

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21:519.87

К. О. ЖУНЕВ\*

\*Кафедра «Мосты», Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, Новосибирск, Россия, 630049, эл. почта junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

**Цель.** На основании экспериментально-теоретических исследований особенностей работы сварных соединений железнодорожных пролетных строений, подверженных образованию наиболее распространенных трещин, усовершенствовать инженерную методику по оценке усталостного ресурса таких конструкций. **Методика.** Оценка усталостного ресурса элемента конструкции выполняется в зависимости от вероятности безотказной работы соединения, при которой расчетный ресурс больше фактической наработки. Определение расчетного ресурса и наработки сварных соединений основано на гипотезе линейного суммирования повреждений. Мерой ресурса и наработки служат накопленные повреждения, вызываемые воздействием эталонного поезда. Величина повреждения зависит от напряжений цикла и кривой усталости типового сварного соединения. Определение циклов напряжений, действующих в элементе конструкции при проходе поезда, основано на аппарате линий влияния. Фактическую наработку соединения вычисляют путем математического моделирования грузопотока за весь период эксплуатации сооружения. **Результаты.** Описана методика, позволяющая выполнять оценку усталостного ресурса с учетом конструктивных особенностей пролетного строения и параметров его эксплуатации. **Научная новизна.** На основании численного моделирования работы стенки балки около верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости обосновано влияние зазора между верхним поясом и торцом вертикального ребра жесткости на величину напряжений в стенке балки, сформированы правила для построения линий влияния изгибающего момента, получена формула для определения напряжений в стенке балки при проходе подвижной нагрузки. Получены степенные уравнения для описания кривых усталости типовых сварных соединений в зависимости от вероятности разрушения соединения. **Практическая значимость.** Предложена стохастическая модель прогноза усталостного ресурса типовых болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов, учитывающая конструктивные особенности пролетного строения и параметры его эксплуатации.

**Ключевые слова:** железнодорожный мост; сварное пролетное строение; усталостная трещина; остаточный ресурс; наработка; метод расчета; транспортный поток; математическая модель

#### Введение

Проблема образования усталостных трещин в сварных швах железнодорожных пролетных строений после непродолжительного периода эксплуатации известна давно, и остается актуальной во многих странах (Ключник, 2017), (Bowman, Fu, Zhou, Connor, & Godbole, 2012; Бокарев, Усольцев, & Служаев, 2019). В последние годы на сети железных дорог России отмечают существенный рост количества усталостных трещин в типовых болто-сварных пролетных строениях (Бокарев, Усольцев, & Служаев, 2019). Особенно широкое распространение получили трещины в стенках главных и продольных балок у верхних и нижних концов сварных швов, прикрепляющих вертикальные ребра жесткости. Очевидно, что в условиях

прогрессирующего трещинообразования необходим инструмент прогнозирования срока безопасной эксплуатации сооружения для усиления контроля над ним или планирования ремонтных работ.

Для решения этой задачи еще в 90-х годах прошлого века такими институтами, как НИИЖТ (СГУПС), МИИТ, ИЭС им. Е. О. Патона, ВНИИЖТ, были предприняты совместные исследования долговечности сварных соединений. Несмотря на то, что в исследованиях принимали участие институты преимущественно железнодорожной направленности, результатом работы стали методические указания для расчета на усталость сварных соединений конструкций машин и сооружений промышленно-гражданского комплекса (РД 50-694-90, 1991). Применение этой методики для расчета ресурса

© К. О. Жунев, 2020

сварных соединений железнодорожных пролетных строений требует существенных корректировок и дополнений, поскольку режим эксплуатации таких конструкций довольно специфичен. Кроме того, имеющийся набор кривых усталости (диаграмм Вёлера) нуждается в дополнении кривыми, полученными в результате испытания образцов при действии изгибающего момента, поскольку трещины, наиболее распространенные в болто-сварных пролетных строениях (тип Т-9, Т-10), образуются в результате изгибных деформаций, а имеющиеся кривые усталости получены в результате испытаний соединений при действии растяжения-сжатия.

