

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Научная статья

УДК 624.21

doi 10.52170/1815-9265_2023_66_51

Влияние циклической нагрузки на коррозионно-усталостную долговечность пролетных строений железобетонных мостов

Глеб Александрович Ефремов^{1✉}, Валерий Николаевич Мячин²,
Дмитрий Александрович Шестовицкий³

¹ Научно-исследовательский и проектный институт «Транспортной и строительной безопасности», Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский и проектный институт территориального развития и транспортной инфраструктуры, Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

¹ frost0077@mail.ru[✉]

² vnmyachin@yandex.ru

³ shestovitsky@mail.ru

Аннотация. Планируемая высокоскоростная железнодорожная магистраль Москва – Санкт-Петербург предъявляет высокие требования к надежности и долговечности искусственных сооружений в своем составе. Срок службы основных несущих конструкций мостов назначается директивно нормами проектирования на уровне 100 лет, при этом отсутствует возможность его обоснования и расчетного подтверждения. Опыт эксплуатации позволяет сделать вывод о том, что единичные сооружения на существующих железнодорожных линиях достигают такого срока без реконструкции или капитального ремонта. В данной статье рассматривается коррозионно-усталостная долговечность как один из аспектов методики прогнозирования срока службы моста с учетом динамической нагрузки. Данный вид деградации железобетона вызывается комбинированным действием пittingовой коррозии арматуры и циклической нагрузки, которое приводит к зарождению и росту усталостной трещины в арматурном стержне. Приведена методика расчета времени роста трещины от ее зарождения до критического значения. В составе методики рассмотрены моделирование и динамический расчет железобетонного рамного пролетного строения моста, обработка спектра изгибающего момента, выделение средней величины напряжения и количества ее повторений, моделирование роста трещины с использованием принципов механики разрушения. Проанализированы поезда А1–А10 по СП 453 в диапазоне скоростей от 120 до 400 км/ч. Получены значения времени роста усталостной трещины для отобранных поездов и скоростей, вызывающих наибольший диапазон напряжений в арматуре.

Ключевые слова: железобетонные мосты, срок службы, коррозионная усталость, линейная механика разрушения, высокоскоростная железнодорожная магистраль, уравнение Пэриса

Для цитирования: Ефремов Г. А., Мячин В. Н., Шестовицкий Д. А. Влияние циклической нагрузки на коррозионно-усталостную долговечность пролетных строений железобетонных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3 (66). С. 51–59. DOI 10.52170/1815-9265_2023_66_51.

BUILDING AND ARCHITECTURE

Original article

Influence of cyclic loading on corrosion-fatigue life of concrete bridges superstructure

Gleb A. Efremov^{1✉}, Valery N. Myachin², Dmitriy A. Shestovitskiy³

¹ Research and Design Institute for Transport and Construction Safety

² Research and Design Institute for Territorial Development and Transport Infrastructure, Saint-Petersburg, Russia

^{1,3} Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Russia

¹ frost0077@mail.ru[✉]

² vnmyachin@yandex.ru

³ shestovitsky@mail.ru

Abstract. The planned high-speed railway line Moscow – Saint-Petersburg makes high demands on the reliability and durability of artificial structures in its composition. The service life of the main load-bearing structures of bridges is prescribed by design standards at the level of 100 years, while there is no possibility of its justification and calculation confirmation. Operating experience allows us to conclude that single structures on existing railway lines reach such a period without reconstruction or major repairs. This article discusses corrosion-fatigue durability as one of the aspects of the method for predicting the service life of a bridge, taking into account the dynamic load. This type of degradation of reinforced concrete is caused by the combined action of pitting corrosion of reinforcement and cyclic loading, which leads to the initiation and growth of a fatigue crack in the reinforcing bar. A method for calculating the time of crack growth from its inception to a critical value is given. The methodology includes modeling and dynamic calculation of a reinforced concrete frame span of a bridge, processing the bending moment spectrum and extracting the average stress value and the number of its repetitions, modeling crack growth using the principles of fracture mechanics. Trains A1-A10 were analyzed along SP 453 in the speed range from 120 to 400 km/h. The values of the fatigue crack growth time for the selected trains and speeds, which cause the largest range of stresses in the reinforcement, are obtained.

