k_\phi \cdot \gamma}$; Θ – энергетический критерий изменения напряженного состояния в связи с проявлением командного дефекта, равен $\sigma_T \cdot D$; k_ϕ – параметр формы поперечного сечения балки; γ – критерий нормальной надежности балки; D – параметр дефектности в случае предельного состояния $D = \frac{\pi \sigma_i}{E \sigma_T}$, $\sigma_i > \sigma_T$.

Ограничения долговечности рассматриваются в функции поэтапной вероятности безотказной работы J -кривой в координатах $\lambda - t$ и $P(t) = \frac{d\lambda}{dt}$ со следующими нормируемыми показателями: D_0 – период приработки; T_0 – 5–15 лет; $U = 3$ – индекс ресурсной надежности; $P(t) = 0,998$ – показатель надежности; D_c – эксплуатационный служебный период, равный $T_0^c = 15$ –25 лет; $U = 1,3$; $P(t) = 0,99$. Потеря ресурсной надежности $\lambda_c = 20$ –25 %; D_{oc} – ограниченная долговечность по остаточному ресурсу; D_{oc} с показателем $T_0^{oc} = 8$ –12 лет; $U = 1,1$; $P(t) = 0,89$; $\lambda_{oc} = 10$ –12 % (рис. 1).

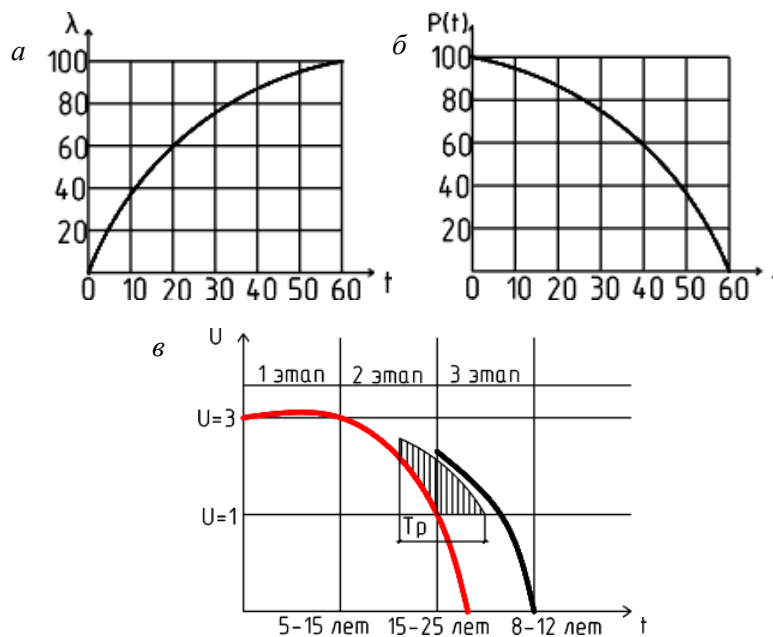


Рис. 1. Вероятность безотказной работы несущих балок пролетных строений в координатах: $a - \lambda - t$; $б - P(t) - t$; $в - U - t$

Fig. 1. The probability of failure-free operation of load-bearing beams in coordinates: $a - \lambda - t$; $б - P(t) - t$; $в - U - t$

Резерв увеличения срока службы T_p определяется по уравнению

$$U = \left[e^{a(t-T_0^i)} - 1 \right] 100 \%,$$

где T_0^i – время ресурсного периода [5]; t – эксплуатационный период; a – коэффициент качества изготовления, монтажа и эксплуатации пролетного строения [6, 7].

Несмотря на многообразие факторов, воздействующих на балки пролетных строений металлических мостов и влияющих на ограниченную долговечность и в целом на надежность, главными из них, определяющими долговечность элементов и балки в целом, являются действующие временные подвижные нагрузки, вызывающие разные уровни нагруженности, плотность вероятности их распределения в условиях стационарных и нестационарных случайных процессов.

