

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 5. С. 183–197.

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): 183–197.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.095:624.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-183-197

EDN: SVYQEH

О РЕСУРСНОЙ НАДЕЖНОСТИ БИСТАЛЬНЫХ БАЛОК С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Андрей Владимирович Картопольцев
ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность исследования заключается в совершенствовании методики оценки ресурсной надежности металлических пролетных строений с бистальными балками изменением управляющей функции напряженно-деформированного состояния на основе резервирования и самоорганизации системы. Рассматривается эффект вариации нагрузок на несущие бистальные балки пролетных строений, действующих в течение длительного времени эксплуатации.

Цель: разработать методику оценки ресурсной надежности бистальных балок как самонастраиваемых систем при воздействии нагрузок.

Практическая значимость: оценена ресурсная надежность бистальных балок с учетом «запаздывания» течучести.

Показано, что резервирование в бистальных балках повышает показатель ресурсной надежности и технического использования.

Ключевые слова: надежность, отказ, резервирование, бистальные балки, деформации, предельное состояние

Для цитирования: Картопольцев А.В. О ресурсной надежности бистальных балок с резервированием // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 5. С. 183–197. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-183-197. EDN: SVYQEH

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS DURABILITY OF REDUNDANT COMPOSITE BEAMS

Andrei V. Kartopoltzev
ООО “DIAMOS” Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of the study lies in the methodology improvement of assessing the durability of metal span structures with composite beams via the control for the stress-strain state on the basis of the system redundancy and self-organization. The variation in loads on composite beams of bridge spans during a long operation, is considered herein.

Purpose: The aim of this work is to develop a methodology for estimation of durability of composite beams as self-organized systems under load.

Research findings: It is shown that redundant composite beams increase their durability and technical utilization.

Practical implications: Durability of composite beams with regard to the yield strength delay.

Keywords: durability, failure, redundancy, composite beams, deformation, limit states

For citation: Kartopol'tsev A.V. Towards Durability of Redundant Composite Beams. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (5): 183–197. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-183-197. EDN: SVYQEH

Известно, что надежность несущих элементов пролетных строений мостов сказывается на стоимости, временных и эксплуатационных затратах, а также проявляется в виде неудобств и дискомфорта, а в определенных ситуациях грозит безопасности людей. Классическим примером являются обрушения пешеходных и автодорожных мостов [1]. Теория надежности устанавливает закономерности отказов, методы их прогнозирования и ищет способы повышения ресурсной надежности при проектировании, изготовлении металлических конструкций, а также приемы поддержания уровня требуемой надежности при эксплуатации.

Резервирование – процесс поддержания уровня нормативной ресурсной надежности бистальных балок пролетных строений в процессе длительной эксплуатации до выхода их за предел «исправных» включением в работу элементов из высокопрочной стали взамен вышедших в предельное состояние элементов балки, выполненных из стали меньшей прочности.

Механизм резервирования отображает восприятие элементом балки с более высокими механическими характеристиками материала той части перенапряжения, которое испытывает соседний элемент сечения балки, выполненный из стали меньшей прочности.

Бистальные балки представляют собой конструктивную форму со встроенной системой последовательно постоянного класса резервирования ресурсной надежности [2, 3]. Рассматривается эффект вариации нагрузок на несущие бистальные балки пролетных строений, действующих в течение длительного времени эксплуатации. В процессе статистического моделирования возможно изменение напряженно-деформированного состояния и ресурсной поэлементной надежности проявлением фактора резервирования характеристик прочности, деформативности, уровня надежности и вероятности отказов.

Резервирование в системе поэлементной ресурсной надежности балок, основанной на модели эффекта запаздывания текучести, расширяет границы предельных состояний физических и реальных моделей эксплуатационного состояния пролетных строений мостов и направлено на повышение нормативного срока службы [4].

Модель запаздывания пластического деформирования нижней части вертикальной стенки по линии жесткого сопряжения с нижним поясом бистального сечения балки объясняется режимом начального появления верхнего значения управляемых пластических деформаций, равных 0,0025, при поддержании

вающем эффекте оставшейся упругой части сечения вертикальной стенки и ее переходом со сдвигом во времени, равным t_0 , к нижнему предельному значению текучести с $\varepsilon_{\text{пл}} > 0,0025$ неуправляемого процесса деформирования и отвечающего условию

$$\int_0^{t_0} \sigma^\alpha(t) dt = C, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – функция нагружения вертикальной стенки; t_0 – время запаздывания текучести; α – константа материала вертикальной стенки; C – константа следа запаздывания (критерий Кэмпбелла).