Известны современные исследования (Мальгин, & Кирьян, 2011; Медведев, & Мальгин, 2014), в которых авторами были показаны особенности работы стенок балок у верхних концов швов вертикальных ребер жесткости и сформулированы рекомендации по уточнению их расчетного ресурса с применением численного моделирования. В качестве недостатков предлагаемой методики следует отметить отсутствие механизма достоверного определения наработки соединения и высокие трудозатраты, связанные с построением трехмерной расчетной модели для определения локальных напряжений.

Исследования авторов (Melaku, & Jung, 2017; Fueki, & Takahashi, 2018) также направлены на прогнозирование усталостной долговечности сварных соединений при помощи численного моделирования. Однако предлагаемые расчетные модели учитывали не только особенности нагружения конструкции и геометрию сварного шва, но и остаточные напряжения от сварки. Применение таких инструментов несомненно ведет к уточнению величины ресурса соединения, но вместе с тем существенно усложняет достижение результата.

### Цель

На основании экспериментально-теоретических исследований особенностей работы сварных соединений железнодорожных пролетных строений, подверженных образованию наиболее распространенных трещин, усовершенствовать инженерную методику по оценке усталостного ресурса таких конструкций.

### Методика

Оценка усталостной долговечности сварного пролетного строения сводится к определению расчетного ресурса и наработки сварных соединений при заданной вероятности безотказной работы. Мерой усталостного ресурса и наработки элементов железнодорожных мостов служат относительные накопленные повреждения, вызываемые воздействием эталонного поезда. В качестве эталонного поезда принят набор подвижных единиц, состоящих из локомотива ВЛ-80 и полногрузных четырехосных вагонов, общей длиной состава 750 м. Схемы подвижных единиц эталонного поезда приведены на рисунке 1. Основным требованием к выбору эталонного поезда являлась его достаточная «тяжесть» для того, чтобы оказывать усталостное воздействие на элементы мостов, а также «узнаваемость» в виде набора подвижных единиц, которые обращаются и будут обращаться в обозримой перспективе на сети железных дорог.

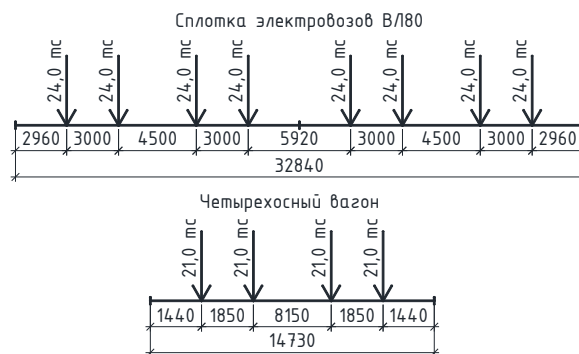


Рис. 1. Схемы подвижных единиц эталонного поезда

В качестве единицы измерения усталостного ресурса элемента пролетного строения принята величина обратная повреждению от эталонного поезда:

$$N_p = \frac{1}{v_3}, \quad (1)$$

где  $v_3$  – повреждение, вызванное прохождением по пролетному строению одного эталонного поезда.

Накопленное повреждение от совокупности циклов изменения напряжений при проходе поезда определяют на основании гипотезы линейного суммирования накопленных усталостных повреждений по формуле Пальмгрена-Майнера (Серенсен, 1985).

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Согласно этой гипотезе, мерой усталостного повреждения является отношение числа циклов нагружения к числу циклов до разрушения при заданном уровне циклических напряжений:

$$v = \sum_j \frac{n_j}{N_j}, \quad (2)$$

где  $j$  – индекс уровня максимальных напряжений цикла  $\sigma_j$ ;  $n_j$  – число циклов данного уровня;  $N_j$  – предельное число циклов до разрушения, принимаемое по кривым усталости.