Рассматривая эффективный период как показатель ограниченной ресурсной долговечности T_c случайной величины, запишем равенство вида

$$T_c = \frac{2\pi}{K} \left[\int_0^p \frac{P(N) ds}{N(s)} \right]^{-1} \text{ лет}, \quad (3)$$

где $N(s)$ – размах нагруженности элементов балки, равный $N\left(\frac{Z}{s}\right)^m$; m – показатель степени [5]; s – показатель нагруженности элементов; Z – надежность элементов; $P(N)$ – функция долговечности, которая выражается формулой

$$P(N) = e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Тогда условие ограниченной долговечности можно записать в виде неравенства

$$\frac{1}{N(s)} \leq \frac{K \cdot t}{2\pi}. \quad (5)$$

Величина $N(s)$, формула (3) не должна быть больше предельных напряжений в элементах балки, характеризующих несущую способность или безотказность балки. В рамках предельных состояний аналогично условиям Болотина – Потапкина величину $N(s)$ представим в виде неравенства [8]

$$N(s) \leq \frac{1}{\gamma} \varnothing, \quad (6)$$

где γ – коэффициент надежности; $\varnothing$ – обобщенная функция технико-эксплуатационных параметров [9].

Среднеарифметическое значение размахов напряжений с математическим ожиданием $m_x = \sum_{i=1}^k x_i \cdot n_i / n$, и среднеквадратичным отклонением для оценки дисперсии напряжений σ_x , и доверительной вероятностью 0,95–0,99 будет определяться из выражения

$$\sigma_x = \sqrt{\mathfrak{D}_x} = \sqrt{\frac{\bar{\eta}}{\eta} - (m_x)^2}, \quad (7)$$

где k – число уровней размахов нагруженности; $\mathfrak{D}_x$ – дисперсия распределения (среднее значение квадрата отклонения); η – число размахов нагруженности с напряжениями среднего уровня; $\bar{\eta}$ – число размахов нагруженности с напряжением максимального уровня.

При известных отношениях $N(s)$ и динамическом воздействии нагрузки за период $T_0 = 7$ лет и $\frac{\bar{\eta}}{\eta} = 1,4$ значение ограниченной долговечности в стадии вероятностного достижения предельного состояния определяем по формуле [10]:

$$P(N) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - m_i)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (8)$$

где x_i – частота отношений $\frac{\bar{\eta}}{\eta}$ размахов нагруженности.

На рис. 2 приведены графики, изменения размахов напряжений в балках металлических мостов, отражающие реальные технико-эксплуатационные состояния пролетных строений.

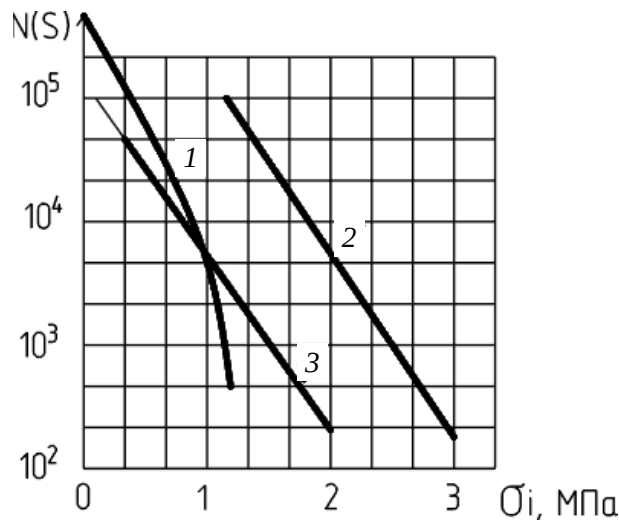


Рис. 2. Графики размахов $N(S)$ напряжений в несущих элементах металлических мостов: 1 – для пролетов > 60 м; 2 – для пролетов 42–60 м; 3 – для пролетов > 80 м

Fig. 2. $N(S)$ stress range in load-bearing elements of metal bridges: 1 – for spans > 60 m; 2 – for spans of 42–60 m; 3 – for spans > 80 m

Вероятность безотказной работы балки на протяжении ресурсного периода T_0^c представим в виде выражения [11, 12]:

$$P_{T_0^c} = P_{TC} \cdot P_{MH}, \quad (9)$$

где P_{TC} – вероятность ненаступления отказа по техническому состоянию пролетного строения в ресурсный период T_0^c ; P_{MH} – вероятность ненаступления отказа пролетного строения по моральному износу.