Тогда началом резервирования в балке следует считать момент включения в работу нижнего пояса на восприятие дополнительных воздействий за счет отказа пластифицированной части вертикальной стенки в течение времени t_0 , которое равно критическому времени. Применение бистальных балок, обладающих эффектом естественного резервирования для повышения ресурсной надежности, в последнее время приобретает все большее значение. Резервирование в бистальных балках по участкам в зависимости от напряженного состояния (принцип постоянного раздельного резервирования) принципиально выявлено не только для балки, но и для всего пролетного строения. Определение числа участков в бистальных балках, способных к автоматическому резервированию, основано на ряде условий надежности и функциональных особенностях основных и второстепенных элементов. В бистальных балках основной функцией нижнего пояса является восприятие изгибающего момента, который представляет основное усилие предельного состояния, тогда как вертикальная стенка отвечает за конструктивно-технологическое состояние и воспринимает в основном поперечную силу. Для моностальных балок отсутствует модель и причины для реализации резервирования из-за равенства прочностных характеристик материала элементов балок, т. е. $R_{\text{в.п}} = R_{\text{ст}} = R_{\text{н.п}}$. В бистальных балках модель резервирования обоснована положениями:

1. Применение высокопрочной стали в наиболее напряженном элементе сечения балки (нижнем поясе), что само по себе является фактором повышения конструктивной надежности.

2. Резервирование обеспечивается подключением резерва по напряжению, равного $R_{\text{п}} - \sigma_{\text{т}}^{\text{ст}} = \Delta\sigma_R$, где $R_{\text{п}}$ – расчетное сопротивление стали нижнего пояса; $\sigma_{\text{т}}^{\text{ст}}$ – предел текучести материала $\sigma_{\text{т}}^{\text{ст}} \leq R_{\text{п}}$.

3. Отсутствие необходимости в дополнительных конструктивных решениях для получения постоянного эффекта резервирования, т. к. в бистальных балках резервирование осуществляется в жестком соединении элементов нижнего пояса и стенки из двух марок стали различной прочности.

4. Выполняется принцип постоянного последовательного резервирования, при котором «отказ» балки будет считаться при отказе хотя бы одного элемента.

5. Не применим принцип параллельного резервирования, который основан на единовременном отказе всех элементов сечения балки.

6. Резервирование бистальных балок как многоэлементной системы дискретной структуры, обладающей конструктивными и физическими свойствами, должно способствовать обеспечению собственной поэлементной структурной надежности и отвечать требованиям [5]:

- а) уменьшение интенсивности «отказов»;
- б) уменьшение среднего времени восстановления требуемого уровня работоспособности;
- в) применение надежных высокопрочных сталей и упрощение конструктивной формы;
- г) закон обеспечения ресурсной надежности бистальных балок поэлементным резервированием для повышения надежности запишется в виде

$$P = f(\lambda_c, \bar{t}_b, t, m, K_p), \quad (2)$$

где P – надежность балки; λ_c – интенсивность отказов элементов балки, входящих в систему резервирования; $\bar{t}_b$ – среднее время восстановления нормативного состояния после включения резервирования; t – срок службы бистальных балок; K_p – критерий резервирования.

Предельным состоянием бистальной балки будет считаться такое, когда все элементы $m+1$ одновременно работают на внешнюю нагрузку. При отказе одного элемента нагрузка перераспределяется на остальные элементы, которые составляют на момент отказа резервируемую систему. Ресурсная надежность балки в течение времени $\bar{t}_b$ может несколько снизиться за счет перераспределения нагрузки и напряженно-деформированного состояния на оставшиеся работоспособные элементы балки. Вступление резервной части элементов балки взамен ослабленных или поврежденных в процессе работы не допускает отказа всей системы.

Вероятность нормальной работы элементов бистальных балок на протяжении всего периода эксплуатации определяется условием [6, 7]

$$Z = \left[(1 - P_1(t))(1 - P_2(t))(1 - P_3(t)) \dots (1 - P_i(t)) \right]; \left. \begin{aligned} Z &= Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \dots Z_i, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $P_i(t)$ – вероятность вывода из строя элементов балки; Z_i – вероятность нормальной работы элементов балки.

Вероятность возможного выхода из работы элементов будет определяться формулой

$$P_i(t) = (1 - Z_1)(1 - Z_2)(1 - Z_3) \dots (1 - Z_i). \quad (4)$$

Бистальные балки являются системой с постоянно включенными в работу элементами резервирования, поддерживающими безаварийную эксплуатацию на протяжении нормативного срока ресурсной надежности до случая возможного выхода за предел «исправных» хотя бы одного элемента.

Рассматривая схему одноэлементного резервирования при упругопластической работе вертикальной стенки и упругой работе нижнего пояса бистальной балки 2-го уровня, вероятность нормальной работы вертикальной стенки с огра-

ниченными пластическими деформациями, равными $\varepsilon_{пл} \cong 0,0025$, обозначим через Z_b , а нижнего пояса, выполняющего функции резервирующего элемента, через Z_n . Тогда вероятность нормальной работы элементов балки будет определяться выражением

$$Z_{b,n} = 1 - (1 - Z_b)(1 - Z_n). \quad (5)$$

Обозначим вероятность повреждения бистальной балки за счет выхода за предел управляемости пластическими остаточными деформациями материала вертикальной стенки на границе сопряжения с нижним поясом через P_6 , равную $P_{zc} \cdot P_{zn}$ при $Z_c \rightarrow 0$, указывая тем самым, что вертикальная стенка и балка в целом нуждаются в резервировании для обеспечения нормативной прочности и надёжности и $Z_{b,n} \rightarrow 1$. Для бистальных балок 1-го уровня, сочлененных из трех блоков, при $Z_c \neq Z_n$ вероятность нормальной работы системы будет определяться равенством

$$Z_n = \left[1 - (1 - Z_c)^m \right]^n, \quad (6)$$

где $m = 1 + m_1$; $m_1 = 2$ – число возможных резервных элементов; $m = 3, 5, 7$.

