

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.014.078.45

С.А. Бокарев, К.О. Жунев

Особенности и перспективы оценки остаточного ресурса сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов

В статье представлены наиболее распространенные типовые проекты сварных металлических пролетных строений, эксплуатируемых на сети железных дорог. Основным повреждением этих пролетных строений являются усталостные трещины, оказывающие негативное влияние как на прочность, так и на долговечность конструкции. На основании анализа конструктивных недостатков и технологических особенностей изготовления сварных пролетных строений выявлены причины возникновения наиболее типичных трещин. Изучение статистики отказов сварных пролетных строений за последние 20 лет позволило оценить динамику образования усталостных трещин и сделать вывод о значительном росте их количества в последние годы. Приведена разработанная в 90-х гг. прошлого века такими институтами, как НИИЖТ (СГУПС), МИИТ, ИЭС им. Е.О. Патона, ВНИИЖТ, методика оценки остаточного усталостного ресурса металлических конструкций, основанная на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений. Отличительной чертой приведенной методики является то, что ресурс и наработку определяют в числе эталонных поездов. Такой подход позволяет учитывать изменчивость структуры грузопотока по заданному направлению за весь период эксплуатации сооружения. Обоснована необходимость совершенствования методики по расчету остаточного ресурса сварных пролетных строений, что особенно актуально в связи с вводом тяжеловесного движения на сети железных дорог ОАО «РЖД». Выявлена неразрешенная проблема определения напряженно-деформированного состояния элементов пролетных строений в местах образования трещин с учетом работы конструкции в сложном напряженном состоянии, а также с учетом остаточных напряжений, возникающих в результате сварки. Сформулированы цель и задачи исследования остаточного усталостного ресурса сварных металлических пролетных строений.

Ключевые слова: *сварные пролетные строения, железнодорожные мосты, наработка, остаточный усталостный ресурс, долговечность.*

Сварные железнодорожные пролетные строения в отечественном мостостроении начали применять с 50-х гг. прошлого века. Однако они не обладали достаточной надежностью, поскольку уже через 15–20 лет эксплуатации в сварных узлах прикреплений продольных и поперечных связей к главным балкам образовывались усталостные трещины [1]. Развитие усталостных дефектов происходит в результате постепенного накопления повреждений при действии многократно повторяющихся нагрузок и наблюдается, как правило, в локальных зонах элементов с высокой концентрацией напряжений. Именно поэтому сварные пролетные строения наиболее уязвимы перед усталостными повреждениями по сравнению с пролетными строениями, у которых соединения выполнены на высокопрочных болтах или заклепках. С целью уменьшения негативного влияния сварки на долговечность конструкции с 1968 г. проектные институты Ленгипротрансмост и Гипротрансмост стали разрабатывать типовые проекты (ТП) пролетных строений, в которых прикрепление продольных и поперечных связей выполняют

при помощи высокопрочных болтов, а прикрепление ребер жесткости и стыковые соединения – автоматической сваркой. Наибольшее распространение на сети железных дорог России получили следующие пролетные строения: балочные сплошностенчатые с ездой поверху по ТП инв. № 821 (более 1 600 шт.); балочные сплошностенчатые с ездой понизу по ТП инв. № 563 (более 250 шт.); со сквозными главными фермами с ездой понизу по ТП инв. № 690 (около 700 шт.), инв. № 1293 (более 350 шт.); сталежелезобетонные по ТП инв. № 739 (около 700 шт.) [2].

Несмотря на уязвимость сварных пролетных строений перед усталостными трещинами, количество этих конструкций на железной дороге постоянно увеличивалось и к началу 2016 г. составило более 5 600 шт. Динамика изменения количества эксплуатируемых сварных пролетных строений и их дефектность за последние 20 лет показаны на рис. 1. В связи с прогрессирующим образованием трещин в сварных пролетных строениях были проведены исследования этого явления и разработаны Указания по осмотру и усилению

