

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

МИХЕЕВ Г.В., ЛЫСИКОВ Н.Н., ПОГОРЕЛОВ Д.Ю., КРУГОВОВА Е.А.,
КИРЬЯН В.И., МАЛЬГИН М.Г.

CALCULATION OF DYNAMIC LOADING AND DURABILITY OF RAILWAY BRIDGES BY COMPUTER SIMULATION

MIKHEEV G.V., LYSIKOV N.N., POGORELOV D.Y., KRUGOVOVA E.A.,
KIRYAN V.I., MALGIN M.G.

Предложена методика расчета динамической нагруженности и усталостной долговечности железнодорожных мостов на основе компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм». Показано, что применение скорректированной линейной модели накопления усталостных повреждений в сварных соединениях приводит к результатам, которые хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Представлена оценка влияния качества сварных швов, неровностей пути и некоторых других факторов на результаты расчета.

Ключевые слова: компьютерное моделирование динамики, железнодорожный мост, усталостная долговечность.

Постановка проблемы. Анализ существующих методов оценки усталостной долговечности железнодорожных мостов показал, что отечественные методики, разработанные в восьмидесятых годах двадцатого века, основываются на оценке нагруженности мостов путем построения силовых эпюр для плоских ферменных конструкций [1]. При этом динамическая составляющая нагрузки учитывается поправочными коэффициентами. Подобный подход не позволяет оценить характеристики динамической нагруженности моста, а также их влияние на результат расчета долговечности.

Современные тенденции к увеличению скоростей движения и возрастанию нагрузки на ось приводят к необходимости уточненной оценки усталостной прочности мостовых сооружений в новых условиях эксплуатации. Компьютерное моделирование является эффективным методом решения подобных задач.

В настоящее время динамика упругих тел под действием подвижной нагрузки моделируется в программах метода конечных элементов (МКЭ). Однако подвижная нагрузка при этом представляется в виде постоянной силы или задана функцией времени и не учитывает динамику системы, реализующей эту нагрузку. Поскольку масса грузового поезда, прохо-

дящего по мосту, соизмерима с массой пролетного строения, пренебрежение динамикой поезда может существенно исказить реальную картину эксплуатационной нагруженности моста.

Для исследования совместной динамики упругого железнодорожного моста и проходящего по нему поезда в публикациях предлагаются упрощенные модели, которые не учитывают многие динамические эффекты и не могут быть непосредственно использованы для расчета напряженно-деформированного состояния моста [2, 3]. Подобные задачи могут быть решены более эффективно с использованием методов динамики систем тел.

Один из таких подходов разработан и реализован авторами в программном комплексе «Универсальный механизм» [4]. Уравнения движения моста выводятся с применением МКЭ и модального анализа. Методика создания совместных моделей и проверка их адекватности на основе сравнения с экспериментальными данными и результатами расчета в специализированной программе расчета динамики мостов MIDAS приведены в [5].

С целью повышения быстродействия в 2012 году был разработан и реализован на многоядерных процессорах алгоритм параллельных расчетов при моделировании движения поездов по упругим мостам. При использовании трех вычислительных потоков продолжительность одного численного эксперимента сократилась более чем в два раза.

Использование упомянутых моделей и алгоритмов позволило эффективно анализировать усталостную долговечность железнодорожных мостов. Динамические напряжения в элементах конструкций, необходимые для такого исследования, рассчитываются с учетом взаимного влияния динамики поезда и моста. Решение задачи в данной постановке в публикациях не обнаружено.

Методика анализа усталостной долговечности железнодорожных мостов. Записи процессов изменения НДС моста, полученные в ходе компью-

терного моделирования, не могут быть напрямую использованы в качестве исходных данных для отечественных методик оценки срока службы мостовых сооружений. Поэтому при разработке методики основной упор был сделан на применение общемашиностроительных подходов к оценке усталостной долговечности сварных швов [4, 5]. Данные соединения широко применяются в мостовых конструкциях и являются одним из основных источников развития усталостных трещин.

Результатом обобщения рассмотренных документов, а также собственного опыта в области исследований усталостной долговечности транспортных машин стала методика расчета эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности мостов, основанная на использовании результатов численного моделирования совместной динамики механической системы «мост–поезд» в программном комплексе «Универсальный Механизм».

Предлагаемая методика включает следующие основные этапы.

1. Анализ условий эксплуатации моста; выделение частных режимов нагружения, набор которых может быть использован для качественной и количественной оценки нагруженности и усталостной долговечности конструкции; оценка относительных долей выделенных режимов за единицу срока службы.

2. Создание совместных динамических моделей системы «мост–поезд», соответствующих выделенным частным режимам эксплуатации.

3. Выполнение численных экспериментов, моделирующих частные режимы эксплуатации.

