

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 2 / 2023, Vol. 10, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS223.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS223 (<https://doi.org/10.15862/06SATS223>)

Усталостный ресурс унифицированных клепаных пролетных строений проектировки Трансмостпроекта при введении повышенных осевых нагрузок

Феоктистова Е.П.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Феоктистова Елена Павловна, e-mail: feok_ep@mail.ru

Аннотация. В статье приведено исследование остаточного усталостного ресурса пролетных строений при введении в обращение железнодорожных составов с повышенными осевыми нагрузками по мостам с клепаными пролетными строениями, запроектированными в пятидесятых годах прошлого века. Унифицированные металлические пролетные строения находятся более 60 лет в условиях относительно тяжелого режима работы. При длительной эксплуатации в элементах и соединениях происходят процессы, приводящие к появлению и развитию различных повреждений и отказов разной степени опасности, поэтому необходимо решать вопрос о дальнейшей эксплуатации старых пролетных строений мостов и их замене.

При определении усталостного ресурса использована гипотеза линейного суммирования накопления усталостных повреждений с учетом увеличения напряжений при введении повышенных осевых нагрузок. В качестве критической меры повреждения, обеспечивающей заданную надежность, принята величина, полученная по результатам расчетов нескольких сотен трещин в клепаных пролетных строениях более старых норм проектирования.

Учтено увеличение нагрузки от установки безбалластного мостового полотна. Для определения остаточного усталостного ресурса используются характеристики выносливости в зависимости от величины концентрации напряжений в креплениях элементов главных ферм.

Для более точного установления стадии работы заклепочных соединений автором проведен расчет износа за период эксплуатации. Введение в обращение более тяжелых поездных нагрузок приведет к увеличению накопления усталостных повреждений в элементах. В случае обнаружения при обследовании слабых заклепок в креплениях необходимо заменить их на высокопрочные болты для повышения усталостного ресурса. Автором получено, что остаточный усталостный ресурс пролетных строений проектировки Трансмостпроекта ещё не полностью исчерпан даже при введении в обращение тяжеловесных поездов с вагонной осевой нагрузкой 27–30 т.

Ключевые слова: металлические пролетные строения; грузоподъемность; долговечность; усталостные трещины; ресурс

Fatigue life of unified riveted superstructures designed by Transmostproject with the introduction of increased axle loads

Elena P. Feoktistova

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Elena P. Feoktistova, e-mail: feok_ep@mail.ru

Abstract. The article presents a study of the residual fatigue life of superstructures during the introduction of trains with increased axial loads on bridges with riveted superstructures, designed in the fifties of the last century. Unified metal superstructures have been in relatively heavy duty conditions for more than 60 years. During continuous operation, processes occur in elements and joints that lead to the appearance and development of various damages and varying degree failures of hazard, so it is necessary to decide on the further operation of old bridge spans and their replacement.

When determining the fatigue life, the linear addition hypothesis of fatigue damage accumulation was used, taking into account the increase in stresses with the introduction of increased axial loads. As a critical measure of damage, providing a given reliability, the value obtained from the calculation results of several hundred cracks in riveted superstructures of older design standards was adopted. The increase in load from the

installation of a ballastless bridge floor is taken into account. To determine the residual fatigue life, fatigue data is used depending on the concentration of stresses magnitude in the attachments of the main truss elements.

For a more accurate determination of the rivet joints operation stage, the author carried out a wear-out calculation through operation period. The introduction of heavier train loads will lead to an increase in the accumulation of fatigue damage in the elements. If weak rivets in attachments are found during inspection, they must be replaced with high-strength bolts to increase fatigue life. The author obtained that the residual fatigue life of the span structures designed by Transmostproekt has not yet been fully exhausted even with the introduction of heavy trains with a wagon axle load of 27–30 tons.

Keywords: metal superstructure; load capacity; durability; fatigue cracks; resource

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В настоящее время на сети железных дорог России еще эксплуатируются типовые клепаные пролетные строения проектировки Трансмостпроекта, запроектированные по Техническим условиям проектирования мостов ТУПМ-47¹ в 50-х годах прошлого века с расчетными пролетами от 33 до 110 м. На перспективу до 2030 года возможно дальнейшее применение тяжеловесного движения за счет использования вагонов нового поколения с повышенной нагрузкой на ось, в том числе локомотивов нового поколения. В транспортном машиностроении предполагается постепенный переход на выпуск подвижного состава с осевой нагрузкой 27 т и более. В этих условиях эксплуатации мостов необходимо выполнять оценку несущей способности и долговечности пролетных строений старых норм проектирования [1; 2].

В 1954–56 годах специализированная проектная организация Трансмостпроект разработала проекты пролетных строений под нагрузку Н8 1931 года, названные унифицированными. Для изготовления элементов главных ферм, связей и проезжей части была применена углеродистая мартеновская горячекатанная сталь Ст3 мост по ГОСТ 6713-53 и для заклепок диаметром 23 мм Ст2. По конструкции и технологии клепки такие пролетные строения наиболее совершенны по сравнению с изготовленными ранее.