Тогда вероятность повреждения таких систем выражается формулой

$$P_n = 1 - \left[1 - P_{cn}^m \right]^n, \quad (7)$$

где $P_{cn} = 1 - Z_c$.

Зависимость вероятности выхода бистальных балок за предел «исправных» с вероятностью повреждения резервированного элемента при $m_1 = 1$, $n = 3$ и $m = 2$ будем определять выражением

$$P_n^p \approx n \cdot P_{cn}^m. \quad (8)$$

Вероятность выхода бистальной балки за предел «исправных» без резервирования определим выражением

$$P_n \approx n \cdot P_n. \quad (9)$$

Интенсивность отказов для бистальных балок с резервированием и без резервирования характеризуется выражением $\lambda(t) = P_n / P_n^6$, при этом уровень надежности оценивается как

$$P = \lg \frac{1}{\Theta}, \quad B, \quad (10)$$

где Θ – вероятность наступления за срок службы (ресурсный период) хотя бы одного отказа; $P = 0,99$ – нормативный показатель надежности бистальных балок, соответствующий уровню надежности $P = \Phi(\gamma)$ (В) по гауссовскому уровню распределения случайных величин [8, 9]; $\Phi(v)$ – интеграл функции Лапласа; v – показатель уровня распределения надежности поэлементно в бистальной балке.

Вероятность безотказной работы бистальной балки с постоянным последовательным резервированием P_{δ}^p равна:

$$P_{\delta}^p = \left[1 - \left(1 - \sum_i P_i^s \right)^2 \right]^r, \quad (11)$$

где $r = 3$ – число групп элементов в сечении балки (верхний пояс + вертикальная стенка + нижний пояс); s – число элементов в каждой группе в зависимости от типа бистальной балки (1-й, 2-й уровень); P_i – нормативная надежность и R_s^{ct} – расчетное сопротивление стали вертикальной стенки.

$$\text{Тогда} \quad P_i = P_{\text{нп}} = N_{\text{нп}} = \frac{R_{\text{п}}}{\gamma_n}, \quad (12)$$

где $\gamma_n = 1,0$; $N_{\text{нп}}$ – нагруженность нижнего пояса; $R_{\text{п}}$ – расчётное сопротивление стали нижнего пояса.

Формула (12) справедлива при условии, что предельное состояние балки по предложению Болотина, Потапкина соответствует выражению [9, 10, 11]

$$R_{\text{п}} \geq (1 + \beta \cdot A_{N_{\text{нп}}}) N_{\text{нп}}, \quad (13)$$

$$\text{где} \quad \beta = \left\{ 2 \left(1 + \frac{R_{\text{п}}}{N_{\text{нп}}} \right) \ln \left[\frac{\alpha}{V} \left(1 + \frac{R_{\text{п}}}{N_{\text{нп}}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}};$$

$A_{N_{\text{нп}}}$ – изменчивость нагруженности нижнего пояса; α – безразмерный коэффициент, соответствующий времени эксплуатационного ресурса $\alpha \approx 0,1-0,12$; V – вероятность возникновения предельного состояния.

Вероятность безотказной работы элемента балки $P_i = P_{\text{вп}}$ для верхнего пояса при нормативной надежности оценивается его несущей способностью по формуле

$$P_{\text{вп}} = N_{\text{вп}} = N_{\text{ср}} - 3,34(1 - n^{-0,26})\sigma_r, \quad (14)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее значение нагруженности верхнего пояса – равно $R_s - \gamma_n \sigma_r$; при $n = 1$ $\sigma_r \leq R_s^{\text{вп}}$ – расчетное сопротивление материала верхнего пояса; γ_n – уровень надежности (коэффициент надежности) пояса, равного 1,3.

Для бистальных балок 2-го уровня необходимым и достаточным условием резервирования является условие

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_s^{ct}}{\varepsilon} + \varepsilon_{\text{пл}} &\geq \frac{1,1R_{\text{п}}}{E}; \\ \frac{R_{\text{п}}}{R_s^{ct}} &= 1,4-2,0; \frac{R_{\text{п}}}{\sigma_T^{ct}} = 1,2-1,4, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где $\varepsilon_{\text{пл}} = 0,0025$, $R_{\text{п}} - \sigma_T^{ct} \geq \frac{1,1R_{\text{п}}}{E}$.