4. Расчет характеристик эксплуатационной нагруженности мостового сооружения по результатам моделирования, включающий выбор номинальных напряжений, расчет максимальных значений напряжений, действующих в узлах конечно-элементной схемы моста, а также характеристик циклического нагружения: распределений максимальных амплитуд и средних значений циклов, числа циклов нагружения.

5. Предварительный выбор опасных зон – элементов конструкции, подверженных риску возникновения усталостных трещин – на основании анализа динамической нагруженности моста с учетом его конструктивных и технологических особенностей.

6. Определение свойств сопротивления усталости каждой из выбранных опасных зон, а также выбор датчиков (узлов конечно-элементной схемы), пригодных для оценки их нагруженности.

7. Расчет усталостной долговечности каждой из опасных зон для частных режимов эксплуатации, а также их комбинации, наиболее близко соответствующей реальным условиям работы конструкции.

8. Анализ результатов расчета, оценка срока службы сооружения, выделение наиболее опасных с точки зрения возникновения усталостных трещин элементов конструкции и наиболее повреждающих режимов эксплуатации.

Применение предлагаемой методики продемонстрируем на примере исследования усталостной долговечности металлического моста, для которого имеются экспериментальные данные.

Объект исследования. В качестве объекта исследования был выбран одноколейный с ездой понизу металлический железнодорожный мост через реку Ворскла на 333-ем километре линии Киев–Харьков, сооруженный по схеме $3 \times 55,0$ м (Рис. 1). Пролетные строения – металлические болтосварные с параллельными поясами с ездой понизу – рассчитаны под нагрузку С14 и изготовлены из стали 15ХСНД по типовому проекту ГипроТрансМоста (инв. № 690). Пролетные строения были установлены на опоры в 1979 году.



Рис. 1. Объект исследований – одноколейный металлический железнодорожный мост через реку Ворскла на 333-ем километре линии Киев – Харьков.

Усталостные трещины начали проявляться в вертикальных стенках сварных продольных балок проезжей части пролетных строений по очертанию концов сварных швов прикрепления вертикальных ребер жесткости [8] уже в первые годы эксплуатации. В настоящее время число трещин на всех пролетных строениях моста достигло семидесяти. Отдельные трещины прекратили развитие, другие продолжают развиваться, появляются новые трещины.

В целом, по данным организаций, осуществляющих контроль мостов, до появления трещин достаточных размеров, для того чтобы их можно было выявить визуально, проходит от четырех до семи лет. В некоторых случаях на участках с большой грузонапряженностью трещины наблюдаются в первые годы эксплуатации и, зачастую, в таких элементах и сварных соединениях, в которых не ожидали их появления и, соответственно, не учитывали в прочностных расчетах.

Анализ условий эксплуатации моста. При практическом применении методики оценки усталостной долговечности мостов подробная информация о среднесуточном количестве пропускаемых составов, их типах и скоростях движения может быть получена от соответствующего подразделения железной дороги.

Для проведения пробного расчета указанную информацию получить не удалось. Вследствие этого были приняты следующие допущения.

- Интенсивность движения: 100 грузовых поездов в сутки.
- Тип поездов: состав из двухсекционного локомотива ВЛ80 и 30 грузовых вагонов.
- Скорости движения: 70, 80, 90, 100 км/ч.

Исходя из указанных допущений, выделены четыре частных режима, соответствующих движению по мосту грузового состава с четырьмя различными скоростями. Относительные доли частных режимов оценивались на основании данных о распределении скоростей движения грузовых составов, приведенных в нормах вагоностроения [9]: 70 км/ч – 29,4%; 80 км/ч – 36,8%; 90 км/ч – 30,9%; 100 км/ч – 2,9%.

Продольные нагрузки от торможения или силы тяги, ветровая и ледовая нагрузки, а также температурные климатические воздействия на конструкцию моста в рамках данного исследования не рассматривались.

Создание динамических моделей. Конечно-элементная модель мостового пролета (рис. 2), включает 12 633 узла, 12 852 конечных элементов оболочек и балок. Для анализа напряжений, возникающих при проезде поезда, несущие и поперечные балки были представлены пластинами. Верхнее пролетное строение и шпалы моделировались стержневыми элементами. Каждая шпала крепится к мосту посредством двух лапчатых болтов. При разработке конечно-элементной схемы лапчатый болт моделировался жесткой связью.

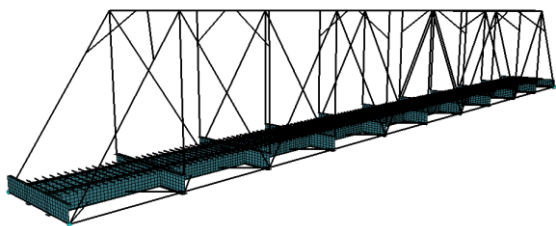


Рис. 2. Конечно-элементная модель моста.