В первую очередь необходимо отметить, что грузоподъемность пролетных строений по проектным нормам под нагрузку Н8 1931 г. должна соответствовать при отсутствии дефектов как минимум вагонной нагрузке интенсивностью 8 т/м. При разнице по расчетным сопротивлениям для стали Ст3 190 МПа и допускаемым напряжениям при проектировании 140 МПа (с учетом коэффициента надежности η_k в диапазоне 1,15–1,05) пролетные строения должны соответствовать вагонной нагрузке до 9,5–10,5 т/м.

Длительный период эксплуатации показал высокую надежность по выносливости таких пролетных строений, но необходимо обеспечить достаточный усталостный ресурс при введении тяжелых нагрузок, выявить и повысить безотказную работу наиболее слабых элементов.

¹ Технические условия проектирования капитального восстановления и строительства новых мостов и труб под железную дорогу нормальной колеи. (ТУПМ-47) [Текст]: Утв. 17/V 1947 г. / Министерство путей сообщения. Союзтранспроект. — Москва Трансжелдориздат, 1948. — 136 с.

Особенности конструкции

Structural feature

Для строительства и реконструкции мостов были разработаны три серии пролетных строений, объединенные общими размерами панелей, высот ферм и расстояний между осями ферм. Это позволило получить несколько более экономичные по затрате металла конструкции и в пределах каждой серии осуществить унификацию элементов. Принят одинаковый тип треугольной решетки со стойками и подвесками.²

I серия — расчетными пролетами 33, 44 и 55 м, II — 66, 77 м, III — 88, 110 м. Для случаев установки на опоры при замене существующих старых мостов была предусмотрена возможность изменения размеров двух концевых панелей. Н-образные сечения элементов главных ферм применены только в I серии при небольших пролетах. В пролетных строениях проведена унификация основных геометрических размеров и конструкций.

Сечения элементов главных ферм III серии для нижних поясов и раскосов коробчатого типа из двух клепаных ветвей, связанных планками; в элементах верхних поясов — коробчатого типа с выступающими наружу полками уголков, поверху ветви соединены горизонтальными листами, понизу планками. Стойки и подвески Н-образные. Расстояния между внутренними гранями фасонок 526 мм. Стыки поясов через 11 м, перекрыты двухсторонними накладками. Заклепочные крепления раскосов и подвесок односрезные, элементов поясов — одно- и двухсрезные. Из-за большой длины панели главных ферм — панель продольных связей назначена в 2 раза меньше.

В проезжей части продольные и поперечные балки приняты одинаковой высоты с верхней и нижней «рыбкой». Продольные балки в верхнем поясе имеют уголки и горизонтальный лист, что позволило избежать при эксплуатации «трещин-выколов». В 50-е годы прошлого века пролетные строения были утверждены министерством путей сообщения в качестве типовых и до сих пор эксплуатируются на сети железных дорог. В дальнейшем были разработаны пролетные строения со сварными заводскими соединениями и клепаными монтажными. Клепано-сварные пролетные строения в серию массово не вошли из-за появления в конце 50-х годов прошлого века более совершенного типа соединений металлоконструкций на фрикционных высокопрочных болтах.

² Протасов К.Г. Металлические мосты / Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарев С.Я., Никитин М.К. // Транспорт, — Москва, 1973. — 352 с.

Грузоподъемность

Carrying load

Клепанные пролетные строения еще продолжают эксплуатировать. В первую очередь для дальнейшей эксплуатации необходимо определить грузоподъемность. С 2015 года оценка их грузоподъемности проводится в единицах С1 [3–5]. В пролетных строениях, запроектированных под нагрузку Н8, при отсутствии дефектов и повреждений классы элементов поясов пролетных строений, раскосов и подвесок на сочетание постоянных и временной вертикальной нагрузки, как правило, не ниже класса $K = 14$ [4].

В данной статье определение грузоподъемности для элементов главных ферм пролетных строений Трансмостпроекта выполнено в соответствии с нормами.^{3,4} В таблице 1 приведены значения минимальных классов элементов главных ферм при сочетании вертикальных нагрузок с горизонтальными от ветровой и тормозной. Сравнение классов элементов с классами нагрузки показывает, что при отсутствии дефектов и повреждений пролетные строения Трансмостпроекта расчетными пролетами 33, 44, 55, 66, 77, 88, 110 м соответствуют II категории грузоподъемности, обеспечивающей пропуск вагонной нагрузки с интенсивностью 10,5 т/м.