Keywords: concrete bridges, service life, corrosion-fatigue, linear elastic fracture mechanics, high-speed railway, Paris law

For citation: Efremov G. A., Myachin V. N., Shestovitskiy D. A. Influence of cyclic loading on corrosion-fatigue life of concrete bridges superstructure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(66):51–59. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2023_66_51.

Введение

При проектировании искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСМ) одним из основных требований, предъявляемых к ним нормативной документацией, является надежность на протяжении всего срока эксплуатации [1]. Однако средства для обеспечения надежности железобетонных конструкций в настоящий момент ограничены конструктивными требованиями, такими как класс бетона по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, защитный слой бетона и т. д. Считается, что при выполнении данных требований конструкция будет удовлетворять заданному проектному сроку службы, который для основных конструкций мостов принимается равным 100 годам [1]. Практикой соблюдение заданного срока службы для железобетонных мостов на высокоскоростных магистралях на данный момент не подтверждено. Но если обратиться к эксплуатируемым железобетонным мостам на существующих дорогах сети ОАО «РЖД», то, по данным [2], срок эксплуатации пролетных строений, запроектированных под нагрузку С14, не превышает 50 лет. Это говорит о недостаточной изученности процесса деградации железобетонных элементов во времени. Процесс этот достаточно сложный, и существует несколько сценариев потери несущей способности элемента и последующего разрушения сечения. Так, в работах [3], [4] изучается разрушение железобетонного элемента по критерию накопления микроповреждений в бетоне сжатой зоны. Также есть методики расчета, предполагающие исчерпание несущей способ-

ности сечения из-за равномерной коррозии рабочей арматуры [5]. Однако есть еще один сценарий, вероятность которого повышается из-за работы пролетного строения в условиях высокоскоростного движения и значительных динамических нагрузок, – коррозионно-усталостное разрушение рабочей арматуры. Данный процесс представляет собой комбинацию воздействия агрессивной среды и попеременного циклического нагружения. Под воздействием хлоридсодержащей среды в арматуре, наряду с равномерной коррозией, возникает пittingовая, и появляющиеся коррозионные ямки становятся концентраторами напряжений [6]. По этой причине в вершине ямки может зародиться усталостная трещина, рост которой в конечном итоге приводит к разрушению арматурного стержня (рис. 1).

В данной статье представлена методика моделирования и расчета времени роста усталостной трещины в арматуре после ее зарождения и до достижения критического значения с учетом типа временной подвижной нагрузки. Сложность учета подвижной нагрузки заключается в необходимости перехода от сложного спектра усилий, полученного в результате динамического анализа, к более простому, который может использоваться в расчете.

Для достижения поставленной задачи использованы стандартные уравнения механики разрушения, возможности динамического анализа конструкций, реализованные в современных МКЭ-комплексах, а также методы обработки сложных циклов нагрузки и разгрузки элемента.

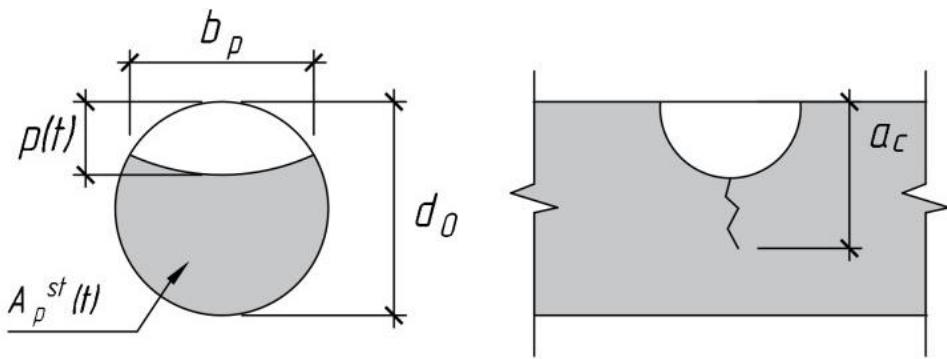


Рис. 1. Процесс зарождения и роста усталостной трещины из коррозионной ямки:
 $p(t)$ – глубина коррозии; b_p – ширина коррозионной ямки; d_0 – первоначальный диаметр арматурного стержня; $A_p^{st}(t)$ – оставшаяся площадь арматуры; a_c – величина трещины с учетом коррозии

Методы исследования

Процесс расчета времени роста усталостной трещины условно можно разделить на три этапа:

1. Создание КЭ-модели пролетного строения и выполнение динамического расчета.
2. Обработка сложного спектра напряжений, полученного в результате расчета, и выделение количества циклов с одинаковым средним напряжением в установленных границах области усреднения.
3. Расчет роста трещины с использованием уравнений механики разрушения.