Динамическая модель моста включает сто собственных и двадцать четыре статические формы.

Модель грузового состава. В соответствии с рекомендациями ЛИИЖТ (в настоящее время – Петербургский государственный университет путей сообщения), разработанными совместно с ВНИИЖТ, в рамках исследования использовалась эталонная модель грузового состава, состоящая из двухсекционного грузового магистрального электропоезда ВЛ80 и тридцати четырехосных грузовых вагонов с осевым давлением 25 тс (245 кН). В ходе численных экспериментов использовалась динамическая пространственная твердотельная модель грузового состава, включающая 670 тел (рис. 3).

Компьютерное моделирование движения поезда по мосту проводилось с учетом путевых неровностей, соответствующих пути хорошего содержания [8], а также для идеально ровного пути.

Анализ результатов оценки эксплуатационной нагруженности. Поскольку пролет моста симметричен относительно продольной и центральной поперечной плоскости расчет НДС проводился только для четверти конечно-элементной модели.

В соответствии с общепринятым подходом к оценке нагруженности использовалось приведение сложного напряженно-деформированного состояния элементов моста к одноосному. В качестве номинального напряжения для оценки прочности сварных соединений принимались: эквивалентное напряжение по IV теории прочности (фон Мизеса) и первое главное напряжение. Полученные графики номинальных напряжений в узлах конечно-элементной сетки моста схематизировались методом «дождя». При этом фиксировалось число циклов нагружения, распределения амплитуд и средних значений циклов, а также максимальные уровни номинальных напряжений во всех рассматриваемых узлах конечно-элементной схемы для каждого из частных режимов эксплуатации.

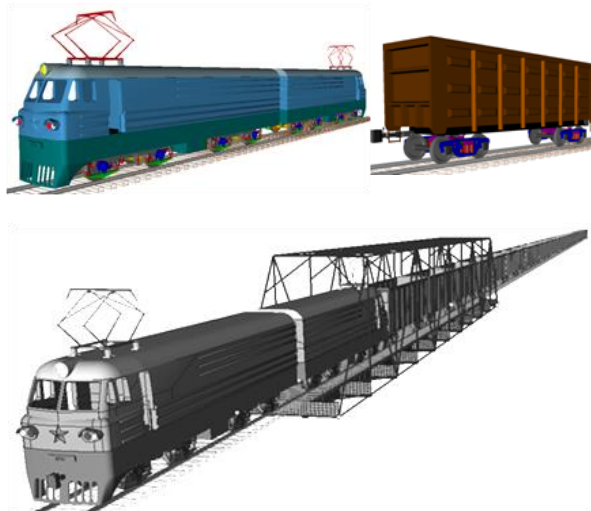


Рис. 3. Динамическая модель эталонного грузового состава для моделирования совместной динамики механической системы «мост–поезд».

Процесс изменения НДС элементов моста при проходе грузового состава характеризуется наличием одного полуцикла нагружения высокой амплитуды, соответствующего деформации моста под весом состава, а также последовательностью циклов малой амплитуды от прохождения колесных пар/тележек состава (см. рис. 4).

Сравнение результатов, полученных с учетом и без учета путевых неровностей (уровень, просадки, рихтовка), показало малое влияние данного параметра на картину распределения максимальных напряжений и амплитуд циклов нагружения. Величина максимальных напряжений, действующих в элементах конструкции, увеличивается незначительно (менее 4%). В то же время, колебания моста, возникающие за счет неровностей рельсовых нитей, приводят к примерно двукратному увеличению амплитуд колебаний, не связанных с деформацией моста под весом состава. Число циклов нагружений за один проезд состава по мосту увеличивается при этом примерно в полтора раза (рис. 4).

Анализ результатов численных экспериментов показал, что скорость движения в выбранном диапазоне [70..100] км/ч не оказывает существенного вли-

яния на уровень максимальных напряжений (менее 4%) и амплитуд циклов нагружения (менее 5%).

Наиболее нагруженным элементом моста является нижний пояс главных балок в зонах соединения с поперечинами и вертикальными усиливающими ребрами. Для данных зон были зафиксированы максимальные значения напряжений и амплитуд циклов нагружения. При этом наиболее нагруженными элементами оказались зоны соединения с крайними поперечинами – зоны передачи усилия с верхнего силового пояса фермы (см. рис. 5). Максимальная величина первого главного напряжения в узлах конечно-элементной схемы нижнего пояса при движении грузового состава составила 71,7 МПа; максимальная амплитуда цикла напряжений – 29,5 МПа.