Таблица 1 / Table 1

Сравнение наименьших классов элементов поясов главных ферм по прочности, устойчивости при сочетании вертикальных нагрузок с горизонтальными от ветровой и тормозной с классами нагрузки

Comparison of the smallest elements classes of the main trusses chords in terms of strength, stability with a combination of vertical and horizontal loads from classes load due to wind pressure and braking load

Расчетный пролет, м / Truss span, m	55	66	77	88	110
Наименьший класс / Smallest class	13,53	11,53	12,29	13,06	11,01
Класс II категории / Class II category	10,3	10,33	10,5	10,53	10,58

Составлено автором / Compiled by the author

Метод

Method

Долговечность пролетных строений, находящихся длительное время в эксплуатации, определяют не только классами элементов по

³ Руководство по пропуску подвижного состава по железнодорожным мостам: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2015 г. № 3226р. — М., 2015. — 499 с.

⁴ Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» 31 декабря 2015 г. № 3227р. — М., 2015.

выносливости, но и путем установления остаточного усталостного ресурса [6–9].

Для оценки усталостной долговечности пролетных строений Трансмостпроекта, прослуживших более 60 лет, была использована методика определения меры накопления усталостных повреждений [10]. Определена мера повреждения элементов главных ферм пролетных строений за период эксплуатации и остаточный усталостный ресурс при повышенных осевых нагрузках.

Инструкция по оценке остаточного ресурса⁵ не позволяет учитывать при оценке остаточного усталостного ресурса конкретный вид прикрепления элемента в узлах. Дифференциация обобщенной кривой усталости проведена только по видам заклепочных соединений: одно- или двухсрезные. При этом не учтена зависимость от концентрации напряжений при установлении предела выносливости, угла наклона кривой усталости (построенной в логарифмических координатах) и уровня напряжений, ниже которого не происходит накопления усталостных повреждений.

При длительной эксплуатации пролетных строений в клепаных креплениях происходят изменения, влияющие на сопротивление усталости, вследствие износа соединений и роста нагрузок. Сопротивляемость элементов с заклепочными соединениями усталостным разрушениям в основном определяется сопротивляемостью металла в зонах концентрации напряжений около отверстий. При расчете меры повреждения учтены изменения коэффициентов концентрации напряжений в креплениях элементов с учетом износа заклепочных соединений.

Рассчитан износ соединений для установления стадии работы заклепочного соединения. Под воздействием многократно повторяющихся усилий в заклепочных соединениях возникают взаимные перемещения (сдвиги) соединяемых элементов по поверхностям контакта. В зависимости от действующего усилия и сил трения на поверхностях контакта сдвиги могут возникать как по всему контакту, так и на отдельных его участках (в зонах сдвига). В результате взаимных сдвигов происходит механический износ по поверхностям контактов. Износ заклепочного соединения — повреждение металла на поверхностях контакта вследствие взаимного перемещения (сдвига) соединяемых элементов, вызывающего уменьшение их толщины. Износ приводит к снижению начального натяжения и соответственно сил трения на

⁵ Инструкция по оценке остаточного ресурса металлических (решетчатых и сплошностенчатых) пролетных строений, пролетных строений из обычного железобетона и опор железнодорожных мостов: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 04.09.2019 г № 1936/р.

поверхностях контакта, следовательно, к изменению напряженного состояния соединения.

Линейный износ на одну плоскость контакта заклепочного соединения равен [10]:

$$\Delta = pS_t k,$$

где p — нормальное давление на поверхность контакта; S_t — суммарные взаимные перемещения (сдвиги) контактирующих поверхностей; k — коэффициент линейного износа.

Размер износа при постоянной амплитуде взаимных перемещений контактирующих поверхностей практически линейно зависит от нормального давления.

В МИИТе Осиповым В.О. по специальной методике были выполнены исследования по определению k на образцах из стали марок Ст3 и М16С с заклепочными и болтовыми соединениями. Было испытано несколько серий образцов на пульсаторах при положительной температуре 15–25°C в обычной комнатной атмосфере. При испытаниях тщательно измеряли суммарные сдвиги и изменения начальных напряжений в заклепках, по которым определяли значения коэффициента k . В результате статистической обработки установлено, что распределение коэффициента линейного износа близко к нормальному, а средние значения для всех испытанных типов заклепочных соединений составляют $(2,84...4,16) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{Н}$ [10].

Для получения перемещений S_t в рассматриваемом сечении соединения, необходимо просуммировать все взаимные упругие сдвиги соединяемых элементов, возникающие в результате действия переменных усилий. С этой целью была получена информация о всей совокупности изменения напряжений в прикрепляемых элементах по их величине и уровню напряженности, зная зависимость упругих сдвигов в соединении от напряжений в элементе [10].

По осциллограммам изменения напряжений в элементе пролетного строения моста при проходе поезда, разделив весь диапазон изменения напряжений на равные интервалы (разряды), определено, сколько раз линия осциллограммы проходит каждый разряд. Число пересечений соответствует числу изменений напряжений, равных разряду, на уровне рассматриваемого разряда. Таким образом получена информация о всей совокупности изменения напряжений по их величине и уровню напряженности при проходе поезда, необходимую для определения S_t .

Эти изменения носят случайный характер. Произведя статистическую обработку достаточно большого числа осциллограмм, записанных в течение определенного времени, установлена закономерность изменения напряжений в интересующих нас элементах, т. е. получена функция плотности распределения вероятности напряжений $\varphi(\sigma)$.