Нормативная надежность или безотказность работы части вертикальной стенки бистальной балки, расположенной выше нейтральной оси поперечного сечения, при $P_i = P_{ст}$ будет равна:

$$P_i = P_{ст} = N_{ст} = N_{ср} - 3,34(1 - n^{-0,26})\sigma_r, \quad (16)$$

где $n = 1$; $\sigma_r = R_S^{ст} - \Delta R_S$; $\Delta R_S = R_{нп} - \sigma_T^{ст}$; $\gamma_{ст} = 1,0$; $N_{ср} = \frac{Q_{пс} S}{J \cdot t_{ст}} = \frac{R_S^{ст} \cdot m \cdot \kappa_2 \cdot J}{S}$;

$m = 1$; $\kappa_2 = 1,21 - 1,4$ – коэффициент, учитывающий возможность развития пластических деформаций в крайних фибрах вертикальной стенки на контакте с нижним поясом в момент времени эксплуатационного ресурса [12, 13].

Деформационный критерий поведения вертикальной стенки бистальной балки в стадии резервирования, отражающий степень ограниченной повреждаемости части элемента в зоне сопряжения с нижним поясом по критерию текучести, запишем в виде [14]

$$\left(R_T^{ст}\right)^2 + \frac{8}{9} \frac{1 + \mu}{k_\phi} \left(R_T^{ст}\right)^2 = \frac{2E \cdot K}{t_{ст}}, \quad (17)$$

где $R_T^{ст}$ – расчетное сопротивление стали стенки по пределу текучести; $\mu = 0,45$; k_ϕ – коэффициент формы сечения вертикальной стенки – 0,667–0,75; K – коэффициент неизменности объема материала стенки [10, 14]; $t_{ст}$ – толщина вертикальной стенки.

Условие нормативной прочности и надежности бистальных балок (P_6^P), резервированных одним элементом (нижним поясом) при заданной надежности $P = 0,99$ и $r = 1$, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \sum \gamma_{fn} \cdot S_n \cdot \eta_n + \sum \gamma_{fg} \cdot S_g \cdot \eta_g \cdot \mu \leq \frac{R_{нп} \cdot m_1 \cdot m}{\gamma_m \cdot \gamma_n}; \\ P_6^P = \left[1 - \left(1 - \sum P_i^S \right)^2 \right]^r, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $P_i = P_{вп} = P_{ст} = P_{нп}$ – необходимая надежность элементов бистальной балки,

равная $\left[1 - \left(1 - P^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^r$; S_n , S_g – нормативная постоянная и временная нагрузка;

A – площадь сечения балки, брутто; γ_{fn} – коэффициент надежности по постоянной нагрузке – 1,0; γ_{fg} – коэффициент надежности по временной нагрузке – 1,0; η – коэффициент сочетания нагрузок – постоянных, временных – 1,0; μ – динамическая добавка; $R_{нп}$ – расчетное сопротивление стали нижнего пояса; γ_m – коэффициент надежности по материалу – 1,05; γ_n – коэффициент надежности по назначению – 1,3; n – коэффициент условий работы материала бистальной балки – 0,9; m_1 – коэффициент условия работы стали нижнего пояса – 1,0.

Оценим надежность бистальных балок без резервирования по формуле

$$P_{ij} = 1 - \left[\sum P_i \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (19)$$

При $n = 3$ в бистальной балке с одним элементом резервирования надежность $P_1 = 1 - (1 - P_i)^2 J^n$ в $\sqrt{n}$ больше, чем без резервирования.

Запишем в общем виде вероятность безотказной работы бистальной балки с резервированием в виде [15, 16]

$$P_6^P(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_0 \cdot t_c} \right)^{n+1}, \quad (20)$$

где $\lambda_0 = \sum_i^n \lambda_i$ – возможная интенсивность отказа любого элемента системы $n+1$; n – количество элементов резервирования для балок 1-го уровня $n=2$; для балок 2-го уровня $n=1$ [3].

Тогда вероятность отказа бистальной балки с резервированием будет

$$Q_{6(t)}^P = \left(1 - e^{-\lambda_0 \cdot t_c} \right)^{n+1}, \quad (21)$$

где $t_c = \frac{1}{\lambda_0} \left(1 + \frac{1}{n+1} \right)$ – среднее время вероятности расчетного отказа элемента в системе резервирования.

Для бистальных балок 1-го уровня в зависимости от периода ресурсной надежности среднее время безотказной работы резервированной балки изменяется в зависимости от кратности элементов, участвующих в постоянном последовательном процессе резервирования, и в среднем равно 10 годам при выполнении условия

$$\lambda_0 \cdot t = \ln(n+1) = \left(\frac{n}{n+1} \right)^n. \quad (22)$$

Одновременно резервирование значительно улучшает количественные характеристики надежности бистальных балок снижением частоты отказов (плотность вероятности интервала безотказной работы элементов балки) – $a(t)$; интенсивности опасных отказов, способных вывести балку ресурсного периода эксплуатации за предел исправных. Для всех этапов ресурсной надежности с учетом резервирования целесообразно ввести количественные характеристики надежности в виде средней частоты отказов $\lambda_{cp}(t)$, равной отношению числа отказавших элементов в балке к числу замещаемых в работе в стадии резервирования. Например, при резервировании одним элементом (нижним поясом) вертикальной стенки вероятность безотказной работы $P_c(t)_{n=1}$ равна:

$$P_c(t)_{n=1} = (1 - \lambda_0 t)^{n+1}. \quad (23)$$

Тогда вероятность возможного отказа балки снижается до величины $Q_c(t)_{n=1}$, равной

$$Q_c(t)_{n=1} = (\lambda_0 \cdot t)^{n+1}. \quad (24)$$

Пример 1. $t = 10$ лет: $n = 1$; $\lambda_0 \cdot t = 0,25$; $\lambda_0 = 0,02$; $P_c(t) = 0,64$; $Q_c(t) = 0,04$.