На первом этапе необходимо создать конечно-элементную модель пролетного строения для выполнения динамического расчета, определить основные допущения модели, граничные условия и действующие нагрузки. В данном исследовании в качестве пролетного строения выбрана рамная система по схеме 16 + 22 + 16 м. Выбор конструкции обусловлен тем фактом, что данное пролетное строение предлагалось в

ходе проектных работ под ВСМ и имеет обычную арматуру в качестве рабочей. В то время как многие балочные разрезные пролетные строения под ВСМ имеют предварительно напряженное армирование, вопросы его коррозионной долговечности остались за рамками данного исследования. Поперечное сечение и фасад моста представлены на рис. 2 и 3.

Пролетное строение представляет собой рамную железобетонную конструкцию, выполненную из бетона класса В50 и армированную стержнями из стали класса А400. В расчетной модели, выполненной в программном комплексе Sofistik (рис. 4), использованы стержневые конечные элементы для моделирования пролетного строения и опор, а также элемент, условно моделирующий ось, по которой движутся силы. Данный элемент связан с осью пролетного строения с помощью жестких вставок. В качестве подвижной временной нагрузки использовались поезда А1–А10

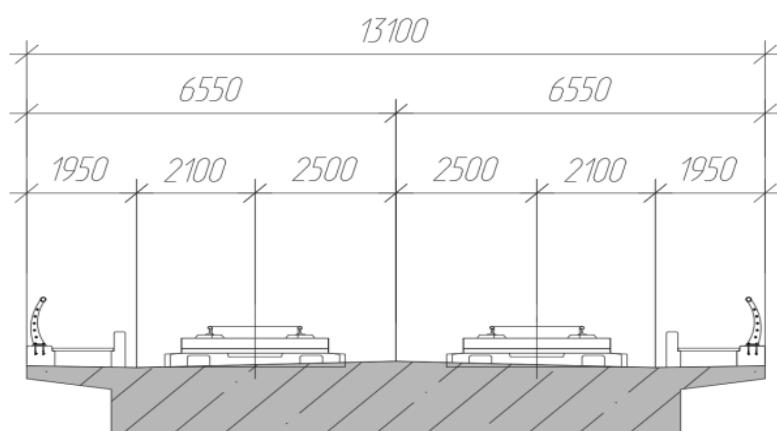


Рис. 2. Поперечное сечение моста

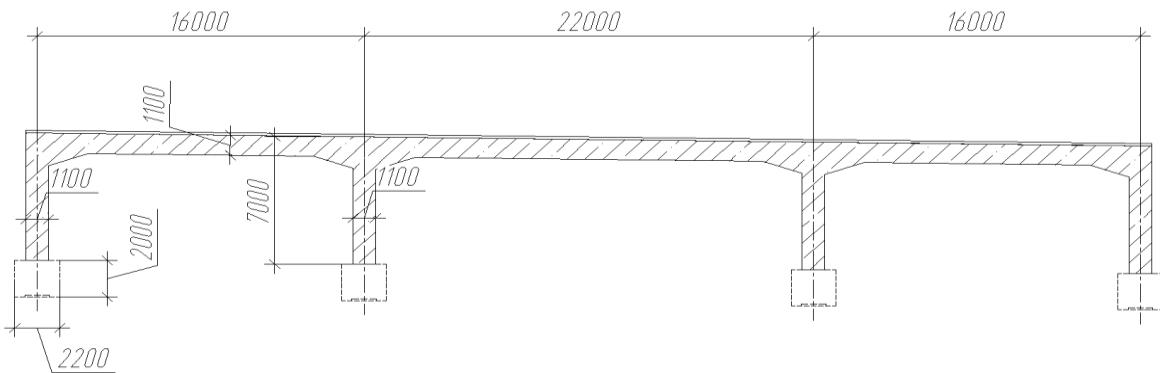


Рис. 3. Фасад моста

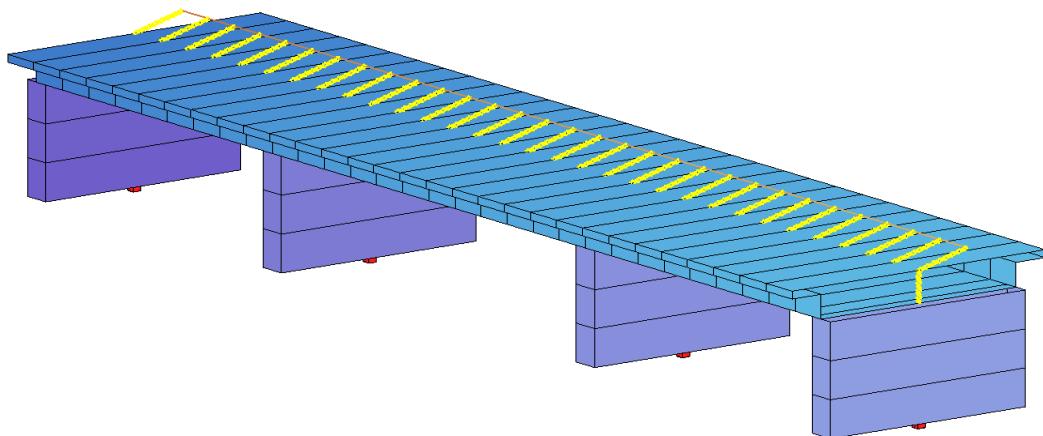


Рис. 4. Визуализация конечно-элементной модели пролетного строения

по СП 453.1325800.2019. Для решения динамической задачи применялся встроенный модуль DYNA ПО Sofistik.