Следует отметить, что для получения достаточно надежной информации необходимо диапазон изменения напряжений разбивать не менее чем на 15 разрядов, чтобы учесть сравнительно небольшие, но часто повторяющиеся изменения напряжений.

Обрабатывать статистические данные следует отдельно для пассажирских поездов, грузовых однородных и грузовых неоднородных. Как показали исследования при такой группировке нагрузок распределение хорошо согласуется с нормальным законом [10].

В зависимости от величины сдвига S_t определяется стадия работы заклепочного соединения и соответственно коэффициент концентрации напряжений. На рисунке 1 приведены величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений в прикреплениях элементов главных ферм во 2-ой и 3-ей стадии работы соединения.

В 3-ей стадии работы передача внешнего усилия происходит только через стержни заклепок на стенки отверстий, силы трения между поверхностями контакта, созданные при клепке, уже отсутствуют. Для прикреплений, работающих при преимущественном растяжении (при проверке по растяжению), в сечении по первому ряду заклепок [10]:

$$\alpha_{\sigma} = \left[\frac{\kappa_1 m'_1 \sigma'_\theta F_{\text{нт}}}{\chi_1 1000 n_3 \delta} + \alpha''_{\sigma} \left(1 - \frac{\kappa_1 n_1}{n_3} \right) \right] m_3 m_4,$$

где m'_1 — коэффициент, учитывающий эксцентричность приложения усилия к контуру отверстия (по толщине элемента): для односрезных соединений $m'_1 = 1,8$, для двухсрезных $m'_1 = 1,2$; σ'_θ — тангенциальные нормальные напряжения, МПа, на кромке заклепочного отверстия в пластине толщиной 1 см при центральном приложении к контуру отверстия нагрузки, равной 10 кН; α''_{σ} — коэффициент концентрации напряжений для кругового отверстия, свободного от нагрузки на его контуре; κ_1 — коэффициент, учитывающий долю нагрузки, приходящейся на первый ряд заклепок; δ — приведенная толщина пакета, принимается равной: в односрезных соединениях — сумме толщин листа и накладки, в двухсрезных соединениях — сумме толщин накладки и половины толщины стыкуемого листа, см; $F_{\text{нт}}$ — площадь поперечного сечения нетто прикрепляемого элемента или рассматриваемой его части, см²; n_3 — общее число заклепок, прикрепляющих элемент или

рассматриваемую его часть; n_1 — число заклепок в первом ряду всего прикрепления элемента или рассматриваемой его части; δ — толщина элемента на участке его прикрепления, см; m_3 — коэффициент, учитывающий наличие сил трения на поверхностях контакта, принимаемый равным 0,8 для новых нерасстроенных соединений и равным единице для старых соединений, имеющих признаки расстройств; m_4 — коэффициент, учитывающий долю непосредственно перекрытой части сечения, равный 0,8...1, при непосредственном перекрытии: менее 40 % — $m_4 = 1$; 40–60 % — $m_4 = 0,95$; 60–80 % — $m_4 = 0,85$; более 80 % — $m_4 = 0,8$.