В качестве расчетных кривых были приняты кривые усталости 3а, 4а, 5б и 6а, приведенные в методических указаниях (РД 50-694-90, 1991), и кривая усталости 9а, полученная при лабораторных испытаниях сварных образцов при действии изгибающего момента (Жунев, Мурованный, & Яшнов, 2020). В таблице 1 приведено описание сварных соединений и соответствующих им кривых усталости.

Таблица 1

Описание соединений и соответствующих кривых усталости	
Описание сварного соединения	Номер кривой усталости
Швы сплавления верхнего поясного шва со стенкой балки	3а
Швы прикрепления вертикальных ребер жесткости к верхним поясам балок	4а
Швы прикрепления горизонтальных ребер жесткости к вертикальным	5б
Швы прикрепления связей или фасонки	6а
Швы прикрепления вертикальных и горизонтальных ребер жесткости к стенке балки	9а

Уравнение (3), аппроксимирующее кривые усталости из методических указаний, было преобразовано к виду (4), аппроксимирующему кривую усталости, полученную в результате лабораторных испытаний образцов на изгиб при вероятности разрушения  $P = 0,50$ .

$$N = \frac{A}{\ln \left[ \frac{2\sigma_a}{(1-\rho)R_\rho} \right]} - B, \quad (3)$$

где  $\sigma_a$  – амплитуда напряжения цикла, МПа;  $\rho$  – коэффициент асимметрии цикла;  $R_\rho$  – расчетное сопротивление усталости, МПа;  $A$  и  $B$  – коэффициенты, определяемые в зависимости от группы соединения и асимметрии цикла напряжений.

$$N = \left( \frac{C}{\sigma_{\max}(1-\rho)} \right)^m, \quad (4)$$

где  $C$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты кривой усталости (таблица 2);  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения цикла, МПа.

Таблица 2

## Характеристики кривых усталости

Номер кривой	$S_0$ , МПа	Коэффициенты	
		$m$	$C$
3а	24	7,25	1107
4а	20	5,52	1848
5б	24	5,71	1994
6а	12	4,83	1411
9а	6	3,82	2562

Стоит отметить, что преобразование уравнения (3) к виду (4) приводит к погрешности определения напряжений не более 10%, но существенно упрощает расчет предельного количества циклов. Сравнение результатов определения напряжений для одной кривой, но с использованием разных уравнений ее описывающих, приведено в таблице 3.

Для учета вероятности отклонения предела выносливости типового соединения от среднего значения, формула (4) преобразована к следующему виду:

$$N = \left( \frac{C}{(\sigma_{\max} + z_p S_\rho)(1-\rho)} \right)^m, \quad (5)$$

где  $z_p$  – квантиль нормального распределения вероятности (таблица 5);  $S_\rho$  – среднеквадратическое отклонение предела выносливости в зависимости от  $\rho$ , МПа, определяется по формуле (6):

$$S_{\rho} = \frac{S_0}{1 - \rho}, \quad (6)$$

где  $S_0$  – среднее квадратическое отклонение предела выносливости при  $\rho = 0$ , МПа, (табл. 2).

Таблица 3

**Результаты определения напряжений по двум формулам, описывающим кривую усталости 5б**

Кол-во циклов, $\cdot 10^3$	Максимальные напряжения цикла, МПа			Средняя погрешность
	$\rho = -0,4$	$\rho = 0,0$	$\rho = +0,4$	
250	179,7	245,1	366,1	5%
	163,1	228,3	380,5	
500	149,9	205,8	319,5	0%
	144,1	201,8	336,3	
1000	124,7	172,3	276,2	4%
	127,4	178,4	297,3	
2000	107,5	149,3	244,1	6%
	112,6	157,7	262,8	
5000	95,0	132,6	219,4	1%
	95,7	133,9	223,2	
10000	90,5	126,4	210,0	7%
	84,6	118,4	197,3	

Примечание: значения над чертой определены по формуле (3), под чертой – по формуле (4).