Выполняется условие $\lambda_0 \cdot t \leq 0,25$; $e^{-\lambda_0 \cdot t} = 1 - \lambda_0 \cdot t$.

Таким образом, вероятность безотказной работы резервированной бистальной балки больше вероятности безотказной работы нерезервированной, и чем выше кратность резервирования (n), тем выше безотказность (рис. 1).

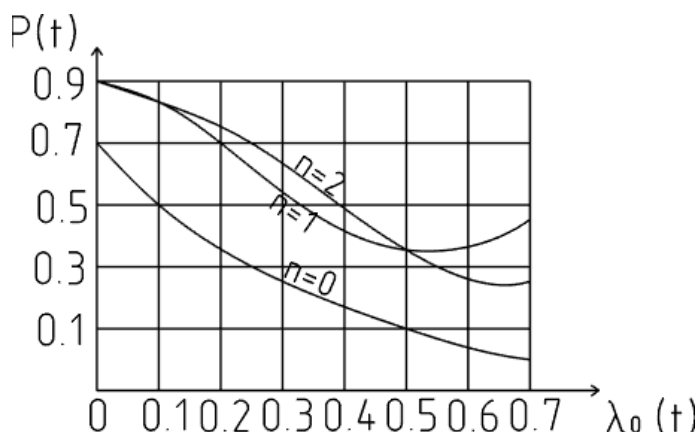


Рис. 1. Вероятность безотказной работы резервированной балки

Fig. 1. Probability of failure-free operation of redundant beam

Для бистальных балок с резервированием критерием ресурсной надежности будет коэффициент надежности K_n , удовлетворяющий условиям [17], а также $f(t)$ – плотность распределения времени безотказной работы балок пролетных строений $\equiv$ нормативному значению, равному 60 лет; $\lambda(t)$ – функция распределения отказов – вероятность того, что в течение времени t в результате определенных обстоятельств произойдет отказ, после которого не будет очередного отказа за счет срабатывания резервирования. Обозначим $V(t)$ – вероятность того, что бистальная балка пролетного строения безотказно проработает определенный интервал времени $t_{cp} = T - t$. Тогда

$$V(t) = \lambda(t) \int_t^T \lambda(t) dt, \quad (25)$$

где $T = \int_0^t \lambda(t) dt$; $\lambda(t) = \frac{t}{T}$.

Пример 2. Решается задача: на сколько участков резервирования (m) следует разбить бистальную балку 1-го и 2-го уровня с вероятностью отказа P_i , чтобы получить надежную ресурсную систему, имеющую как можно меньшую вероятность выхода за предел «исправных» за счет резервирования, а также ве-

роятность возможного отказа элементов резервирования Z с их кратностью, равной 2. Для таких бистальных балок 2-го уровня с нижним поясом из одного листа задача резервирования рассматривается при $m = 1$. В случае, когда нижний пояс выполнен ступенчатым по длине блока или пролета $\frac{L}{3}$, а также составлен из 2–3 листов высокопрочной стали, (m) принимаем > 3 (рис. 2).

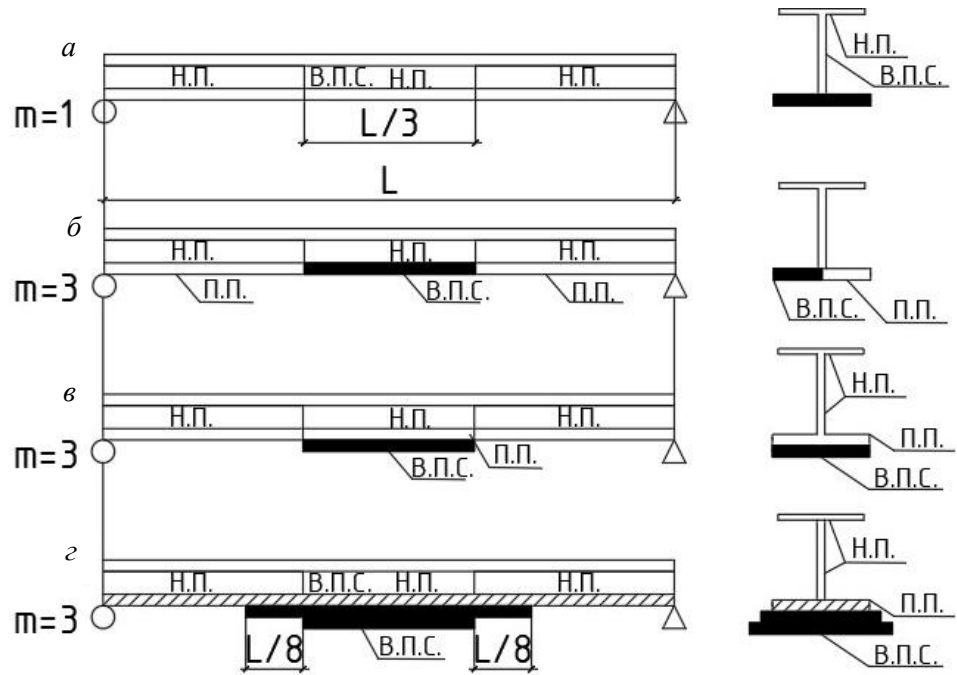


Рис. 2. Бистальные балки 2-го уровня с комбинированным нижним поясом:

НП – сталь нормальной прочности (М16С, 16Д); ПП – сталь повышенной прочности (14Г2, 15ХСНД); ВПС – высокопрочная сталь (10ХСНД, 12Г2СМФ, 14Х2ГМР)

Fig. 2. Composite beams of the 2nd level with combined lower belt:

NP – normal strength (M16S, 16D); PP – higher strength (14G2, 15HSD); VPS – high strength (10HSD, 12G2SMF, 14X2GMR)

Вероятность работы вертикальной стенки в сопряжении с нижним поясом Z_C будет равна: $Z_C = 0$ – есть необходимость в резервировании; $Z_C = 1$ – нет необходимости в резервировании.

Вероятность отказа вертикальной стенки без резервирования будет равна:

$$Q_C = 1 - (1 - P_C^m); P_C = 1 - Z_C. \quad (26)$$

Вероятность отказа всей балки без резервирования будет равна:

$$Q_6 = 1 - [1 - (1 - Z_C)^m]. \quad (27)$$

Количество необходимых участков (m) резервирования бистальной балки 2-го уровня (рис. 2, а) будет определяться по формуле [18]

$$m = \frac{Q_6}{Q_C}(k-1), \quad (28)$$

где k – коэффициент пропорциональности, указывающий число добавочных резервируемых элементов в нижнем поясе (рис. 2), $k=1$ (рис. 2, а); $k=2$ (рис. 2, б, в, г).

Перепишем формулу (28) в виде [19]

$$m = \frac{Q_6}{Z_{\text{ни}}}(k-1), \quad (29)$$

где $Z_{\text{ни}}$ – вероятность нормальной работы нижнего пояса при $Z_{\text{ни}} = 1$.

Для бистальной балки 2-го уровня с компоновкой сечения (см. рис. 2, б, в, г) в виде последовательно соединенных резервированных блоков вероятность отказа балки при отказе одного из блоков будет

$$Q_P = [1 - (1 - Q_i)]^m, \quad (30)$$

где m – число блоков – 3; Q_i – вероятность отказа i -го блока.

При $m = m_1$ – количество блоков в балке с резервированием, справедливо равенство

$$m = \frac{Q_6^P}{Q_i}(k-1), \quad (31)$$

где $k=2$ – коэффициент пропорциональной кратности резервирования.

Тогда

$$Q_i = (k-1) \frac{Q_6^P}{m} \cong \frac{Q_6^P}{m_1}. \quad (32)$$

Запишем отказ вертикальной стенки в блоке бистальной балки в виде

$$Q_C = 1 - (1 - P_C)^m = 1 - [(1 - Z_C)^m]. \quad (33)$$

При $m = 1$; $Z_C = 0$ – отказ вертикальной стенки в блоке (Q_C) пропорционален отказу целого блока Q_i .

Если для бистальных балок 2-го уровня (см. рис. 2, а, б) вероятность отказа определяем по формуле (27), то для балок (см. рис. 2, в, г) величина Q_6^P будет определяться из равенства

$$Q_6^P = m \left[Z_{\text{ни}} + \frac{Q_C}{m} \right]^{k-1}, \quad (34)$$

где $k=2$, $m=1$, $Z_{\text{ни}}=1$.

Таким образом, вероятность отказа для бистальных балок 2-го уровня (см. рис. 2, а, б) увеличивается кратно по сравнению с балками (см. рис. 2, в, г). Минимальная вероятность отказа бистальных балок в зависимости от Z_C , m , k представлена на рис. 3, 4.