Подвижная нагрузка представляет собой набор сосредоточенных масс, движущихся по пролетному строению. Диапазон расчетных скоростей движения подвижного состава составляет 120–400 км/ч, шаг изменения скорости – 5 км/ч, временной шаг интегрирования уравнений движения – 0,0015 с. Расчет производился на нормативные величины нагрузок, т. е. коэффициенты динамики и надежности были приняты равными 1,0.

В результате прогонки поездов А1–А10 в выбранном диапазоне скоростей были получены изгибающие моменты в балке от каждого поезда на каждой скорости, пересчитанные затем в напряжения в рабочей арматуре (рис. 5). По результатам анализа спектров усилий от каждого случая прогонки были отобраны поезда и скорости, при которых диапазон напряжений в рабочей арматуре достигал наибольшего значения.

Далее, на втором этапе, необходимо обработать полученный спектр напряжений. Обработка ведется с помощью встроенных функций MS Excel по следующему алгоритму:

1) нахождение пиков σ_{pi} и впадин σ_{bi} на графике, которые соответствуют всем точкам перелома функции (рис. 6);

2) нахождение разности $\Delta\sigma_i$ между каждым пиком и впадиной:

$$\Delta\sigma_i = \begin{cases} \sigma_{pi} - \sigma_{bi}, \\ \sigma_{bi} - \sigma_{pi}; \end{cases} \quad (1)$$

3) разбиение диапазона полученных значений $\Delta\sigma_i$ на участки усреднения и нахождение средних значений $\overline{\Delta\sigma}_i$ на каждом из участков;

4) нахождение количества повторений значений $\Delta\sigma_i$ в каждом из участков усреднения и запись их последовательной суммы в вектор-столбик \vec{N} .

Конечным итогом обработки спектра напряжений являются вектор-столбик $\vec{\Delta\sigma}$ средних напряжений из каждого участка усреднения и вектор-столбик \vec{N} количества