Для получения совокупности циклов напряжений при проходе эталонного поезда следует реализовывать его «прокатку» по линии влияния усилия в сварном соединении. Построение линии влияния в рассматриваемом соединении следует выполнять в результате численного моделирования его работы в составе пролетного строения. Полученную последовательность циклов изменения напряжений при проходе нагрузки схематизируют по методу падающего дождя, позволяющему выделять как основные, так и наложенные циклы. Стоит отметить, что данный метод широко используется исследователями (Федорченко & Новиков, 2013; Гадолина, Козлов, Монахова, & Серебрякова, 2019), которые занимаются проблемой долговечности.

Например, для определения линии влияния изгибающего момента в стенке балки на уровне верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости (место развития трещин Т-9) были смоделированы пролетные строения с

разными геометрическими характеристиками сечения. Анализ полученных данных позволил определить общие зависимости и сформировать правила для построения линий влияния изгибающего момента в стенке балки: такая линия влияния является криволинейной и однозначной, длина ее ограничена длиной соседних отсеков балки. Для применения в инженерных расчетах, реальные криволинейные линии влияния были заменены треугольными без потери площади (рисунок 2).

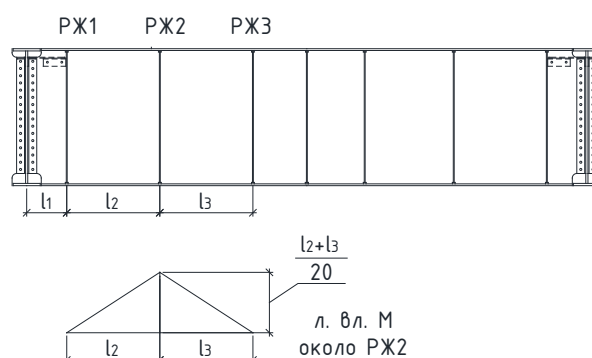


Рис. 2. Линия влияния изгибающего момента в стенке балки на уровне верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости

На основании анализа напряженно-деформированного состояния таких соединений была получена формула для определения напряжений:

$$\sigma = k_z \frac{F_{ys}}{W}, \quad (7)$$

где  $k_z$  – коэффициент, отражающий влияние плотности опирания пояса балки на торец ребра жесткости и определяемый по таблице 4;  $F$  – часть осевого давления подвижной нагрузки, приходящейся на одну балку;  $y$  – ордината линии влияния;  $s$  – расстояние от оси балки до места приложения осевого давления подвижной нагрузки (рельс мостового полотна);  $W$  – момент сопротивления сечения стенки балки, длиной, равной длине соседних отсеков, и толщиной, равной толщине стенки.

Коэффициент, учитывающий увеличение напряжений в зависимости от величины зазора, был получен при исследовании особенностей работы конечно-элементной модели сварного пролетного строения (Бокарев, Жунев, & Усольцев, 2018).

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Таблица 4

Значения коэффициента плотности опирания  
верхнего пояса

Величина зазора между верхним поясом и торцом ребра жесткости, мм	$k_z$
0	1
0,5	2,15
1	2,95
1,5	3,80
2	4,65

В связи с тем, что для железнодорожных мостов характерно большое число схем поездных нагрузок, их существенная изменчивость в течение срока эксплуатации, и, следовательно, значительные различия в их усталостных воздействиях, для определения наработки элементов сооружения целесообразным оказывается выражение накопленного повреждения от обрабатываемых нагрузок ( $v_i$ ) через повреждение от эталонного поезда ( $v_0$ ):

$$K_{ni} = \frac{v_i}{v_0}. \quad (8)$$

Поскольку величиной накопленного усталостного повреждения оценивается наработка, то этот коэффициент называется коэффициентом наработки. Использование коэффициентов наработки позволяет оценить различия в накоплении повреждений не только для отдельных схем поездов, но и грузопотоков за разные промежутки времени и на разных участках дорог.