Обозначим P_H^{TC} и P_Φ^{TC} ; P_H^{MH} ; P_Φ^{MH} – нормативные и фактические показатели надежности соответственно технического состояния и морального износа. Тогда выражение (9) запишем в виде

$$P_{T_0^c} = P(P_\Phi^i > M_{MH}^i) \text{ при } t \leq T_0. \quad (10)$$

В условиях возрастающего воздействия временных подвижных нагрузок и случайности характера эксплуатации моста критерий долговечности не является абсолютным и исчерпывающим, т. к. прочность материала и конструкции балок уменьшается со временем по экспоненциальному закону надежности

$P(t) = e^{-\lambda t} \approx \frac{1}{e}$, где e – функция экспоненциального закона распределения; λ –

опасность отказов несущих элементов балки, равная $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i$; λ_i – опасность отказа элемента в балке; N_i – число элементов в балке; m – число типов элементов в балке. В качестве примера примем: $\lambda_i = \frac{1}{T_{cp}}$ и $t = T_c$; в результате по-

лучим: $P_c(t) = \frac{1}{e} \approx 0,37$.

При экспоненциальном законе распределения долговечности по ресурсным периодам со средним временем безотказной работы T_c вероятность безотказной работы балки уменьшается до 0,37.

Таким образом, в целях прогнозирования ограниченной долговечности в пределах периода $T_c = t_{cp}$ вводится коэффициент K_i , учитывающий увеличение опасности отказов элементов балки, аналогично коэффициенту нагруженности, равному $\frac{\bar{\eta}}{\eta}$, t_{cp} – среднее время безотказной работы.

Вероятность безотказной работы несущих элементов пролетного строения в течение ресурсного периода представлено выражением

$$P_c(t) = K_i e^{-\lambda_i t}. \quad (11)$$

При равенстве $\lambda(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(t-T_c)^2}{2\sigma^2}}$ и $\sigma = \sqrt{\frac{\bar{\eta}}{\eta} - (m_x)^2}$ график распределения отказов несущих балок пролетного строения во времени представлен на

рис. 3, $t_c = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}$; $\lambda_i(t) = \frac{\pi}{2\sigma_x^2}$.

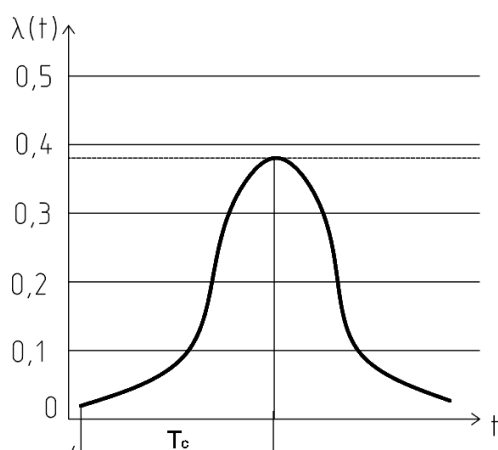


Рис. 3. График распределения отказов (по Релею)
Fig. 3. Failure distribution (by Relay)

Зависимости $T_c - t$; $\lambda(t) - t$; $\frac{1}{\lambda} - t$ представлены на рис. 4.

Вероятностно-статистический подход в прогнозировании ограниченной долговечности несущих элементов пролетных строений по критерию пригодности к нормальной эксплуатации основывается на рассмотрении многообразия форм процессов физического и морального износа конструкций, а нередко их совместного проявления при возникновении, накоплении и развитии повреждений [14, 15].