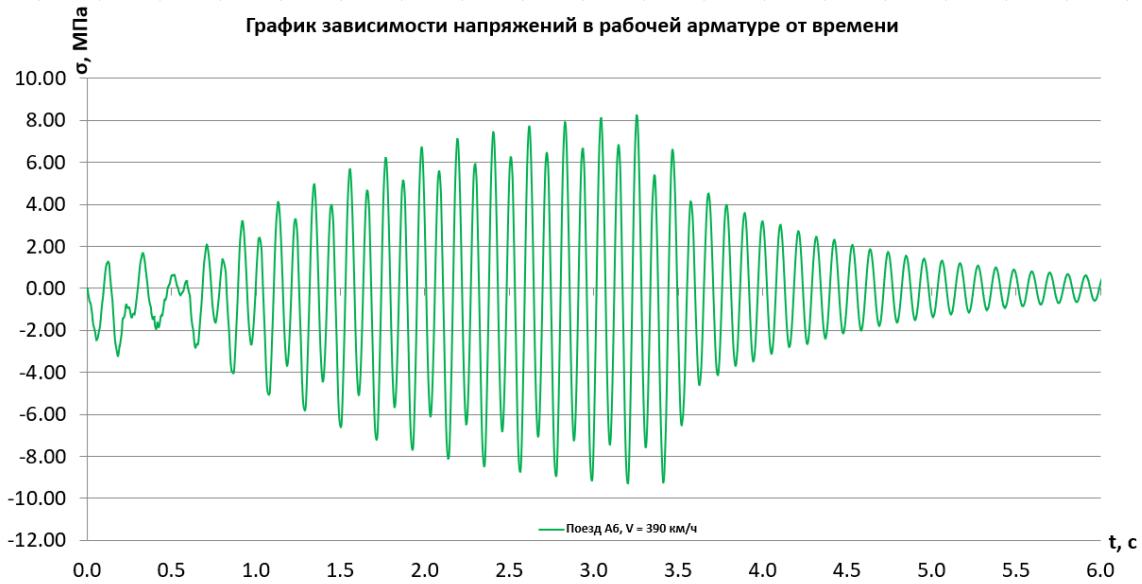


Рис. 5. Зависимость напряжений от времени в рабочей арматуре пролетного строения (поезд А6, $V = 390$ км/ч)

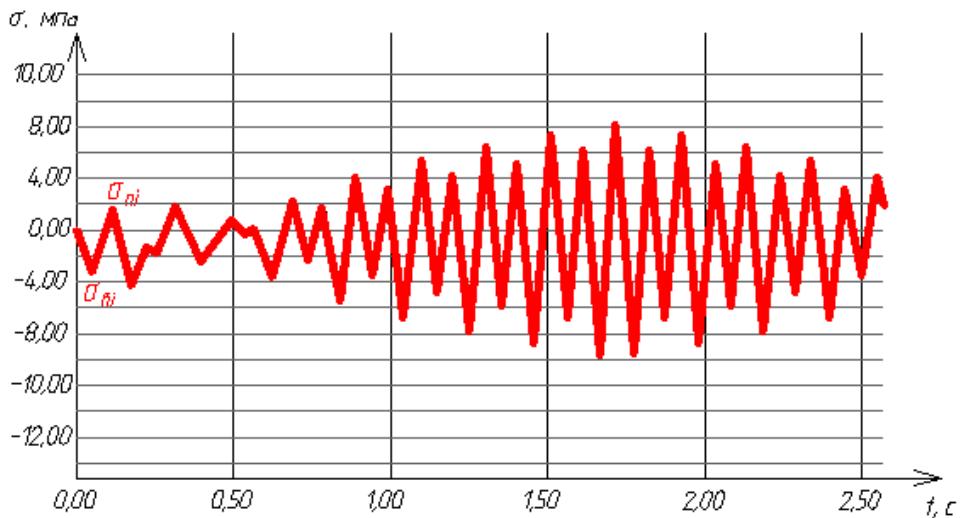


Рис. 6. Выделение пиков и впадин в спектре напряжений (поезд А6, $V = 390$ км/ч)

циклов $\Delta\sigma_i$ в каждом участке. На третьем этапе используются принципы и подходы механики разрушения для моделирования роста усталостной трещины.

Рост усталостной трещины хорошо описывается законом Пэриса [7]:

$$\frac{da}{dN} = C_p \Delta K^{m_p}, \quad (2)$$

где a – размер трещины; N – количество циклов временной нагрузки; C_p , m_p – коэффициенты, зависящие от материала и ΔK ; ΔK – диапазон коэффициента интенсивности напряжений.

Коэффициенты C_p , m_p зависят от материала и для арматурной стали в РФ пока не определены, поэтому их значение принято по источнику [8]: $C_p = 1,435 \cdot 10^{-10}$; $m_p = 2,24$.

ΔK определяется по следующей формуле:

$$\Delta K(a) = \overline{\Delta\sigma} Y(a/d_0) \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

где $\overline{\Delta\sigma}$ – средний диапазон напряжений в цикле; $Y(a/d_0)$ – эмпирическая функция, учитывающая геометрию образца; d_0 – первоначальный диаметр стержня.