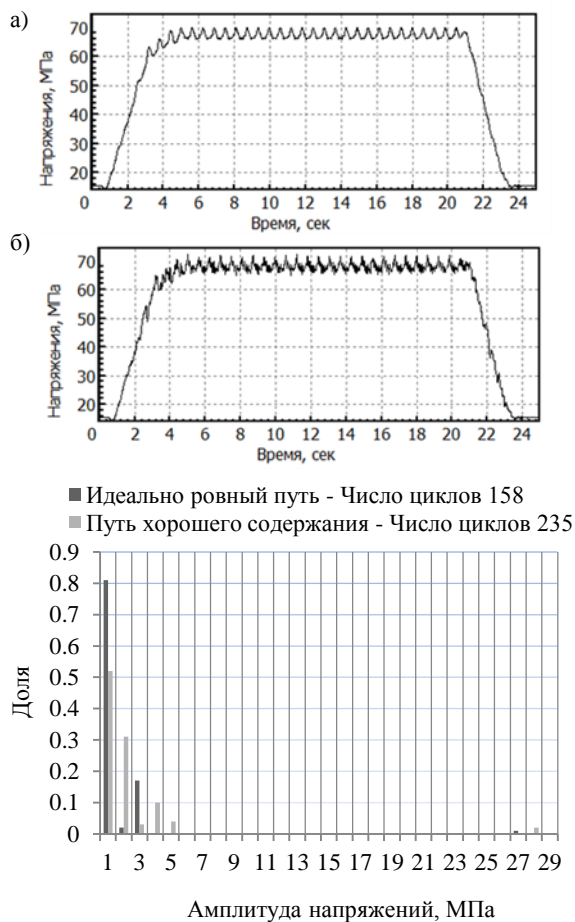


Рис.4. Пример графиков и гистограммы распределения амплитуд напряжений в нижнем поясе моста при прохождении поезда: (а) – для идеально ровного пути, (б) – для пути хорошего содержания.

Опыт эксплуатации сварных железнодорожных мостов, обобщенный ЛИИЖТ [8], подтверждает возникновение усталостных трещин в указанных зонах уже в первые годы эксплуатации. Анализ прочих опасных зон в верхнем поясе и соединениях с вертикальными элементами в рамках данного исследования не проводился.

Указанные зоны были выбраны для дальнейшего исследования усталостной долговечности. Для замера номинальных напряжений в исследуемых зонах использовались узлы конечно-элементной

сетки горизонтальной пластины нижнего пояса главной балки.

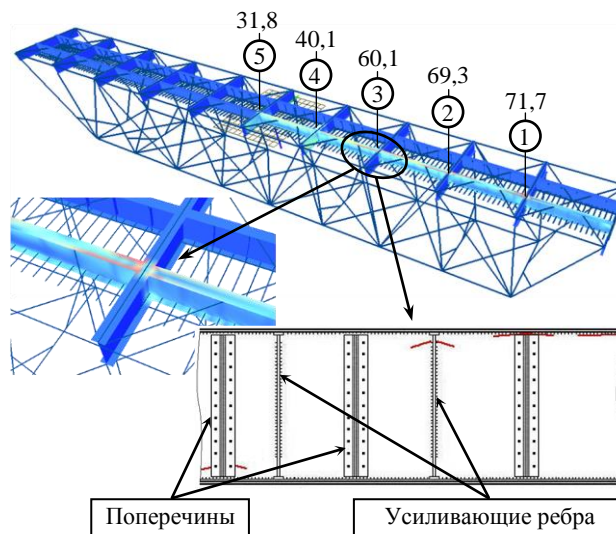


Схема выявляемых усталостных трещин соединений главной балки (по данным ЛИИЖТ, 1990 г)

Рис.5. Схема расположения наиболее нагруженных элементов конструкции моста по результатам анализа эксплуатационной нагруженности: распределение максимальных напряжений (МПа), схема расположения выявляемых трещин на главных балках моста.

Оценка свойств сопротивления усталости выделенных зон производилась на основании справочных данных, приведенных в отечественных и зарубежных методиках расчета сварных соединений [4, 5], а также экспериментальных данных, полученных сотрудниками института электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины.

Оценка свойств сопротивления усталости в соответствии с РД 50-694-90 [6].

Характеристики сопротивления усталости сварных соединений и элементов конструкции определяются по вероятности отказа P и включают параметры распределения предела выносливости (медианный предел выносливости $\bar{\sigma}_R$ и его среднеквадратическое отклонение S_{σ_R}) и параметры A_R, B_R уравнения медианной (соответствующей вероятности отказа 50%) кривой усталости вида:

$$\sigma = \bar{\sigma}_R \cdot e^{\frac{A_R}{N+B_R}}$$

В соответствии с используемой классификацией сварных соединений по конструктивно-технологическим признакам рассматриваемые узлы можно отнести к четвертому классу.

Подкласс 4а соответствует качественным угловым сварным соединениям с полным проваром; подкласс 5а – соединениям с неполным проваром, отвечающим техническим условиям на изготовление металлических конструкций.

Таблица 1.