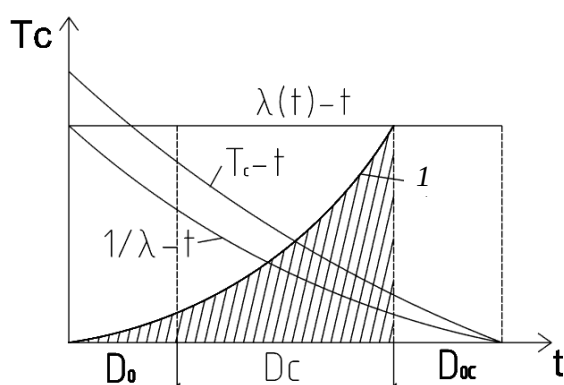


Рис. 4. Зависимость $T_c - t$, $\lambda(t) - t$, $\frac{1}{\lambda} - t$ для экспоненциального закона распределения случайных величин:

$\frac{1}{\lambda}$ – вероятность безотказной работы; 1 – средний срок безотказной службы металллических пролетных строений – 25–30 лет [13]

Fig. 4. Dependence $T_c - t$, $\lambda(t) - t$, $1/\lambda - t$ for the exponential distribution law of random variables: $1/\lambda$ – probability of trouble-free operation; 1 – average uptime of metal superstructures (25–30 years) [13]

Обозначим износ элементов балки за ресурсный период через λ_6 , и носительную долговечность T_y запишем в виде

$$\lambda_0 = \frac{-\ln T_y}{t}, \quad (12)$$

где $T_y = e^{-\lambda_0 \cdot t}$; t – ресурсный период эксплуатации.

Тогда величина износа балки за счет повреждений (λ_6) будет равна

$$\lambda_6 = \alpha (1 - e^{-\lambda_0 \cdot t}), \quad (13)$$

где α – безразмерный параметр дефектности пролетного строения [16, 17].

Параметр дефектности несущих балок по результатам длительных наблюдений может быть принят равным 0,15–0,35 на протяжении 25–30 лет эксплуатации. Ограниченная долговечность λ_6 после логарифмирования по t примет вид

$$\lambda_6 = -\ln e^{-\lambda_0 \cdot t}. \quad (14)$$

Время возможного выхода балки пролетного строения в течение ресурсного периода за предел исправных будет определяться из выражения $t = \frac{0,5}{\lambda_6}$.

Например: при $t \geq 10$ лет $\lambda_6 = 0,75$, $a = 0,3$.

Используя для оценки состояния балок пролетных строений мостов в зависимости от износа коэффициент надежности $\gamma_0 = \gamma_m \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n$; где $\gamma_m = 1,24$; $\gamma_f = 1,2$; $\gamma_n = 1,0$, получим коэффициент относительной ограниченной долговечности: удовлетворительное состояние – 0,9; неудовлетворительное – 0,67; аварийное – 0,5.

В связи с этим формула (13) примет вид

$$\lambda_6 = \alpha \cdot \gamma_0 \cdot t^n, \quad (15)$$

где n – показатель степени эксплуатации пролетных строений моста, принимается 0,47–0,54.

Процесс износа балок пролетных строений рассматривается как случайный в условиях, где статистические характеристики зависят от конструктивно-технологических и эксплуатационных условий. Тогда связь между износом и скоростью износа в ресурсный период можно представить выражением

$$\lambda_6 = \sum_{i=1}^n V_{\lambda} \cdot k^{(i-1)}, \quad (16)$$

где V_{λ} – скорость i -го процесса износа (повреждения); k – адаптационный коэффициент [18]; i, n – количество факторов, влияющих на износ.

Обозначим T_c^0 за начальное ограничение долговечности балки ресурсного периода, а скорость изменения V_λ запишем в виде

$$V_\lambda = \frac{dT_c^0}{dt}; \quad T_c^0 = T_c - \gamma_{cp} \cdot t^m, \quad (17)$$

где $\gamma_{cp} = \gamma_0 + \beta \cdot t$, β – коэффициент ускоренного процесса изменения остаточного ресурса долговечности [19, 20].