$Y(a/d_0)$ принята по данным британского стандарта BS 7910 [9]:

$$Y(a/d_0) = \frac{1,84}{\pi} \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi a}{4d_0} \right) \cdot \frac{4d_0}{\pi a} \right]^{0,5} \times \\ \times \left[\cos \left(\frac{\pi a}{4d_0} \right) \right]^{-1} \left\{ 0,752 + 2,02 \left(\frac{\pi a}{4d_0} \right) + \right. \\ \left. + 0,37 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi a}{4d_0} \right) \right]^3 \right\}. \quad (4)$$

Процесс моделирования роста трещины можно описать алгоритмом, представленным на рис. 7.

Моделирование осуществлялось с помощью средств программирования, доступных в вычислительном пакете Mathcad. В результате выполнения программы выводится вектор-столбик значений величины трещины a_i на каждом цикле нагружения от воздействия конкретного подвижного состава на конкретной скорости.

Теперь найдем время роста трещины (в годах):

$$T = \frac{a_{cr} - a_0}{\sum_{i=1}^n f_i \cdot \Delta a_i}, \quad (5)$$

где a_{cr} – критическая величина трещины; a_0 – начальная величина трещины; f_i – частота про-

хождения i -го поезда по пролетному строению,цикл/год; $\Delta a_i = a_i - a_0$ – прирост трещины от одного цикла прохода i -го подвижного состава.

Результаты и выводы

После выполнения динамического расчета и получения экстремальных значений усилий в балке были отобраны шесть случаев прохода поездов, вызывающих наиболее широкий диапазон напряжений в рабочей арматуре.

После обработки данных динамического расчета и выполнения алгоритма моделирования роста усталостной трещины было получено приращение трещины от одного прохода каждого из поездов, их сравнение показано на графике (рис. 8).

Принимая за год в среднем 10 циклов прохода нагрузки в день, а величину критической трещины равной 0,75 от начального диаметра арматуры, получим время роста трещины от каждого поезда в годах (таблица).

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что наиболее высокая

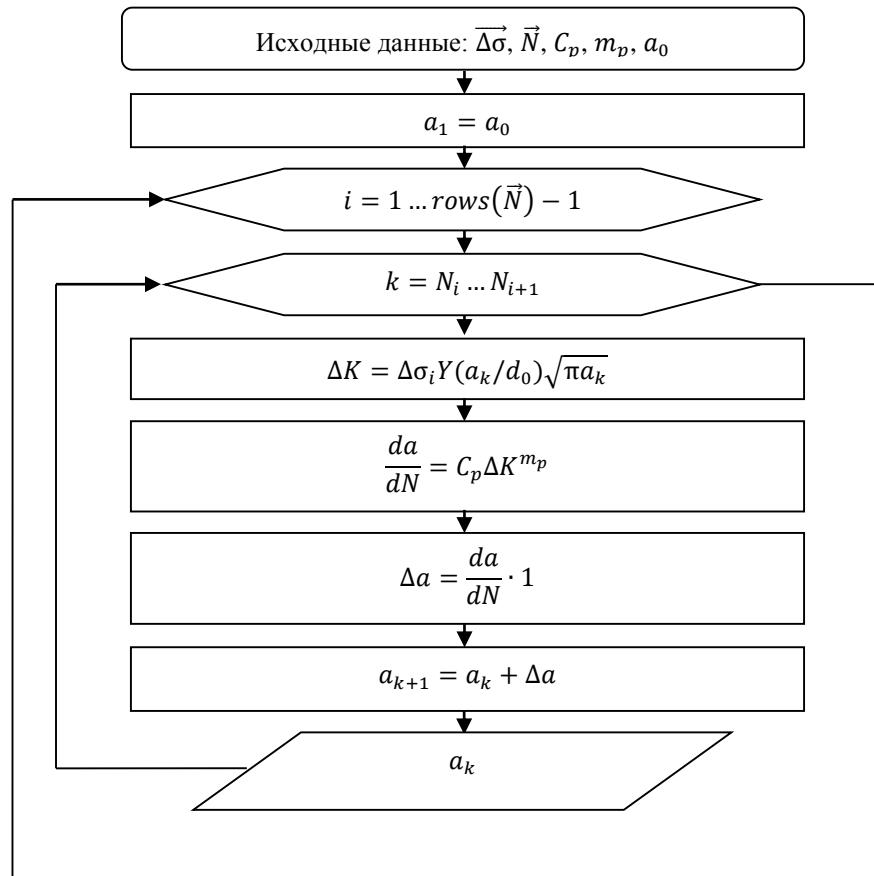


Рис. 7. Блок-схема процесса моделирования роста усталостной трещины в математическом пакете Mathcad