Для определения коэффициента наработки за определенный период производится математическое моделирование потока подвижных нагрузок на основе информации о количестве, типе и загрузке вагонов, роде груза в вагоне, среднем весе, количестве груженых и порожних поездов, типах локомотивов. Эта информация может быть получена из статистической отчетности железных дорог.

Модель поезда формируется из групп вагонов одного типа и одного рода груза. Выбор количества групп вагонов, их типа и рода груза – случайный процесс, основанный на методе Монте-Карло (Rubinstein & Kroese, 2017). Для реализации этого метода анализируется парк

вагонов, парк локомотивов и структура грузопотока на рассматриваемом участке железной дороги. Смоделированный состав представляет собой последовательность осевых нагрузок и межосевых расстояний, который в дальнейшем «прокатывается» по линии влияния. Поскольку моделирование поездопотока имеет вероятностную основу, то коэффициент наработки принимается в виде среднего значения после прокатки ста поездов.

Для определения наработки вся история эксплуатации сооружения разбивается на несколько периодов, каждый из которых характеризуется числом прошедших поездов и соответствующим коэффициентом наработки. Общую величину наработки за весь срок эксплуатации моста определяют по формуле:

$$N_n = \sum_i N_{ni} K_{ni}, \quad (9)$$

где  $N_{ni}$  – количество поездов, прошедших за  $i$ -й период по участку дороги;  $K_{ni}$  – коэффициент наработки за  $i$ -й период эксплуатации сооружения.

Оценка остаточного ресурса соединения производится в зависимости от вероятности безотказной работы, при которой расчетный ресурс соединения больше наработки. В таблице 5 указаны состояния соединения, соответствующие интервалы вероятности безотказной работы и квантили стандартного отклонения распределения долговечности. Общий вид графика, отражающего зависимость оценки остаточного ресурса от вероятности безотказной работы сварного соединения, показан на рисунке 3.

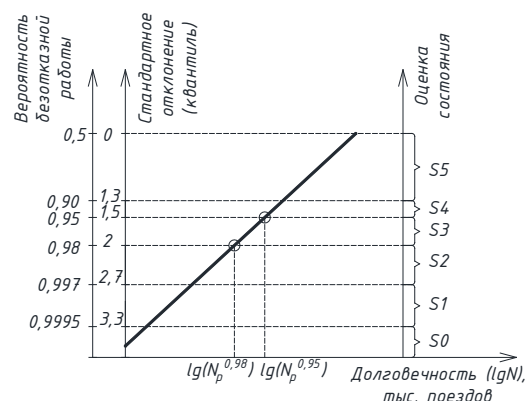


Рис. 3. График оценки остаточного ресурса в зависимости от вероятности безотказной работы

Оценка ресурса сварного соединения

Состояние	Оценка и характеристика ресурса сварного соединения	Вероятность безотказной работы / квантиль
S <sub>0</sub>	Отличное Неограниченный ресурс соединения	≥0,999 ≥3,3
S <sub>1</sub>	Хорошее Большой ресурс соединения	0,999...0,997 3,3...2,7
S <sub>2</sub>	Удовлетворительное Низкий ресурс соединения. Необходимо наблюдение	0,997...0,98 2,7...2
S <sub>3</sub>	Неудовлетворительное Низкий ресурс соединения. Необходима точная оценка усталостного ресурса	0,98...0,95 2...1,5
S <sub>4</sub>	Предотказное Необходимо планировать усиление в плановом порядке	0,95...0,90 1,5...1,3
S <sub>5</sub>	Отказ Необходимо усиление в кратчайшие сроки	<0,9 <1,3

Результаты

На основании разработанной методики была произведена оценка усталостного ресурса сварного соединения вертикального ребра жесткости продольной балки решетчатого пролетного строения. Общий вид продольной балки и линия влияния момента в стенке около ребра жесткости № 2 показаны на рис. 4. В качестве расчетной была применена кривая усталости 9а.