Выводы

Ограниченную долговечность несущих балок пролетных строений целесообразно рассматривать в качестве временной функции ресурсной надежности при воздействии известной или случайной интенсивности нагруженности в процессе эксплуатации.

Прогнозирование ограниченной долговечности с учетом воздействия ряда факторов технологического и износостойкого поведения элементов в конструкции сводится к определению запаса прочности, а значит, и запаса долговечности, соответствующих только одному заданному сроку безотказной работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Колмаков Б.Д. Концептуальные основы оценки остаточного ресурса пролетных строений металлических мостов по критерию усталостной долговечности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 206–211.
2. Быстров В.А. Режимы нагружения сталежелезобетонных пролетных строений автомобильных мостов с целью оценки надежности их элементов // Вопросы надежности мостовых конструкций : межвуз. темат. сб. тр. Ленинград, 1984. С. 16–23.
3. Васильченко Г.С., Кошелев П.Ф. Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкций. Москва : Наука, 1974. 147 с.
4. Irvin G.R. Analysis of stresses and strain near the end of traversing plate // J. Appl. Mch. 1957. V. 24. P. 90–92.
5. Новожилова Н.И., Быстров В.А., Шайкевич В.Л. Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов. Ленинград : ЛИСИ, 1989. 96 с.
6. Weibull W.A. Statistical theory of the strength of materials // Proc. Rog. Swedish Inst. Engng. Res. Stockholm. 1939. № 151. P. 93–105.
7. Нечаев Ю.П. Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений : сб. научных трудов. ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1989. С. 67–72.
8. Потапкин А.А. Методические указания к основам расчета мостовых конструкций на надежность. Москва : МАДИ, 1987. 20 с.
9. Новожилова Н.И. Строительные металлические конструкции. Ленинград : ЛИСИ, 1998. 99 с.
10. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу надежности несущих балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195
11. Safronov V.M. Determination of the Remaining Resources of Reinforced concrete Bridges in exploitation // International Conference on Civil Eng. Des. and Const. 12–14 Sept. Varna, Bulgaria, 2008. P. 103–107.
12. Костелянец Б.А., Картопольцев В.М. К проблеме надежности больших мостов Сибирского региона // Автомобильные дороги. 1994. № 10–11. С. 9–13.

13. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1982. 351 с.
14. Семкин Е.Ф., Картопольцев В.М. К вопросу многокритериальной оценки надежности мостов // Современные методы статистического и динамического расчета сооружений и конструкций. Вып. 3. Воронеж, 1994. С. 25–33.
15. Должиков В.Н. Условия работы и отказы искусственных сооружений и их элементов. Донецк : Донецкий политехнический институт. Горловский филиал, 1987. 6 с. Депонирована в ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. 28.12.87. ГАСНТИ, 73.31.13.
16. Добромислов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. Москва : Изд-во АСВ, 2004. 72 с.
17. Fisher J.W., Mertz D.R., Shong A. Steel bridge members under variable amplitude long life fatigue loading // Mat. Coop. Highway Res. Program Rept. 1983. № 267. 26 p.
18. Chesson E., Asce F. Structural steel failures // Proc. W.H. Munsn Symp. Behav. Metal Struct. Res. Pract. Philadelphia, Pr. 17 May, 1983. P. 156–173.
19. Ashby M.F., Gandni C., Taplin M.R. Fracture Mechanism Maps and thlir Construction for F.C.C. Metalsanot Aalloys // Acta Net. 1979. V. 27. P. 699–729.
20. Пашкевич А.А., Шахназаров С.С. Возможный подход к оценке технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций // Металлические конструкции и испытание сооружений. Ленинград : ЛИСИ, 1980. С. 67–76.