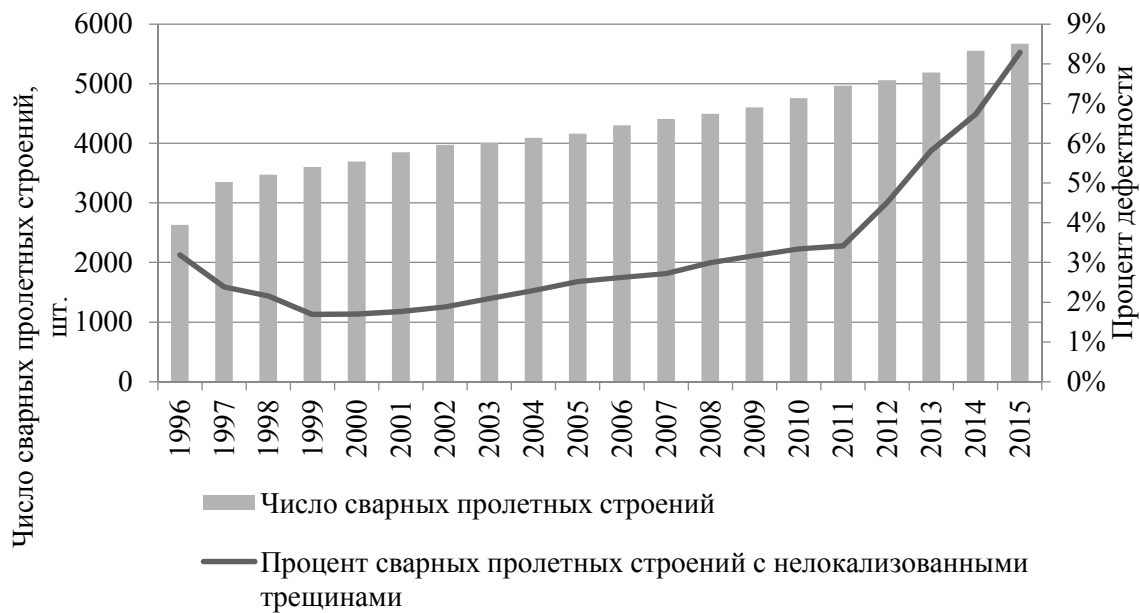


Рис. 1. Динамика изменения количества сварных пролетных строений на сети железных дорог ОАО «РЖД»

эксплуатируемых сварных пролетных строений [3], в которых приведена классификация трещин и их подробное описание. В соответствии с принятой классификацией различают 17 типов трещин (Т-1, ..., Т-17), располагающихся в разных местах пролетного строения. Наиболее распространенными для перечисленных типовых проектов являются трещины типа Т-4, Т-6, Т-9, Т-10, Т-13, а также продольные трещины по шву прикрепления вертикальных и горизонтальных ребер жесткости.

Расположение этих трещин в элементах пролетного строения изображено на рис. 2. Статистика отказов сварных пролетных строений показывает, что максимально негативные последствия для прочности и долговечности конструкции наступают в результате образования трещин в стенках главных балок (трещины Т-9, Т-10). Такие трещины при существенном развитии уменьшают несущую способность сечения главной балки пролетного строения или проезжей части [4]. Согласно