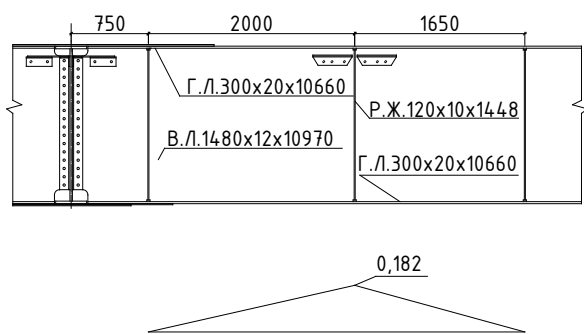


Рис. 4. Линия влияния момента в стенке балки около ребра жесткости № 2

В результате расчета было определено, что при плотном опирании верхнего пояса на ребро жесткости ( $k_z = 0$ ) максимальные напряжения под локомотивом составляют 59,8 МПа, расчетный ресурс соединения при вероятности безотказной работы  $P = 0,98$  составил 14070 эталонных поездов. При наработке равной

12610 эталонных поездов ресурс соединения оценивается как удовлетворительный. Таким образом, методика позволяет оценить остаточный ресурс сварных соединений и планировать работы по ремонту или усилению элементов болто-сварных пролетных строений для сохранения потребительских качеств конструкций.

Научная новизна  
и практическая значимость

На основании численного моделирования работы стенки балки около верхнего обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости обосновано влияние зазора между верхним поясом и торцом вертикального ребра жесткости на величину изгибающего момента в стенке балки, сформированы правила для построения линий влияния этого изгибающего момента, получена формула для определения напряжений в стенке балки при проходе подвижной нагрузки.

Получены степенные уравнения для описания кривых усталости типовых сварных соединений в зависимости от вероятности разрушения соединения.

Предложена стохастическая модель прогноза усталостного ресурса типовых болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов, учитывающая конструктивные особенности пролетного строения и параметры его эксплуатации.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

## Выводы

Описана методика, позволяющая выполнять оценку усталостного ресурса с учетом конструктивных особенностей пролетного строения и параметров его эксплуатации. Приведен пример оценки ресурса сварного соединения в эксплуатируемом типовом болто-сварном пролетном строении.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Bowman, M. D., Fu, G., Zhou, E., Connor, R. J., & Godbole, A. A. (2012). *Fatigue evaluation of steel bridges*. Washington: National Academy of Sciences.
- Fueki, R., & Takahashi, K. (2018). Prediction of fatigue limit improvement in needle peened welded joints containing crack-like defects. *International Journal of Structural Integrity*, 50-64.
- Melaku, A. F., & Jung, K. S. (2017). Evaluation of welded joints of vertical stiffener to web under fatigue load by hotspot stress method. *International journal of steel structures*, 271-278.
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2017). *Simulation and the Monte Carlo method*. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc.
- Бокарев, С. А., Жунев, К. О., & Усольцев, А. М. (2018). Напряженное состояние сварных узлов железнодорожных пролетных строений. *Инженерно-строительный журнал*, 119-129.
- Бокарев, С. А., Усольцев, А. М., & Служаев, А. И. (2019). Предупреждение появления усталостных трещин в сварных металлических пролетных строениях. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, 181-193.
- Гадолина, И. В., Козлов, А. Д., Монахова, А. А., & Серебрякова, И. Л. (2019). Оптимальный способ ЦОС в задачах долговечности. *Вестник РГГУ*, 78-93.
- Жунев, К. О., Мурованный, Ю. Н., & Яшнов, А. Н. (2020). Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений. *Транспортные сооружения*, 1-13.
- Ключник, С. В. (2017). Аналіз сучасного стану металевих прогонових будов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 29-40.
- Мальгин, М. Г., & Кирьян, В. И. (2011). Пути обеспечения нормативного ресурса пролетных строений мостов. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 55-59.
- Медведев, К. В., & Мальгин, М. Г. (2014). Модель расчета мостовых конструкций на усталость по локальным напряжениям. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 89-102.
- РД 50-694-90. (1991). *Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций*. Москва: Издательство стандартов.
- Серенсен, С. В. (1985). *Усталость материалов и элементов конструкций*. Киев: Наукова думка.
- Федорченко, Д. Г., & Новиков, Д. К. (2013). Методы схематизации эксплуатационного цикла изменения напряжений системой элементарных циклов. *Известия Самарского научного центра РАН*, 267-271.