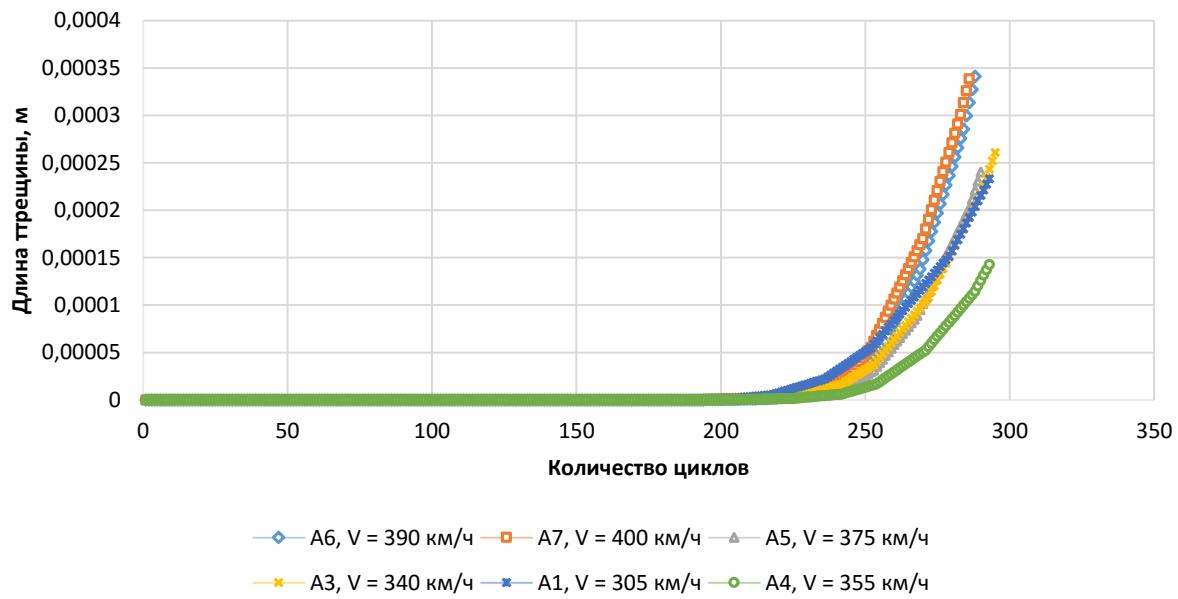


Рис. 8. Сравнение прироста трещины от различных поездов и скоростей прохождения

Результат расчета времени роста трещины

Поезд	Скорость, км/ч	Прирост трещины за один проход, мм	Частота, цикл/год	Прирост трещины за год, мм/год	Критическое значение трещины, мм	Время роста до критической величины, год
A6	390	0,000341	3 650	1,245	12	9,6
A7	400	0,000338	3 650	1,234	12	9,7
A5	375	0,000240	3 650	0,876	12	13,7
A3	340	0,000261	3 650	0,953	12	12,6
A1	305	0,000233	3 650	0,850	12	14,1
A4	355	0,000143	3 650	0,522	12	23,0

интенсивность роста усталостной трещины (1,245 мм/год) в рабочей арматуре данного пролетного строения наблюдается при прохождении поезда А6 на скорости 390 км/ч. Стоит отметить, что не всегда случай загружения, вызывающий наибольший диапазон напряжений в рабочей арматуре, вызывает также наиболее интенсивный рост трещины. Это видно из сравнения поездов А3 и А5 (скорость роста трещины выше у поезда А5).

В целом данная методика позволяет учесть при расчете любой подвижной состав, проходящий по мостовому сооружению с установленной скоростью, так же как и комбинации различных подвижных составов.

Временной отрезок роста трещины для разных поездов составил от 10 до 23 лет. С учетом того что данный расчет входит в состав комплексной оценки срока службы сооружения, в котором время роста трещины составляет от 5 до 15 % всего срока службы [10], полученные результаты можно считать адекватными.

Недостатком данной методики является ее детерминированность, т. е. неучет вероятностной природы параметров, входящих в расчет, а также существующая неопределенность в области коэффициентов уравнения Пэриса, которые можно установить только экспериментальным путем.