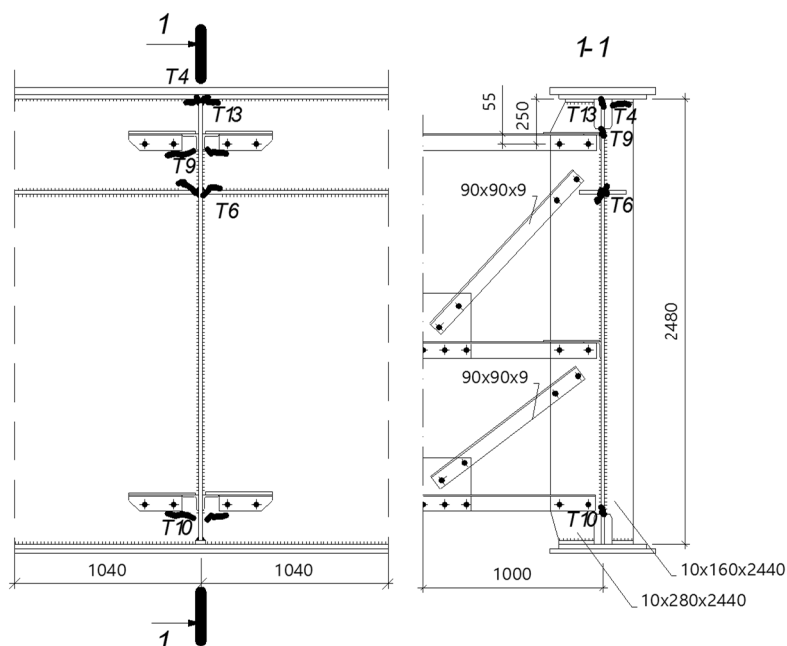


Рис. 2. Расположение усталостных трещин в сварном пролетном строении

Указаниям [3] за трещиной, образовавшейся в основном металле пролетного строения, необходимо установить наблюдение не реже одного раза в месяц, а в случае ее роста засверливать устье трещины сверлом диаметром 18–20 мм и устанавливать в отверстие высокопрочный болт для создания напряженного состояния, препятствующего развитию трещины. Данная последовательность действий получила название «локализация трещин», и ее широко применяют на сети железных дорог. Однако локализация трещин не устраняет причину их образования и может быть применена далеко не для всех типов трещин.

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых [5–8], занимающихся изучением долговечности конструкций, позволили выделить основные факторы трещинообразования в сварных пролетных строениях. Возникновение усталостных трещин в сварных швах связывают как с особенностями конструкции пролетных строений, так и с технологией их изготовления. К конструктивным особенностям, влияющим на образование трещин, относят неплотное прилегание «сухари-ков» ребер жесткости к поясам главных балок, пониженную усталостную прочность главных балок при устройстве пути на безбалластном мостовом полотне, внецентренное воздействие подвижной нагрузки на главные балки. Все это приводит к работе элементов в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, которое необходимо учитывать при расчете долговечности конструкции. К технологическим особенностям, негативно влияющим на долговечность конструкции, относят высокие остаточные напряжения в результате плавления металла в зоне шва, наличие концентраторов напряжений в сварных швах и т.п. Отмеченные особенности действуют в различных сочетаниях и приводят к образованию усталостных трещин в конструкциях.

Обследования, проведенные мостоиспытательными станциями железных дорог, показали, что значительный рост количества усталостных трещин в сварных пролетных строениях железнодорожных мостов проявился в последние пять лет [9]. Таким образом, число трещин в сварных пролетных строениях на 2016 г. составило более 2 600 шт., что, возможно, связано с вводом тяжеловесных (свыше 6 000 т) и

длинносоставных (более 71 вагона) поездов. Ввод в обращение вагонов с повышенными осевыми и погонными нагрузками, очевидно, ускоряет процессы накопления усталостных повреждений в элементах металлических пролетных строений. При этом вероятность образования усталостных трещин в элементах увеличивается [10], но точную оценку этому процессу сейчас дать невозможно из-за отсутствия достоверной методики расчета остаточного усталостного ресурса.

Как правило, определение усталостной долговечности металлических конструкций основано на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений. Идея гипотезы состоит в том, что повреждение, вызываемое данным циклом нагружений, не зависит от последовательности циклов, а разрушение наступает, когда сумма накопленных повреждений достигает расчетного значения. Такой подход был применен в методике расчета усталостного ресурса сварных пролетных строений [11], которую разработали в 1989–1990 гг. НИИЖТ (СГУПС), МИИТ, ИЭС им. Е.О. Патона, ВНИИЖТ. Согласно этой методике оценка усталостного ресурса сводится к определению расчетной усталостной долговечности элемента при заданной вероятности безотказной работы, а условие обеспечения долговечности записывают в виде неравенства

$$N_n \leq N_p, \quad (1)$$

где N_n – наработка элемента за период эксплуатации сооружения в числе эталонных поездов; N_p – расчетный ресурс, т.е. наработка до отказа в числе эталонных поездов.