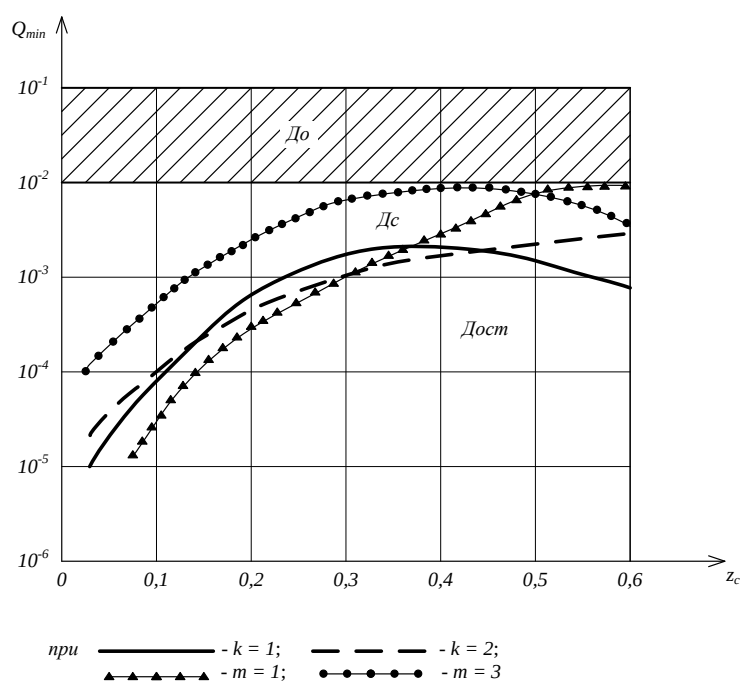


Рис. 3. Минимальная вероятность отказа резервированной бистальной балки в интервале 0–0,1–10 лет

Fig. 3. Minimum failure probability of redundant composite beam in the years 0–0 and 1–10

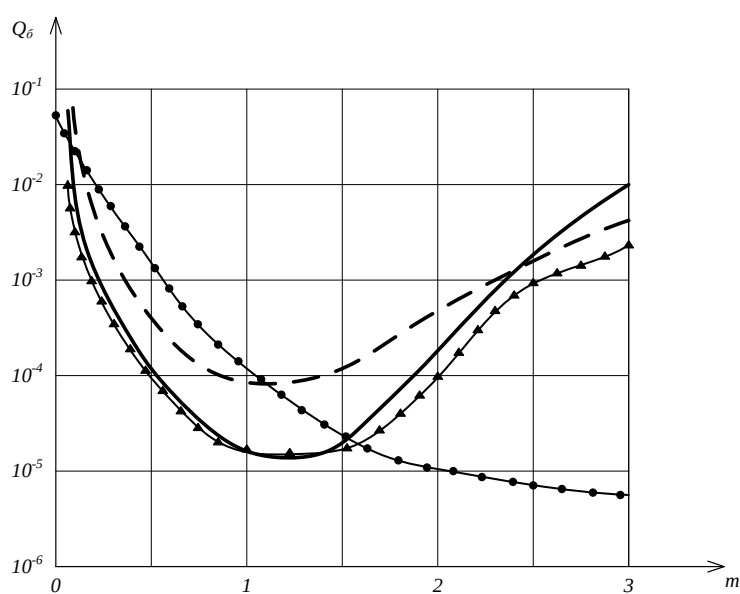


Рис. 4. Вероятность отказа резервированной бистальной балки в зависимости от числа резервных участков m

Fig. 4. Failure probability of reserved composite beam depending on the number m of reserve sections

Функция резервирования бистальных балок должна содержать условия, при которых вероятность выхода балки за предел «исправных» может быть больше, чем вероятность выхода части вертикальной стенки (Q_C) при определенных обстоятельствах. Условно функцию резервирования можно представить в виде

$$Q_P = 1 - (1 - Q_C)^m, \quad (35)$$

где m – число элементов резервирования.

Применительно к сопряжению нижней части вертикальной стенки и нижнего пояса функция отказа Q_C как функция вероятности повреждения запишется в виде

$$Q_C = (1 - Z_C)(1 - Z_{\text{ни}}), \quad (36)$$

где Z_C , $Z_{\text{ни}}$ – вероятность нормальной работы стенки нижнего пояса.

Выводы

Вероятность регулирования и повышения ресурсной надежности бистальных балок пролетных строений мостов в условиях резервирования в процессе длительной эксплуатации является уникальным и необходимым условием. Имитационное моделирование предельного состояния элементов бистальной балки, выполненных из сталей различной прочности, при переходе из одного предельного состояния в другое на основе отображения изменения состояния балки позволяет решать задачу по определению критериев резервирования надежности. Резервирование надежности бистальных балок в случайные отрезки времени рассматривается одним из параметров структурной надежности. Передача усилий и напряжений с элементов, достигших предельного состояния, на элемент с более высокими физико-механическими характеристиками по правилам резервирования аналогично принципу регулирования напряжения¹.

Таким образом, резервирование в бистальных балках повышает показатель ресурсной надежности и технического использования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Москва : Либроком, 2013. 579 с.
2. Картопольцев В.М. Применение бистальных балок в пролетных строениях автодорожных мостов : специальность 05.23.15 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Картопольцев Владимир Михайлович. Ленинград, 1991. 33 с.
3. Картопольцев А.В. Прогнозирование надежности бистальных балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 169–182.
4. Работнов Ю.Н., Суворова Ю.В. Распространение упругопластических волн в стержнях и балках с учетом запаздывания текучести // Волны в неупругих средах. Кишинев : Редакционно-издательский отдел Академии наук Молдавской ССР, 1970. С. 193–197.

¹ Картопольцев В.М. Исследование бистальных и бисталежелезобетонных балок разрезных пролетных строений автодорожных мостов с применением регулирования напряжения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ленинград, 1976. 160 с.