Свойства сопротивления усталости для выбранных типов сварных соединений

Методика	Класс сварного соединения	$\sigma_{-1}^{50\%}$, МПа	$S_{\sigma-1}$, МПа	$\sigma_{-1}^{5\%}$, МПа	m_1	m_2	$A_{-1}, \times 10^5$	$B_{-1}, \times 10^5$	N_0
<i>Расчетные характеристики</i>									
РД-50-694-90 [2]	4а	45	10	28,55	-	-	6,6	4,8	-
	5а	35	8	21,84	-	-	10,0	6,0	-
ПВФР [3]	FAT 100	-	-	22,451	3	22	-	-	10^7
	FAT 80	-	-	18,061	3	22	-	-	10^7
<i>Экспериментальные и экспериментально-теоретические данные</i>									
Вариант №1	-	-	-	23,0	2,965	-	-	-	10^7
Вариант №2	-	-	-	17,1	3,003	25,645	-	-	10^7

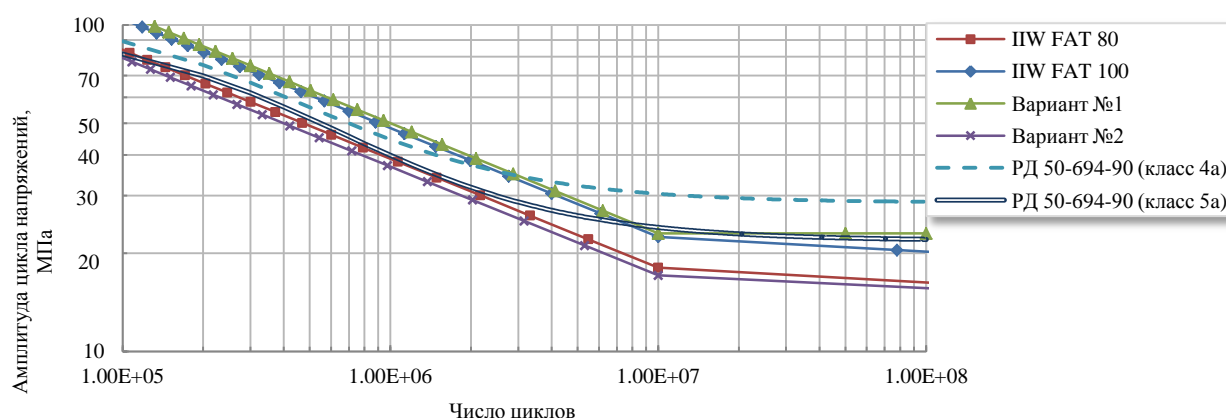


Рис. 8. Кривые усталости, соответствующие расчетным и экспериментальным характеристикам сопротивления усталости сварных элементов моста (в двойном логарифмическом масштабе).

Оценка свойств сопротивления усталости в соответствии с рекомендациями Международным Институтом Сварки (IIW) [7]. По классификации, предложенной IIW, рассматриваемые зоны моста можно отнести к классам FAT 100 либо FAT 80. Класс FAT 100 рекомендован для швов с полным проваром, выполненных автоматической сваркой; FAT 80 – для поперечных двусторонних швов без дополнительной обработки.

Кривая усталости включает два участка, соответствующих степенным уравнениям с показателями m_1 , m_2 , что позволяет учесть накопление усталостных повреждений при нагружении с амплитудами ниже предела выносливости.

$$N(P, \sigma) = \begin{cases} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}(P)} \right)^{m_1} \cdot N_0, N \leq N_0 \\ \left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}(P)} \right)^{m_2} \cdot N_0, N > N_0 \end{cases}$$

Нормы IIW предусматривают использование при оценке усталостной долговечности сварных конструкций коэффициента безопасности, значение которого для мостовых сооружений может быть принято равным 1,3.

Экспериментальные и экспериментально-теоретические данные. В результате экспериментальных исследований сотрудниками института Патона были построены кривые усталости мостовых сварных соединений данной конфигурации (тавро-

вые образцы с толщинами пластин и ребер от 10 до 24 мм), изготовленных из материала моста (сталь 15ХСНД низколегированная конструкционная для сварных работ).

Экспериментальные данные, полученные по методике, применявшейся для РД 50-694-90, обозначены далее как *Вариант №1*. Для описания характеристик сопротивления усталости используется степенная модель для 95% вероятности безотказной работы при базовом числе циклов 10^7 .

Экспериментально-теоретические данные, полученные с учетом исследовательских наработок института Патона, обозначены далее как *Вариант №2*. В отличие от *Варианта №1* степенная модель кривой усталости включает два участка.

Параметры различных кривых, использованных для задания свойств сопротивления усталости опасных зон мостового пролета, приведены в табл. 1 и рис. 8.