Расчетный ресурс определяют как величину, обратную значению усталостного повреждения от эталонного поезда. В качестве эталонного поезда выступает набор подвижных единиц из локомотива ВЛ-80 и полногрузных четырехосных вагонов общей длиной состава 750 м. Схема поезда приведена на рис. 3. Работоспособность элемента пролетного строения оценивают расчетной величиной остаточного усталостного ресурса $N_{ост}$:

$$N_{ост} = N_p - N_n. \quad (2)$$

Календарную величину остаточного ресурса, выраженную в годах последующей эксплуатации, можно определить по формуле

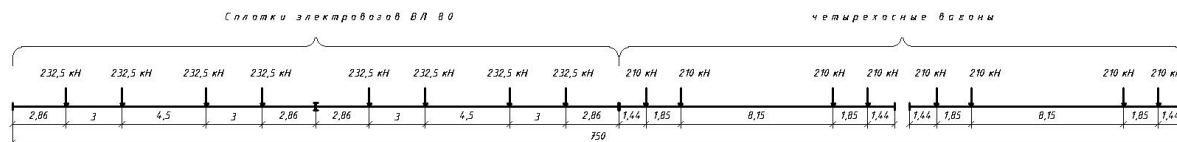


Рис. 3. Схема эталонного поезда

$$T_{\text{ост}} = \frac{N_{\text{ост}}}{N_{\text{год}} K_n}, \quad (3)$$

где $N_{\text{год}}$ – интенсивность движения (число прошедших поездов) в текущем году; K_n – коэффициент наработки в текущем году от обрабатываемых поездов.

Расчетный ресурс соответствует величине, количественно выраженной в числе эталонных поездов, которые могут быть пропущены по пролетному строению с начала эксплуатации до момента, когда вероятность отказа достигнет предельного значения. Величину расчетного ресурса определяют по формуле

$$N_p = \frac{1}{v_3}, \quad (4)$$

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

Наработку по заданному сроку службы (N_n) определяют в числе эталонных поездов и сводят к определению продолжительности или полезного объема работы элементов мостов с учетом числа прошедших грузовых и пассажирских поездов, структуры грузопотока, сведений о типах локомотивов и загрузке вагонов за время эксплуатации моста. Эта информация может быть получена из форм статистической отчетности ЦО-4, ЦО-17 и ЦО-29, хранящихся в архиве железной дороги. Для определения наработки всю историю нагружения условно разбивают на несколько периодов, каждый из которых характеризуется числом прошедших поездов N_i и соответствующими коэффициентами наработки K_{ni} . В итоге величину наработки N_n за весь срок службы моста определяют как сумму

$$N_n = \sum N_i K_{ni}, \quad (5)$$

где N_i – число поездов i -го периода эксплуатации; K_{ni} – коэффициент наработки i -го периода эксплуатации.

Коэффициент наработки отражает величину усталостных повреждений от прошед-

ших поездов в единицах усталостного повреждения, вызываемого эталонным поездом:

$$K_{ni} = \frac{v_i}{v_3}, \quad (6)$$

где v_i – расчетное значение усталостного повреждения от i -го поезда.

Такой подход позволяет, однажды проклассифицировав поездные нагрузки по значениям K_{ni} , в дальнейшем вести расчеты усталости только для эталонной нагрузки. Мету повреждения, в том числе и от эталонного поезда, определяют в виде совокупности циклов изменения напряжений [12]:

$$v = \sum_j \sum_k \frac{n_{jk}}{N_{jk}}, \quad (7)$$

где j – индекс уровня максимальных напряжений цикла σ_j ; k – индекс уровня коэффициента асимметрии цикла $\rho_{\sigma j}$; n_{jk} – число циклов данного уровня; N_{jk} – число циклов до разрушения по кривой усталости.

Предельное число циклов N до разрушения элемента при заданной вероятности отказа P находят, используя уравнение кривой усталости

$$\sigma = \sigma_p(P) e^{\frac{A_p}{N(P)+B_p}}, \quad (8)$$

где $\sigma_p(P)$ – нормативное значение предела выносливости при вероятности отказа P , зависящее от типа соединения и асимметрии цикла напряжений; A_p и B_p – эмпирические коэффициенты, зависящие от характеристики стали и асимметрии цикла (рис. 4).

Вид кривой усталости для низколегированных сталей показан на рис. 5.