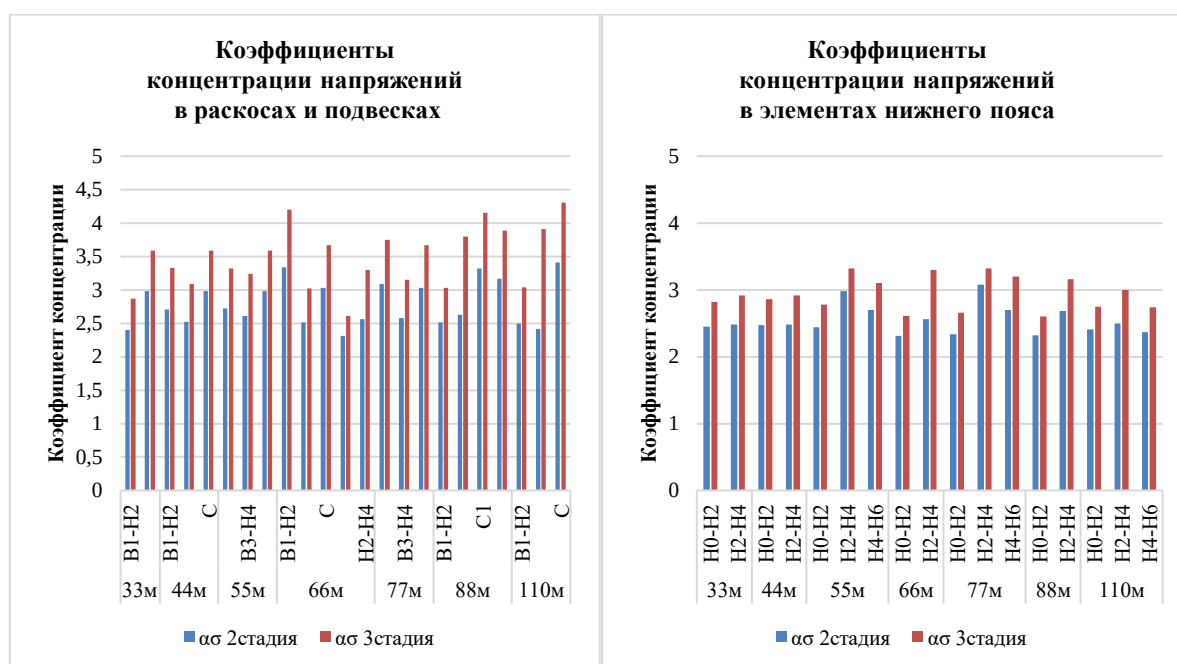


Рисунок 1. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в прикреплениях элементов пролетных строений проектировки Трансмостпроекта (составлено автором)

Figure 1. Theoretical stress concentration factors in the joints of superstructure elements of the Transmostproekt design (compiled by the author)

Мера накопления усталостных повреждений за период эксплуатации определена путем суммирования ее значений от воздействия отдельных блоков нагрузки ν_i :

$$\nu = \sum n_i \nu_i.$$

В таблице 2 представлены значения меры накопления усталостных повреждений в преимущественно растянутых раскосах и подвесках главных ферм, а в таблице 3 — в элементах нижнего пояса. Расчет меры накопления усталостных повреждений проведен по формуле [10]:

$$V = \frac{kn_o}{N_{on}\sigma_\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma^1}^{\sigma_{\max}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{on}}\right)^m \exp\left(-\frac{(\sigma - m_\sigma)^2}{2\sigma_{\sigma\sigma}^2}\right) d\sigma,$$

где k — количество прошедших по мосту поездов; n_o — число циклов от одного поезда — получены расчетно-экспериментальным путем; σ — напряжение в элементе ферм; σ^1 — напряжение, ниже которого не происходит накопления усталостных повреждений, принято равным половине предела выносливости, зависит от коэффициента концентрации напряжений.

Характеристики кривой усталости приняты:

m — котангенс угла наклона линии усталости к оси абсцисс в логарифмических координатах, в зависимости от величины коэффициента концентрации напряжений; координаты точки пересечения левых ветвей линий усталости, построенных при различных значениях коэффициентов концентрации напряжений $N_{on} = 215$, $\sigma_{on} = 575$ МПа.

Параметры режимов нагружения:

m_σ — математическое ожидание напряжений.

σ_σ — среднеквадратическое отклонение напряжений.

Вероятность безотказной работы обеспечивается соответственно при мере повреждения, меньшей $V_{on} = 0,3$, не ниже 0,98. При мере повреждения, превышающей 0,3 — возможно появление усталостных трещин с вероятностью большей 0,02 [10]. Если мера повреждения меньше 0,3, то остаточный усталостный ресурс — количество поездов, которое можно пропустить по мосту, равен:

$$N_o = \frac{V_{on} - V}{V_i}.$$

В пролетных строениях проектировки Трансмостпроекта под нагрузку Н8 мера накопления повреждений за период эксплуатации не превысила значение 0,3, обеспечивающее вероятность безотказной работы по образованию усталостных трещин в клепаных креплениях элементов главных ферм — 0,98. При введении в обращение вагонов с повышенной осевой нагрузкой скорость накопления меры повреждения возрастет, что приведет к снижению долговечности элементов пролетных строений.

Таблица 2 / Table 2

Мера повреждения в прикреплениях раскосов и подвесок главных ферм пролетных строений проектировки Трансмостпроекта 1955–58 гг.

The measure of damage in the bracing piece joints and main trusses slings of superstructures designed by Transmostproekt 1955–58

Пролет Span	Элемент Element	Мера повреждения за период эксплуатации Measure of damage over the operation period	Мера повреждения от 100 тысяч современных поездов Measure of damage from 100,000 modern trains	Мера повреждения от 100 тысяч поездов с повышенными вагонными осевыми нагрузками Measure of damage from 100 thousand trains with increased carriage axle loads	
				27 т/ось 27 t/axle	30 т/ось 30 t/axle
33 м	B1-H2	0,073	0,0064	0,0214	0,0392
	C	0,1042	0,0089	0,0258	0,0441
44 м	B1-H2	0,0612	0,0049	0,0148	0,026
	B3-H4	0,0056	0,0042	0,0134	0,0239
	C	0,1042	0,0089	0,0258	0,0441
55 м	B1-H2	0,0896	0,0057	0,0173	0,0303
	B3-H4	0,037	0,0035	0,0108	0,019
	C	0,1042	0,0089	0,0258	0,0441
66 м	B1-H2	0,0734	0,0059	0,0156	0,0254
	B3-H4	0,0814	0,0067	0,0216	0,039
	C	0,0982	0,0075	0,0215	0,0364
77 м	B1-H2	0,0891	0,008	0,0226	0,038
	B3-H4	0,0704	0,0065	0,0204	0,0363
	C	0,0982	0,0075	0,0215	0,0364
88 м	B1-H2	0,0608	0,005	0,0161	0,0291
	B3-H4	0,0996	0,0121	0,0339	0,0569
	C1	0,1172	0,0104	0,0287	0,0478
	C3	0,132	0,0099	0,0352	0,0666
110 м	B1-H2	0,0356	0,0032	0,0103	0,0185
	B3-H4	0,04	0,0037	0,0102	0,0169
	C	0,1172	0,0104	0,0271	0,0439