Очевидно, что нехватка достоверных данных о свойствах сопротивления усталости объекта исследования является слабым местом любой из существующих расчетных методик оценки усталостной долговечности конструкций.

В рамках исследования оценка усталостной долговечности моста проводилась для двух вариантов исполнения сварных швов: для качественного исполнения использовались FAT 100 (IIW) и *Вариант №1*; для швов низкого качества – данные 4а (РД-50-694-90), FAT 80 (IIW) и *Вариант №2*.

Расчет усталостной долговечности.

Модель накопления усталостных повреждений.

Для анализа усталостной долговечности мостового пролета использовалась классическая линейная модель накопления усталостных повреждений (ЛМНП, модель Палмгрена-Майнера), а также скорректированная линейная модель (КЛМНП). Принципиальным различием двух моделей является способ определения предельной величины накопленных усталостных повреждений (a_p), соответствующей возникновению усталостной макротрещины.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = a_p,$$

где n_i – число циклов нагружения, соответствующее i -ому уровню амплитуды напряжений; N_i – предельное число циклов при действии циклических напряжений i -ого уровня.

Линейная модель накопления усталостных повреждений (ЛМНП) устанавливает величину предельного повреждения равной единице ($a_p = 1$).

Скорректированная линейная модель (КЛМНП) предполагает более детальный учет характеристик процесса нагружения. Согласно методике ПВ для типовых сварных соединений предельная величина накопленных повреждений может приниматься равной 0,5. Согласно РД 50-694-90, данная величина может быть вычислена по формуле:

$$a_p = \frac{\sigma_{a_{\max}} \cdot \xi - 0,5 \cdot \sigma_{-1}}{\sigma_{a_{\max}} - 0,5 \cdot \sigma_{-1}} \geq 0,1,$$

$$\xi = \sum_{i=1}^{k_1} \frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{\max}}} \cdot \frac{n_i}{n^*} \geq 0,1$$

где $\sigma_{a_{\max}}$ – максимальная амплитуда напряжений блока нагружения; n^* – число циклов нагружений $\sigma_{a_i} \geq 0,5 \cdot \sigma_{-1}$ за наработку; k_1 – число интервалов блока нагружения диапазона напряжений $0,5 \cdot \sigma_{-1} \leq \sigma_{a_i} \leq \sigma_{a_{\max}}$.

Учет асимметрии цикла нагружения. Процесс нагружения моста в рассматриваемых зонах имеет ярко выраженную асимметрию; циклическое нагружение, связанное с проходом по мосту колесных пар поезда, накладывается на напряжения связанные со значительной деформацией моста под весом состава. В рамках исследования использована коррекция амплитуд блока нагружения, при этом величины приведенных амплитуд цикла нагружения ($\sigma_{a_{np}}$) определялись по формуле Кинасошвили:

$$\sigma_{a_{np}} = \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m,$$

где σ_a, σ_m – амплитуда и среднее значение цикла нагружения; ψ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла.

Коэффициент ψ для материала моста – стали 15ХСНД принимался равным 0,12.

Результаты расчета. По результатам анализа эксплуатационной нагруженности и особенностей конструкции моста выделены четыре зоны с низкими показателями усталостной долговечности: зоны 1–4 на рис. 5. Расчет срока службы выполнен в специализированном модуле UM Durability программного комплекса «Универсальный Механизм». Результаты, полученные с использованием линейной модели накопления усталостных повреждений, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты расчета усталостной долговечности зон приварки поперечных балок моста, полученные с использованием ЛМНП

Источник данных	Долговечность, лет			
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
РД 50-645-90 (класс 5a)	28,639	38,899	89,847	111,52
ПВ FAT100	96,296	112,191	170,575	189,983
ПВ FAT80	50,129	58,413	88,808	98,912
Вариант №1	104,739	121,806	184,276	204,979
Вариант №2	42,469	49,492	75,276	83,849

На основании результатов, приведенных в табл. 2, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее низкие показатели срока службы фиксируются для зон приварки крайних поперечин.

2. Расчет с использованием расчетных характеристик сопротивления усталости, соответствующих качественному и менее качественному исполнению сварных швов, дает прогноз усталостной долговечности не ниже 28 лет. Результаты оценки с использованием экспериментальных данных показывают срок службы не менее 42 лет. Полученное значение ниже нормативного срока службы (50 лет), но существенно выше реального срока службы до возникновения усталостных макротрещин (3-7 лет).

3. Предположение о низком качестве сварных соединений (свойства сопротивления усталости, соответствующие РД 50-645-90 (класс 5a), ПВ FAT80, и Варианту №2) позволяет получить прогноз долговечности, приближенный к реальным значениям (28 лет).