Несмотря на всю логичность и проработанность изложенной методики на момент разработки, ее основным недостатком являлся нерешенный вопрос определения напряженного состояния в местах образования трещин. Методы строительной механики не учитывали всех факторов трещинообразования (сложное напряженно-деформированное состояние элемента и остаточные сварочные

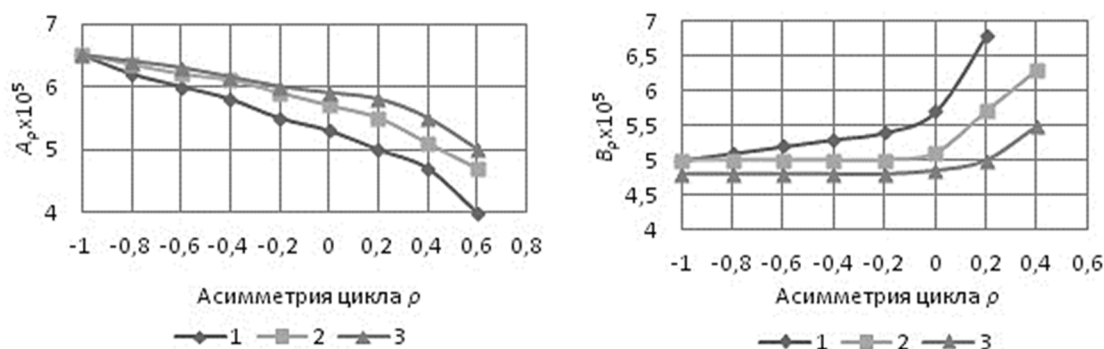


Рис. 4. Зависимость коэффициентов A_p и B_p от асимметрии цикла напряжений: 1 – низкоуглеродистые стали; 2 – низколегированные стали; 3 – высокопрочные стали

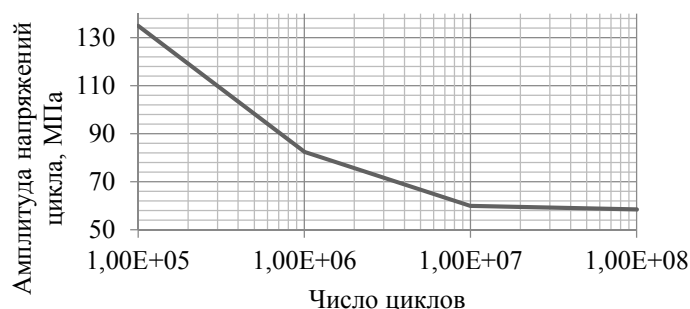


Рис. 5. Кривая усталости для низколегированных сталей при $\rho = 0,2$

напряжения), влияющих на характеристики цикла напряжений. Учесть данные факторы можно с применением численных методов моделирования. Кроме того, авторами методики отмечалась нехватка материалов по статистике отказов, отсутствие результатов натурных измерений напряженного состояния в зонах трещинообразования, недостаток данных о поезд- и грузопотоках, необходимых для расчета наработки [9]. По этим причинам разработанная в 1990 г. методика не вошла ни в один нормативный документ для расчета мостовых конструкций. В связи с ростом количества усталостных трещин в сварных пролетных строениях назрела острая необходимость в сборе недостающих данных и совершенствовании методики оценки остаточного ресурса металлических железнодорожных пролетных строений.

Целью дальнейшего исследования является снижение затрат на усиление или замену сварных железнодорожных пролетных строений за счет рационального планирования инвестиций на основе достоверной оценки их остаточного усталостного ресурса. Анализ конструктивных недостатков сварных пролетных строений и технологических особенностей их производства, а также существующей методики расчета усталостной долговечности

показал, что для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить влияние факторов трещинообразования на ресурс сварных узлов металлических пролетных строений с использованием методов численного моделирования;
- выполнить натурные исследования напряженно-деформированного состояния сварных пролетных строений от воздействия подвижной обращающейся нагрузки в местах вероятного образования трещин;
- собрать и систематизировать статистические данные о характеристиках поезд- и грузопотоков для возможности определения наработки за годы эксплуатации пролетного строения;
- пополнить статистику отказов эксплуатируемых сварных пролетных строений для сопоставления с результатами расчета остаточного ресурса по усовершенствованной методике;
- разработать предложения по совершенствованию методики расчета усталостного ресурса сварных пролетных строений железнодорожных мостов и рассчитать их остаточный ресурс;
- разработать программное обеспечение для автоматизированного расчета остаточного усталостного ресурса сварных пролетных строений.