Составлено автором / Compiled by the author

Металлические пролетные строения, находящиеся длительное время в эксплуатации, требуют осуществления постоянного мониторинга состояния конструкций [11–13], тем более при повышении осевых нагрузок.

Вопрос об усилении или замене старых клепаных пролетных строений и пригодности для дальнейшей эксплуатации в условиях увеличения вагонных осевых нагрузок должен решаться на основании учета многих факторов [14].

Для повышения усталостной долговечности элементов наиболее простым способом является превращение заклепочных соединений в клепано-болтовые путем замены заклепок в наиболее напряженных крайних рядах (2–3-х) высокопрочными болтами.

При этом происходит резкое снижение концентрации напряжений около отверстий, в которые вместо заклепок поставлены высокопрочные болты, поэтому значительно замедлится процесс накопления усталостных повреждений [15].

Таблица 3 / Table 3

Мера повреждения в стыках элементов нижнего пояса главных ферм пролетных строений проектировки Трансмостпроекта 1955–58 гг.

The measure of damage at the elements clinch of the main trusses lower chord of superstructures designed by Transmostproekt 1955–58

Пролет Span	Элемент Element	Мера повреждения за период эксплуатации Measure of damage over the operation period	Мера повреждения от 100 тысяч современных поездов Measure of damage from 100,000 modern trains	Мера повреждения от 100 тысяч поездов с повышенными вагонными осевыми нагрузками Measure of damage from 100 thousand trains with increased carriage axle loads	
				27 т/ось 27 t/axle	30 т/ось 30 t/axle
33 м	H0-H2	0,0134	0,0011	0,0037	0,0068
	H2-H4	0,0360	0,0034	0,0112	0,0171
44 м	H0-H2	0,0052	0,0007	0,0023	0,0043
	H2-H4	0,0468	0,0059	0,0195	0,0473
55 м	H0-H2	0,0178	0,0015	0,0051	0,0095
	H2-H4	0,0504	0,0058	0,0176	0,0309
	H4-H6	0,0574	0,0065	0,0207	0,0369
66 м	С	0,0982	0,0075	0,0215	0,0364
	H0-H2	0,0108	0,0012	0,0043	0,0081
	H2-H4	0,0538	0,0048	0,0146	0,0257
77 м	H0-H2	0,0132	0,0011	0,0039	0,0072
	H2-H4	0,0460	0,0041	0,0125	0,0218
	H4-H6	0,0606	0,0062	0,0193	0,0342
88 м	H0-H2	0,0080	0,0009	0,0028	0,0050
	H2-H4	0,0162	0,0015	0,0040	0,0065
110 м	H0-H2	0,0112	0,0009	0,0031	0,0057
	H2-H4	0,0144	0,0032	0,0104	0,0188
	H4-H6	0,0452	0,0044	0,0151	0,0282

Составлено автором / Compiled by the author

Результаты

Results

По расчетам меры повреждений элементов получены значения остаточного усталостного ресурса при повышенных осевых нагрузках 27 т и 30 т для преимущественно растянутых элементов главных ферм.

В таблице 4 приведен остаточный усталостный ресурс для прикреплений наиболее слабых по выносливости элементов главных ферм: преимущественно растянутых раскосов, подвесок.

У элементов нижнего пояса величина рассчитанного усталостного остаточного ресурса составила более 1 100 тысяч поездов при осевой нагрузке 27 т и более 700 тысяч поездов — при 30 т.

Таблица 4 / Table 4

Остаточный усталостный ресурс креплений элементов главных ферм пролетных строений проектировки Трансмостпроекта 1955–58 гг.