5. Картопольцев В.М. Бистальные и бисталежелезобетонные балки пролетных строений. Томск : Изд-во Томского университета, 1986. 247 с.
6. Бебиашвили Ш.Л. Основные вопросы теории резервирования // Известия Академии наук СССР, ОTH. 1956. № 2. С. 69–74.
7. Haviland R.P. Reliability in Guided Missiles // Jet propulsion. 1955. July. V. 25. № 7. P. 91–100.
8. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1982. 351 с.
9. Болотин В.В. Применение метода теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1978. 105 с.
10. Потанин А.А. Проектирование стальных мостов с учетом пластических деформаций. Москва : Транспорт, 1984. 200 с.
11. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы / Госстрой России. Москва : ФГУП ЦПП. 2005, 239 с.
12. Рекомендации по проектированию бистальных балок. Москва : ЦНИИпроектстальконструкция, 1985. 47 с.
13. Frost R.W., Shilling C.G. Behaviour of Hybrid Beams Subjected to Static load // Journal ASCE Struktural Div. Proceedigs St3. 1961. June. P. 1383–1401.
14. Чернов Н.Л., Шебанин В.С. Особенности расчета бистальных двутавров по критерию предельных пластических деформаций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 9. С. 19–24.
15. Половко А.М. Основы теории надежности. Москва : Наука, 1964. 446 с.
16. Raizer V. Theory of Reliability in Structural Design // AMR. 2004. V. 57. № 1. P. 1–21.
17. Takaoka N., Shirak W. Reliability analysis of Structural members composed of several random processes // International Journal of Mechanics Structural. 1984. 1212. P. 151–180.
18. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / под ред. А.А. Свешникова. Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар, 2008. 445 с.
19. Сифоров В.Н. О методах расчета надежности систем, содержащих большое число элементов // Известия АН СССР ОTH. 1954. № 6. С. 106–110.

REFERENCES

1. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Mathematical Methods in the Theory of Reliability. The Main Characteristics of Reliability and Statistical Analysis. Moscow: Librokom, 2013. 579 p. (In Russian)
2. Kartopoltsev V.M. Composite Beams in Road Bridge Superstructures. PhD Abstract. Leningrad, 1991. 33 p. (In Russian)
3. Kartopoltsev A.V. Reliability Prediction of Bridge Bisteel Beams. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 169–182. (In Russian)
4. Rabotnov Yu.N., Suvorova Yu.V. Propagation of Elastic-Plastic Waves in Rods and Beams with Yield Strength Delay. In: Waves in Inelastic Media. Kishinev, 1970. Pp. 193–197. (In Russian)
5. Kartopoltsev V.M. Composite and Reinforced Concrete Beams of Superstructures. Tomsk: TSU, 1986. 247 p. (In Russian)
6. Bebiashvili Sh.L. Problems of Redundancy Theory. Izvestiya Akademii nauk SSSR. 1956; (2): 69–74. (In Russian)
7. Haviland R.D. Reliability in Guided Missiles. Jet Propulsion. 1955; 25 (7): 91–100.
8. Bolotin V.V. Probability and Reliability Theories in Structural Analysis. Moscow: Stroyizdat, 1982. 351 p. (In Russian)
9. Bolotin V.V. Probability and Reliability Theories in Structural Analysis. Moscow: Stroyizdat, 1978. 105 p. (In Russian)
10. Potapkin A.A. Steel Bridge Design with Plastic Strain. Moscow: Transport, 1984. 200 p. (In Russian)
11. SNiP 205.03–84. Bridges and Pipes. Moscow, 1986. 210 p. (In Russian)
12. Streletsky N.N., Leus Yu.Ya., Kartopoltsev V.M., et al. Recommendations for Composite Beam Design. Moscow, 1985. 47 p. (In Russian)
13. Frost R.W., Shilling C.G. Behaviour of Hybrid Beams Subjected to Static Load. Journal ASCE Struktural Div. Proceedings St. 3. June 1961. Pp. 1383–1401.

14. Chernov N.L., Shebanin V.S. Composite I-Beam Strength Analysis using the Criterion of Extreme Plastic Strain. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1983; (9): 19–24. (In Russian)
15. Polovko A.M. Fundamentals of Reliability Theory. Moscow: Nauka, 1964. 440 p. (In Russian)
16. Raizer V. Theoru of Reliabilitu in Structural Design. *AMR*. 2004; 57 (1): 1–21.
17. Takaoka N., Shirak W. Reliability Analysis of Structural Members Composed of Several Random Processes. *International Journal of Machanics Structural*. 1984; 1212: 151–180.
18. Sveshnikov A.A. (Ed.) Collection of Problems on Probability Theory, Mathematical Statistics and Theory of Random Functions. Saint-Petersburg; Moscow; Krasnodar, 2008. 355 p. (In Russian)
19. Siforov V.N. Reliability Analysis of Systems with Large Number of Elements. *Izvestiya AN SSSR*. 1954; (6): 106–110. (In Russian)

Сведения об авторе

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Author Details

Andrei M. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2024
Одобрена после рецензирования 13.06.2024
Принята к публикации 16.09.2024

Submitted for publication 30.05.2024
Approved after review 13.06.2024
Accepted for publication 16.09.2024