Результаты расчетов, полученные с использованием скорректированной линейной модели накопления усталостных повреждений, приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Результаты расчета усталостной долговечности зон приварки поперечных балок моста, полученные с использованием КЛМНП

Источник данных	Долговечность, лет			
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
РД 50-645-90, класс 5a	2,864	38,083	88,122	109,285
ПВ FAT100	12,475	109,799	167,236	186,095
ПВ FAT80	5,597	5,841	8,881	12,005
Вариант №1	12,372	119,171	180,603	200,703
Вариант №2	4,247	4,949	7,528	11,385

По результатам, приведенным в табл. 3, можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее низкие показатели срока службы фиксируются для зон приварки крайних поперечин.

2. Расчет с использованием характеристик сопротивления усталости, соответствующих качественному исполнению сварных швов (IIW FAT100 и *Вариант №1*), дает прогноз усталостной долговечности существенно ниже нормативного срока службы (50 лет) только для зоны первой поперечины.

3. Расчет с использованием характеристик сопротивления усталости, соответствующих менее качественному исполнению сварных швов (IIW FAT80 и *Вариант №2*), дает прогноз усталостной долговечности существенно ниже нормативного срока службы для всех рассматриваемых зон. При этом полученные значения в целом соответствуют срокам возникновения усталостных макротрещин при эксплуатации моста (3-7 лет).

В рамках исследования дополнительно была проведена оценка влияния способа определения номинального напряжения на результаты расчета. В табл. 4 приведены результаты расчета усталостной долговечности первой поперечины по КЛМНП для двух вариантов определения номинальных напряжений: первое главное напряжение и эквивалентное напряжение по IV теории прочности (фон Мизеса). Анализ результатов не показал качественных различий в прогнозе срока службы.

Дополнительная проверка влияния состояния пути (неровностей рельсовых нитей) на усталостную долговечность рассматриваемых сварных элементов показало существенное различие в результатах, полученных для идеально ровного пути и пути хорошего содержания (см. табл. 5).

Таблица 4.

Результаты расчета усталостной долговечности для различных вариантов определения номинальных напряжений

Номинальное напряжение	Долговечность, лет			
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
Первое главное	4,247	4,949	7,528	11,385
Эквивалентное фон Мизеса	3,565	4,236	6,673	7,979

Таблица 5.

Результаты расчета усталостной долговечности для различного состояния пути

Состояние пути	Долговечность, лет			
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
Путь хорошего содержания	4,247	4,949	7,528	11,385
Идеально ровный путь	62,176	71,972	110,422	121,976

Выводы. По результатам применения предложенной методики к исследованию моста через реку Ворскла на 333-ем километре линии Киев – Харьков можно сделать следующие заключения.

1. Методика позволяет проводить исследование эксплуатационной нагруженности железно-

рожных мостов с учетом характеристик динамических воздействий.

Результаты анализа могут успешно использоваться для выявления зон с высоким уровнем напряжений, наиболее опасных режимов эксплуатации, а также служить исходными данными для оценки усталостной долговечности конструкции.

Точность анализа определяется наличием достоверных данных о структуре грузопотока, подвижного состава, скоростных режимов движения по мосту, состоянии пути (неровностей рельсовых нитей), а также качеством конечно-элементной модели моста.

2. Корректность оценки усталостной долговечности определяется выбором методики расчета и точностью исходных данных о свойствах сопротивления усталости.

Для расчета усталостной долговечности сварных элементов конструкций железнодорожных мостов можно рекомендовать общемашиностроительные методики, основанные на применении скорректированной линейной модели накопления усталостных повреждений (РД 50-645-90, рекомендации IIW). При этом для оценки величины предельного накопленного повреждения рекомендуется применять подход, регламентированный в РД 50-645-90.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: гранты № 11-01-00500-а, № 11-01-90422-Укр_ф_а.

Л и т е р а т у р а

1. Мосты и трубы – СНиП 2.05.03 – 84*, Москва, 2001 г.
2. Yang Y. B., Yau J.D., Wu. Y.S. Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With applications to high-speed railways / Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004. – PP. 530.
3. Nan Zhang, He Xia, WeiweiGuo, Jiawang Zhan, Jinbao Yao, Yanmei Cao. Vehicle-bridge interaction analysis of heavy load railway, Procedia Engineering, Elsevier, 4 (2010) 347–354.
4. <http://www.universalmecanismo.com>.
5. Е.А. Кругова, Г.В. Михеев, В.И. Кирьян, М.Г. Мальгин. Верификация методики компьютерного моделирования взаимодействия железнодорожных экипажей и мостов. – Вестник ВНИИЖТ, Москва, №5/2011, стр. 29-33.
6. Методические указания «Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных соединений» - РД 50-694-90, Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, Москва, 1991 г.
7. International Institute of Welding Fatigue Recommendations: <http://ru.scribd.com/doc/82937107/IIW-Recommendations-for-Fatigue-Design-of-Welded-Joints-and-Components-2008>.
8. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений, Научно-исследовательский институт мостов ЛИИЖТа, 1990 г.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ-ВНИИЖТ, Москва, 1996 г.
10. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного

вагона ЦНІІ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов – ЦП-515, Министерство путей сообщения Российской Федерации, Москва, 1997 г.