**Residual fatigue life of joints of main trusses elements
of superstructures designed by Transmostproekt 1955–58**

Пролет Span	Элемент Element	Мера повреждения за период эксплуатации Measure of damage over the operation period	Остаточный усталостный ресурс при обращении современных поездов, тысяч поездов Residual fatigue life during the circulation of modern trains, thousand trains	Остаточный усталостный ресурс при обращении перспективных поездов с повышенными осевыми нагрузками Residual fatigue life when handling promising trains with increased axle loads	
				27 т/ось 27 t/axle	30 т/ось 30 t/axle
33 м	B1-H2 C	0,0730	3 547	1 062	580
		0,1042	2 200	759	444
44 м	B1-H2	0,0612	4 873	1 608	918
	B3-H4	0,0056	7 010	2 204	1 230
	C	0,1042	2 200	759	444
55 м	B1-H2	0,0896	3 691	1 214	694
	B3-H4	0,0370	7 514	2 432	1 381
66 м	C	0,1042	2 200	759	444
	B1-H2	0,0734	3 841	1 455	891
	B3-H4	0,0814	3 263	1 010	561
	C	0,0982	2 691	941	555
77 м	B1-H2	0,0891	2 636	935	555
	B3-H4	0,0704	3 532	1 125	632
	C	0,0982	2 691	941	555
88 м	B1-H2	0,0608	4 784	1 486	823
	B3-H4	0,0996	1 656	591	352
	C1	0,1172	1 758	637	382
	C3	0,1320	1 697	477	252
110 м	B1-H2	0,0356	8 263	2 566	1 427
	B3-H4	0,0400	7 027	2 555	1 534
	C	0,1172	1 758	673	417

Составлено автором / Compiled by the author

Заключение

Conclusion

Определение долговечности клепаных пролетных строений проектировки Трансмостпроекта 50-х годов показало, что при повышении осевых вагонных нагрузок до 30 т (при увеличении веса поезда на 36 % той же длины) остаточный усталостный ресурс снизится в 4,5–6,7 раз по сравнению с обычными нагрузками, составит в подвесках и раскосах менее 300–400 тысяч поездов. При повышении осевой вагонной нагрузки до 27 т снизится в 2,6–3,4 раза, составит менее 500–600 тысяч поездов.

При введении в обращение составов с повышенными осевыми нагрузками будет необходимо провести усиление креплений элементов, имеющих недостаточный остаточный усталостный ресурс, путем замены двух рядов заклепок на высокопрочные болты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бокарев, С.А.** Обеспечение пропуска тяжеловесных поездов по металлическим мостам / С.А. Бокарев, А.М. Усольцев, К.О. Жунев // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 4. — С. 26–28. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37281378>. — EDN ZCRFTF (дата обращения: 18.05.2023).
2. **Васильков, А.С.** Нормативная нагрузка для проектирования железнодорожных мостов / А.С. Васильков, И.В. Рупасова, В.В. Кондратов // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 2. — С. 7–12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44717329>. — EDN LKTDGT (дата обращения: 18.05.2023).
3. **Бокарев, С.А.** Совершенствование методики оценки грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов / С.А. Бокарев, А.А. Ращепкин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2006. — № 2. — С. 177–186. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11612383>. — EDN JUCYVD (дата обращения: 18.05.2023).
4. **Кондратов, В.В.** Оценка грузоподъемности стальных решетчатых пролетных строений / В.В. Кондратов, И.В. Рупасова // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 9. — С. 10–14. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39822847>. — EDN RJXGTN (дата обращения: 18.05.2023).
5. **Быкова, Н.М.** Развитие методики оценки грузоподъемности мостов с использованием мобильных автоматизированных систем мониторинга / Н.М. Быкова, Т.М. Баранов, Е.О. Толстиков. — DOI <https://doi.org/10.15862/01TS415> // Транспортные сооружения. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 01TS415. — URL: <https://t-s.today/01TS415.html>. — EDN WHWRTH (дата обращения: 02.06.2023).
6. **Кондратов, В.В.** Оценка минимальных повреждающих напряжений при циклическом нагружении стальных клепаных пролетных строений мостов / В.В. Кондратов, И.В. Рупасова // Путь и путевое хозяйство. — 2020. — № 12. — С. 18–22. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44351022>. — EDN AZOWIW (дата обращения: 18.05.2023).
7. **Кондратов, В.В.** Результаты испытаний на выносливость металла пролетных строений / В.В. Кондратов, В.М. Олеков, Е.И. Румянцев // Путь и путевое хозяйство. — 2020. — № 10. — С. 22–26. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44018942>. — EDN JPIURB (дата обращения: 18.05.2023).
8. **Картопольцев, В.М.** Концептуальные основы оценки остаточного ресурса пролетных строений металлических мостов по критерию усталостной долговечности / В.М. Картопольцев, А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2015. — № 4. — С. 206–211. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23918416>. — EDN UDKOST (дата обращения: 02.06.2023).
9. **Картопольцев, В.М.** Оценка остаточного ресурса конструкций металлических мостов по критерию трещинообразования / В.М. Картопольцев, А.Г. Боровиков, А.В. Картопольцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2015. — № 2. — С. 176–183. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23235135>. — EDN TOLVAJ (дата обращения: 02.06.2023).
10. **Осипов, В.О.** Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых мостов / В.О. Осипов. — М.: Транспорт, 1983. — 287 с.
11. **Бокарев, С.А.** Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий / С.А. Бокарев. — Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2002. — 276 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34979545>. — EDN UPVIFU (дата обращения: 02.06.2023).