К. О. ЖУНЕВ\*

\* Кафедра «Мости», Сибірський державний університет шляхів сполучення, вул. Дусі Ковальчук, 191, Новосибірськ, Росія, 630049, ел. пошта junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВТОМНОГО РЕСУРСУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ

**Мета.** На основі експериментально-теоретичних досліджень особливостей роботи зварних з'єднань залізничних прогонових будов, схильних до утворення найбільш поширених тріщин, удосконалити інженерну методику по оцінці втомного ресурсу таких конструкцій. **Методика.** Оцінка втомного ресурсу елемента конструкції виконується в залежності від ймовірності безвідмовної роботи з'єднання, при якій розрахунковий ресурс більше фактичного напрацювання. Визначення розрахункового ресурсу і напрацювання зварних з'єднань засноване на гіпотезі лінійного підсумовування пошкоджень. Мірою ресурсу і напрацювання служать накопичені ушкодження, що викликаються дією еталонного поїзда. Величина ушкодження залежить від напружень циклу і кривої втоми типового зварного з'єднання. Визначення циклів напружень, що діють в елементі конструкції при проходженні поїзда, засноване на апараті ліній впливу. Фактичне напрацювання з'єднання обчислюють шляхом математичного моделювання вантажопотоку за весь період експлуатації споруди. **Результати.** Описана методика, що дозволяє виконувати оцінку втомного ресурсу з урахуванням

© К. О. Жунев, 2020



конструктивних особливостей прогонової будови і параметрів його експлуатації. **Наукова новизна.** На основі чисельного моделювання роботи стінки балки біля верхнього обриву зварного шва вертикального ребра жорсткості обґрунтовано вплив зазору між верхнім поясом і торцем вертикального ребра жорсткості на величину напружень в стінці балки, сформувані правила для побудови ліній впливу згинального моменту, отримана формула для визначення напружень в стінці балки при проході рухомого навантаження. Отримано степеневі рівняння для опису кривих втомних типових зварних з'єднань в залежності від ймовірності руйнування з'єднання. **Практична значимість.** Запропоновано стохастична модель прогнозу втомного ресурсу типових болто-зварних прогонових будов залізничних мостів, що враховує конструктивні особливості прогонової будови і параметри його експлуатації.

**Ключові слова:** залізничний міст; зварна прогонова будова; втомна тріщина; залишковий ресурс; напруження; метод розрахунку; транспортний потік; математична модель

К. О. ZHUNEV\*

\* Department «Bridges», Siberian transport university, Dusi Kovalchuk St., 191, Novosibirsk, Russia, 630049, e-mail junev.kirill@yandex.ru, ORCID 0000-0002-0539-2619