Список источников

1. СП 453.1325800.2019. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2019 г. № 809/пр : введен в действие с 17 июня 2020 г. Москва : Стандартинформ, 2020. 161 с.
2. Бокарев С. А., Прибыtkov С. С., Ефимов С. В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 3. С. 169–183.
3. Федулов И. В. Методика вероятностной оценки ресурса железобетонных пролетных строений мостов : специальность 05.23.15 «Мосты и транспортные тоннели» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федулов Илья Викторович. Москва : 1998. 20 с.
4. Мамажанов Р. К. Основы теории прогнозирования ресурса железобетонных мостов для Средней Азии : специальности 05.23.15 «Мосты и транспортные тоннели» и 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Мамажанов Р. К. Москва, 1989. 41 с.
5. Шестовицкий Д. А. Прогнозирование срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шестовицкий Дмитрий Александрович. Санкт-Петербург, 2017. 28 с.
6. Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion-fatigue deterioration / E. Bastidas-Arteaga, P. Bressolette, A. Chateauneuf, M. Sanchez-Silva // Structural Safety. 2009. Vol. 31. P. 84–96.
7. Paris P. C., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws // Journal of Basic Engineering. 1963. Vol. 85. P. 528–533.
8. Sobieck Tyler, Atadero Rebecca A., Mahmoud Hussam N. Fatigue Crack Propagation of Notched Steel Rebar in RC Beams Repaired with Externally Bonded CFRP // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 19, No. 5. P. 04014076.
9. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures / British Standards Institution (BSI). London, 2013. 306 p.
10. Bastidas-Arteaga E. Probabilistic service life model of RC structures subjected to the combined effect of chloride-induced corrosion and cyclic loading : [PhD Dissertation] / Bastidas-Arteaga E. Bogota, 2009. 141 p.

References

1. SP 453.1325800.2019 Artificial high-speed railway lines. Design and construction rules. Official publication. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 16.12.2019 809/or; put into effect from 17.06.2020. Moscow: Standartinform; 2020. 161 p. (In Russ.).
2. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Efimov S. V. Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018;20(3):169–183. (In Russ.).
3. Fedulov I. V. Methodology for probabilistic assessment of the resource of reinforced concrete superstructures of bridges. Speciality 05.23.15 Bridges and Transport Tunnels. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Fedulov Ilya Viktorovich. Moscow; 1998. 20 p. (In Russ.).
4. Mamazhanov R. K. Fundamentals of the theory of forecasting the resource of reinforced concrete bridges for Central Asia. Speciality 05.23.15 Bridges and Transport Tunnels and 05.23.05 Building Materials and Products. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Mamazhanov R. K. Moscow; 1989. 41 p. (In Russ.)
5. Shestovitskiy D. A. Forecasting the service life of reinforced concrete superstructures of road. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Shestovitskiy Dmitriy Aleksandrovich. Saint-Petersburg; 2017. 28 p. (In Russ.).
6. Bastidas-Arteaga P., Bressolette P., Chateauneuf A., Sanchez-Silva M. Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion-fatigue deterioration. *Structural Safety*. 2009;31:84–96.
7. Paris P. C., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering*. 1963;85:528–533.
8. Tyler Sobieck, Rebecca A. Atadero, Hussam N. Mahmoud. Fatigue Crack Propagation of Notched Steel Rebar in RC Beams Repaired with Externally Bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*. 2014;19(5):04014076.
9. BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standards Institution (BSI). London; 2013. 306 p.
10. Bastidas-Arteaga E. Probabilistic model of lifetime assessment of RC structures subjected to the coupled effect of corrosion and fatigue. The dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Bogota; 2009. 141 p.

Информация об авторах

Г. А. Ефремов – ведущий специалист Научно-исследовательского и проектного института «Транспортной и строительной безопасности», аспирант кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

В. Н. Мячин – генеральный директор Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры, доктор технических наук, профессор.

Д. А. Шестовицкий – доцент кафедры «Мосты» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, кандидат технических наук.

Information about the authors

G. A. Efremov – Leading Specialist of the Research and Design Institute of Transport and Construction Safety, Postgraduate of the Bridges Department, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

V. N. Myachin – General Director of the Research and Design Institute of Territorial Development and Transport Infrastructure, Doctor of Engineering, Professor.

D. A. Shestovitskiy – Associate Professor of the Bridges Department, Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Candidate of Engineering.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 08.06.2023; принята к публикации 07.07.2023.

The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 08.06.2023; accepted for publication 07.07.2023.