References

1. Mosty i truby – SNIIP 2.05.03 – 84*, Moskva, 2001 g.
2. Yang Y. B., Yau J.D., Wu. Y.S. Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With applications to high-speed railways / Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2004. – PP. 530.
3. Nan Zhang, He Xia, Weiwei Guo, Jiawang Zhan, Jinbao Yao, Yanmei Cao. Vehicle-bridge interaction analysis of heavy load railway, Procedia Engineering, Elsevier, 4 (2010) 347–354.
4. <http://www.universalmechanism.com>.
5. E.A. Krugovova, G.V. Mikheev, V.I. Kir'jan, M.G. Malgin. Verifikacija metodiki komp'juternogo modelirovanija vzaimodejstvija zheleznodorozhnyh jekipazhej i mostov. – Vestnik VNIIZhT, Moskva, №5/2011, str. 29-33.
6. Metodicheskie ukazanija «Nadezhnost' v tehnikе. Verojatnostnyj metod rascheta na ustalost' svarnyh soedinenij» - RD 50-694-90, Gosudarstvennyj komitet SSSR po upravleniju kachestvom produkcii i standartam, Moskva, 1991 g.
7. International Institute of Welding Fatigue Recommendations: <http://ru.scribd.com/doc/82937107/IW-Recommendations-for-Fatigue-Design-of-Welded-Joints-and-Components-2008>.
8. Ukazanija po osmotru i usileniju jekspluatiruemyh svarnyh proletnyh stroenij, Nauchno-issledovatel'skij institute mostov LIIZhTa, 1990 g.
9. Normy dlja rascheta i proektirovanija vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh), Gos-NIIV-VNIIZhT, Moskva, 1996 g.
10. Instrukcija po rasshifrovke lent i ocenke sostojanija rel'sovoj kolei po pokazanijam puteizmeritel'nogo vagona CNII-2 i meram po obespečeniju bezopasnosti dvizhenija poezdov – CP-515, Ministerstvo putej soobshhenija Rossijskoj Federacii, Moskva, 1997 g.

Міхєєв Г. В., Погорєлов Д. Ю., Лисіков М. М., Круговова К. А., Кир'ян В. І., Мальгін М. Г. Розрахунок динамічної навантаженості і усталостної довговічності залізничних мостів методом комп'ютерного моделювання.

Запропоновано методику розрахунку динамічної навантаженості і втомної довговічності залізничних мостів на основі комп'ютерного моделювання в програмному комплексі «Універсальний механізм». Показуно, що застосування коригувальної моделі накопичення втомних пошкоджень у зварних з'єднаннях призводить до результатів, які добре згадуються з наявними експериментальними даними. Представлена оцінка впливості зварних швів, що нерівністю шляху і деяких інших факторів на результати розрахунку.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання динаміки, залізничний міст, втомна довговічність.

Mikheev G.V., Lysikov N.N., Pogorelov D.Y, Krugovova E.A, KiryanV.I., MalginM.G. Calculation of dynamic loading and durability of railway bridges by computer simulation

The suggested procedure of calculation of dynamic loading and durability of railway bridges is considered. It is based on computer simulation using program package «Universal mechanism». For analysis of dynamic loading of the

bridge, the joint 3D model of mechanical system «bridge-train» is used. It is shown that usage of the corrected linear model of accumulation of fatigue damages in welds leads to the results which good agree with the available experimental data. Influence of weld quality, way irregularities and some other factors on the calculation results is presented.

Keywords: *multibody system dynamics, railway bridge, fatigue life.*

Міхєєв Геннадій Вікторович, к.т.н., старший науковий співробітник, «Прикладна механіка», Брянський державний технічний університет, Брянськ, Росія, e-mail: mikheev@umlab.ru

Лисіков Микола Миколайович, науковий співробітник, «Прикладна механіка», Брянський державний технічний університет, Брянськ, Росія, e-mail: lysikov@umlab.ru

Погорєлов Дмитро Юрійович, д.ф.-м.н., професор, «Прикладна механіка», Брянський державний технічний університет, Брянськ, Росія, e-mail: pogorelov@umlab.ru

Круговова Катерина Алесєєвна, аспірант, «Прикладна механіка», Брянський державний технічний університет, Брянськ, Росія, e-mail: krugovova@umlab.ru

Кир'ян Валерій Іванович, чл.-кор. НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, Україна, e-mail: kiryan@paton.kiev.ua

Мальгін Михайло Геннадійович, науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, Україна, e-mail: ukbrucke@mail.ru

Рецензент: Сакало В.І., д.т.н., професор.