## FATIGUE LIFE ASSESSMENT METHOD OF WELDED JOINTS IN RAILWAY GIRDERS

**Purpose.** To improve the fatigue life evaluating method of welded joints in railway girders based on experimental and theoretical studies of these structures operation. **Methodology.** The fatigue life assessment is based on the nonfailure operation probability, at which is greater than the operating time. The hypothesis of damages linear summation is used to determine the fatigue life and operating time of welded joints. Accumulated damage from the reference train is a measure of fatigue life and operating time. The amount of damage depends on the stresses and fatigue curve of a typical welded joint. Influence lines are used to determine the stresses in a construction member under moving load. The operating time of the construction member is calculated by cargo traffic mathematical modeling for the construction service life. **Results.** The method for assessing fatigue life is described. This method is taking into account the design features of the railway girder and the parameters of its operation. **Originality.** The numerical simulation of railway girder has allowed to establish the dependence of stresses on the beam web surface near the weld toe on the rigidity of stiffener fixation to beam flanges, to formulate rules for constructing bending moment influence lines, and to obtain a formula for determining stresses on the surface of the beam web under moving load. An equation is obtained for describing the fatigue curves of typical welded joints depending on the probability of joint failure. **Practical value.** A stochastic model for fatigue life predicting of typical railway welded girders is proposed. This model is taking into account the design features of the span and the parameters of its operation.

**Keywords:** railway bridge; welded girder; fatigue crack; residual fatigue life; operating time; design method; cargo traffic; mathematical model

### REFERENCES

- Bowman, M. D., Fu, G., Zhou, E., Connor, R. J., & Godbole, A. A. (2012). *Fatigue evaluation of steel bridges*. Washington: National Academy of Sciences. (in English)
- Fueki, R., & Takahashi, K. (2018). Prediction of fatigue limit improvement in needle peened welded joints containing crack-like defects. *International Journal of Structural Integrity*, 50-64. (in English)
- Melaku, A. F., & Jung, K. S. (2017). Evaluation of welded joints of vertical stiffener to web under fatigue load by hotspot stress method. *International journal of steel structures*, 271-278. (in English)
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2017). *Simulation and the Monte Carlo method*. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc. (in English)
- Bokarev, S. A., Zhunev, K. O., & Usoltsev, A. M. (2018). Napryazhennoe sostoyanie svarnykh uzlov zheleznodorozhnykh proletnykh stroeniy. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*, 119-129. (in Russian)
- Bokarev, S. A., Usoltsev, A. M., & Sluzhaev, A. I. (2019). Preduprezhdenie poyavleniya ustalostnykh treshchin v svarnykh metallicheskikh proletnykh stroeniyakh. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 181-193. (in Russian)
- Gadolina, I. V., Kozlov, A. D., Monakhova, A. A., & Serebryakova, I. L. (2019). Optimalnyy sposob TsOS v zadachakh dolgovechnosti. *Vestnik RGGU*, 78-93. (in Russian)



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Zhunev, K. O., Murovannyu, Yu. N., & Yashnov, A. N. (2020). Issledovanie ustalostnoy dolgovechnosti svarnykh soedineniy zheleznodorozhnykh proletnykh stroeniy. *Transportnye sooruzheniya*, 1-13. (in Russian)
- Kliuchnyk, S. V. (2017). Analiz suchasnoho stanu metalevykh prohonovykh budov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 29-40. (in Ukrainian)
- Malgin, M. G., & Kiryan, V. I. (2011). Puti obespecheniya normativnogo resursa proletnykh stroeniy mostov. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 55-59. (in Russian)
- Medvedev, K. V., & Malgin, M. G. (2014). Model rascheta mostovykh konstruktsiy na ustalost po lokalnym napryazheniyam. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 89-102. (in Russian)
- RD 50-694-90. (1991). *Veroyatnostnyy metod rascheta na ustalost svarnykh konstruktsiy*. Moskva: Izdatelstvo standartov. (in Russian)
- Serensen, S. V. (1985). *Ustalost materialov i elementov konstruktsiy*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
- Fedorchenko, D. G., & Novikov, D. K. (2013). Metody skhematizatsii ekspluatatsionnogo tsikla izme-neniya napryazheniy sistemoy elementarnykh tsiklov. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 267-271. (in Russian)

Надійшла до редколегії 10.09.2020.

Прийнята до друку 16.10.2020.