Библиографический список

1. Осипов В.О. Долговечность металлических пролетных строений железнодорожных мостов. М.: Транспорт, 1982. 287 с.
2. Бокарев С.А., Усольцев А.М. О необходимости и методах ремонта стальных пролетных строений железнодорожных мостов с трещинами типа Т9 и Т10 // Политранспортные системы: Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. С. 120–125.
3. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. М.: МПС, 1990. 28 с.
4. Расчет динамической нагруженности и усталостной долговечности железнодорожных мостов методами компьютерного моделирования / Г.В. Михеев, Н.Н. Лысков, Д.Ю. Погорелов, Е.А. Кругова, В.И. Кирьян, М.Г. Мальгин // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. 2013. № 18. С. 184–191.
5. Мальгин М.Г., Медведев К.В. Модель расчета мостовых конструкций на усталость по локальным напряжениям // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. 2014. № 6. С. 89–102.
6. Heinsen C. Fatigue life assessment of a critical field welded connection on a temporary railway bridge span. University of Texas at Arlington, 2015. 143 p.
7. Leander J. Improving a bridge fatigue life prediction by monitoring. Bulletin 106. Stockholm: KTH, Trita-BKN, 2010. 71 p.
8. Голубев К.В. Остаточный ресурс зданий и сооружений исторической застройки как один из критериев обеспечения их надежности // Вестник ПНИПУ. 2015. № 2. С. 37–48.
9. Бокарев С.А., Мурованный Ю.Н., Усольцев А.М. Влияние тяжеловесного движения на искусственные сооружения // Железнодорожный транспорт. 2016. № 4. С. 25–28.
10. Р 774/3. Рекомендации по оценке влияния повышенной нагрузки на выносливость элементов главных ферм металлических пролетных строений железнодорожных мостов / Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). Варшава, 2013. 13 с.
11. Разработка методики расчета на усталость сварных соединений и узлов пролетных строений железнодорожных мостов на основе вероятностных подходов к установлению расчетных нагрузок и характеристик сопротивления усталости. Новосибирск: НИИЖТ, 1989. 15 с.
12. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. М.: Изд-во стандартов, 1991. 84 с.

S.A. Bokarev, K.O. Junev

Features and Prospects of Residual Fatigue Life Estimation of Welded Metal Spans of Railway Bridges

Abstract. The article presents the most used typical projects of welded metal spans operated in the railway system. The basic damages of these spans are fatigue cracks, which have a negative impact on both the strength and durability of structures. Based on the analysis of design deficiencies and technological features of welded spans fabrication, causes of the most common fractures were identified. The statistics investigation of welded spans failures over the last 20 years allowed us to estimate the dynamics of fatigue cracks and to draw a conclusion about the recent significant increase of cracks number. The method of residual fatigue life estimation of metal spans based on the hypothesis of linear summation of fatigue damages is reported. This method was developed in the 1990s by such institutes as the Siberian Transport University (NIIZhT/SGUPS), Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Paton Electric Welding Institute (IES) and All-Russian Railway Research Institute (VNIIZhT). A distinctive feature of the method is that the service life and the operating time to failure are determined among standard trains. This approach allows taking account of cargo traffic volatility in a given route throughout the entire period of maintenance of the facilities. The necessity of improving the calculation methodology of the residual operation time of welded spans is justified, which is of immediate interest due to the introduction of heavy traffic in the railway system of JSC RZHD. The unresolved issue of determining the stress-strain state of spans' elements in cracking areas is identified with the account of the fact that the facilities are operated in the tough stress state and that residual stresses arise during weld-out. The purpose and objectives of investigation into the residual fatigue life of welded metal spans are formulated.

Key words: welded spans; railway bridges; time to failure; residual fatigue life; durability.

Бокарев Сергей Александрович – профессор, доктор технических наук, проректор по научной работе СГУПС, заведующий кафедрой «Мосты» СГУПС. E-mail: BokarevSA@stu.ru

Жунев Кирилл Олегович – аспирант кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: junev.kirill@yandex.ru