12. **Баранов, Т.М.** Оценка фактической работы пролетного строения железнодорожного моста с использованием мобильной системы мониторинга / Т.М. Баранов, Е.О. Толстиков. — DOI <https://doi.org/10.15862/12SATS418> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 4. — С. 12SATS418. — URL: <https://t-s.today/12SATS418.html>. — EDN YURQXZ (дата обращения: 02.06.2023).
13. **Соловьев, Л.Ю.** Экспериментальные исследования процессов диссипации энергии в вершинах усталостных трещин в элементах мостовых конструкций / Л.Ю. Соловьев, В.А. Федоренко. — DOI <https://doi.org/10.15862/04SATS321> // Транспортные сооружения. — 2021. — Т 8. — № 3. — С. 04SATS321. — URL: <https://t-s.today/04SATS321.html>. — EDN XVYDFY (дата обращения: 02.06.2023).
14. **Феоктистова, Е.П.** Метод установления очередности замены металлических пролетных строений мостов с использованием прочностных, экономических и эксплуатационных критериев / Е.П. Феоктистова. — DOI <https://doi.org/10.15862/03SATS421> // Транспортные сооружения. — 2021. — Т 8. — № 4. — С. 03SATS421. — URL: <https://t-s.today/03SATS421.html>. — EDN IFN0NY (дата обращения: 02.06.2023).
15. **Круглов, В.М.** Методика оценки и способы повышения усталостного ресурса типовых пролетных строений Гипротранса / В.М. Круглов, В.О. Осипов, Е.П. Феоктистова // Транспортное строительство. — 2008. — № 7. — С. 11–15. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23179670>. — EDN TNGGNNR (дата обращения: 02.06.2023).

Сведения об авторах:

Феоктистова Елена Павловна — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия,
e-mail: feok_ep@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-5372>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1056732

Статья получена: 24.05.2023. Принята к публикации: 14.08.2023. Опубликовано онлайн: 28.08.2023.

REFERENCES

1. Bokarev S., Usol'tsev A., Zhunev K. Providing of Heavy Trains Handling on Metal Bridges. *Railway Track and Facilities*. 2019; (4): 26–28. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37281378> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Vasil'kov A., Rupasova I., Kondratov V. Normative Load For Design of Railway Bridges. *Railway Track and Facilities*. 2021; (2): 7–12. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44717329> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Bokarev S.A., Rashepkin A.A. Improvement of Estimation Technique of Carrying Capacity of Railway Bridge Span Structures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2006; (2): 177–186. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11612383> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Kondratov V., Rupasova I. Assessment of The Load Capacity of Steel Lattice Spans. *Railway Track and Facilities*. 2019; (9): 10–14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39822847> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Bykova N.M., Baranov T.M., Tolstikov E.O. Development of the methodology for assessing the carrying capacity of bridges using mobile automated monitoring systems. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2015; 2(4): 01TS415. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/01TS415>.
6. Kondratov V., Rupasova I. Estimation of Minimal Damaging Stresses Under Cyclic Loading of Steel Riveted Bridge Spans. *Railway Track and Facilities*. 2020; (12): 18–22. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44351022> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Kondratov V., Olekov V., Rumyantsev Y. Results of Metal Endurance Tests of Bridge Spans That Have Been in Operation. *Railway Track and Facilities*. 2020; (10): 22–26. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44018942> (accessed 18th May 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

8. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Conceptual Framework of Tatigue Life Criterion Assessment of Steel Bridges Residual Life. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (4): 206–211. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23918416> (accessed 2nd June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Kartopoltsev V.M., Borovikov A.G., Kartopoltsev A.V. Residual Life of Metal Bridge Structures Estimated by Crack Formation. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (2): 176–183. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23235135> (accessed 2nd June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Osipov V.O. Dolgovechnost' metallicheskih proletrykh stroyeniy ekspluatiruyemykh mostov [Durability of metal superstructures of operated bridges]. Moscow: Transport; 1983. (In Russ.).
11. Bokarev S.A. [Management of the technical condition of artificial structures of Russian railways based on new information technologies]. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2002. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34979545> (accessed 2nd June 2023). (In Russ.).
12. Baranov T.M., Tolstikov E.O. The actual operation assessment of the railway bridge superstructure using a mobile monitoring system. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(4): 12SATS418. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/12SATS418>.
13. Solovyev L.Yu., Fedorenko V.A. Experimental studies of the energy dissipation processes at the tops of fatigue cracks in the elements of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; 8(3): 04SATS321. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/04SATS321>.
14. Feoktistova E.P. Determination method for metal bridge superstructure replacement priority using strength, economic and operational criteria. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; 8(4): 03SATS421. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS421>.
15. Kruglov V.M., Osipov V.O., Feoktistova Ye.P. Method to Assess and Ways to Increase the Fatigue Resource of Giprotans Standard Spans. *Transport construction*. 2008; (7): 11–15. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23179670> (accessed 2nd June 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Elena P. Feoktistova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: feok_ep@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-5372>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1056732

Submitted: 24th May 2023. Revised: 14th August 2023. Published online: 28th August 2023.