REFERENCES

1. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Conceptual framework of fatigue life criterion assessment of steel bridge residual life. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 206–211. (In Russian)
2. Bystrov V.A. Loading Modes of Steel-Reinforced Concrete Superstructures of Road Bridges to Assess Reliability of their Elements. In: *Voprosy nadezhnosti mostovykh konstruktssii*, 1984. Pp. 16–23. (In Russian)
3. Vasilchenko G.S., Koshelev P.F. Practical Application of Fracture Mechanics for Structural Strength Evaluation. Moscow: Nauka, 1974. 147 p. (In Russian)
4. Irvin G.R. Analysis of Stresses and Strain Near the End of Traversing Plate. *Journal of Applied Mechanics*. 1957; (24): 90–92.
5. Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shoikevich V.L. Structural Reliability of Steel and Steel-Reinforced Concrete Bridges. Leningrad, 1989. 96 p. (In Russian)
6. Weibull W.A. A Statistical Theory of the Strength of Materials. Generalstabens Litografiska Anstalts Foerlag, Stockholm, 1939. Pp. 93–105.
7. Nechaev Yu.P. Durability of Artificial Structures. In: *Operational Reliability of Artificial Structures*. Moscow: Transport, 1989. Pp. 67–72. (In Russian)
8. Potapkin A.A. Methodological Guidelines for Structural Analysis of Bridges. Moscow, 1987. 17 p. (In Russian)
9. Novozhilova N.I. Building Metal Structures. Leningrad, 1998. 99 p. (In Russian)
10. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Towards Reliability of Load-Bearing Beams of Bridges. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195 (In Russian)
11. Safronov V.M. Determination of Remaining Resources of Reinforced Concrete Bridges in Exploitation. In: *Proc. Int. Conf. on Civil Engineering Desing and Construction*. Varna, Bulgaria, 2008. Pp. 103–107.
12. Kostelianets B.A., Kartopoltsev V.M. Reliability of Large Bridges in the Siberian Region. *Avtomobil'nye dorogi*. 1994; (10–11): 9–13. (In Russian)
13. Bolotin V.V. Probability Theory and Reliability Theory Methods in Structural Analysis. Moscow: Stroyizdat, 1983, 351 p. (In Russian)
14. Semkin E.F., Kartopoltsev V.M. Multi-Criteria Assessment of Bridge Reliability. In: *Modern Methods of Statistical and Dynamic Structural Analysis*. Iss. 3. 1994. Pp. 25–33. (In Russian)
15. Dolzhikov V.N. Working Conditions and Failures of Artificial Structures and Elements. Donetsk: Donetsk Polytechnic Institute, 1987. 6 p. (In Russian)

16. Dobromyslov A.N. Reliability Assessment of Buildings by External Signs. Moscow: ASV, 2004. 72 p. (In Russian)
17. Fisher J.W, Mertz D.R., Shong A. Steel Bridge Members under Variable Amplitude Long Life Fatigue Loading. *National Cooperative Highway Research Program*. 1983; (267): 26 p.
18. Chesson E., Asce F. Structural Steel Failures. In: *Proc. W.H. Munsn Symp. Behav. Metal Struct. Res. Pract.* Philadelphia, Pr. 17 May, 1983. Pp. 156–173.
19. Ashby M.F., Gandni C., Taplin M.R. Fracture Mechanism Maps and their Construction for F.C.C. Metals and Alloys. *Acta Metallurgica*. 1979; (27): 699–729.
20. Pashkevich A.A., Shakhnazarov S.S. Possible Approach to Assess Technical Condition and Residual Life of Buildings. In: *Metal Structures and Testing of Structures*. Leningrad, 1980. Pp. 67–76. (In Russian)

Сведения об авторе

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, alekseev10@yandex.ru

Author Details

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia. alekseev10@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 13.06.2024
Одобрена после рецензирования 25.06.2024
Принята к публикации 17.09.2024

Submitted for publication 13.06.2024
Approved after review 25.06.2024
Accepted for publication 17.09.2024