

Техника и технология транспорта: научный Интернет-журнал <http://www.transport-kgasu.ru>
2019. № 11 http://transport-kgasu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=2
URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-19PTC19.pdf>

Статья опубликована 25.05.2019

Ссылка для цитирования этой статьи:

Черных В.К. Прогнозирование поведения многоэлементных металлических конструкций транспортных сооружений в реальных условиях эксплуатации // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 19.
URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-19PTC19.pdf>

УДК 539.4, 624.2

Черных В.К. – старший преподаватель

E-mail: mtt91@yandex.ru

**Самарский государственный университет путей сообщения
(филиал СамГУПС в г. Саратове), г. Саратов, Россия**

Прогнозирование поведения многоэлементных металлических конструкций транспортных сооружений в реальных условиях эксплуатации

Аннотация

Многоэлементные металлические конструкции широко применяются в конструкциях транспортных сооружений (металлические пролетные строения, фермы железнодорожных мостов, путепроводов и др.) Во время эксплуатации такие конструкции подвергаются совместному действию нагрузок, температур и агрессивных сред. В соответствии с этим представляется актуальной задача прогнозирования поведения таких конструкций. Она заключается в разработке эффективных моделей, ориентированных на расчет несущей способности элементов конструкций, подвергающихся коррозионному износу. Статья посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния и оценке долговечности нагруженной фермы, работающей в условиях коррозионного износа. Предлагается алгоритм, который может применяться для прогнозирования долговечности металлических конструкций транспортных сооружений.

Ключевые слова: коррозия, агрессивная среда, металлические конструкции, коррозионный износ, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, ферма, стержневые конструкции.

В связи с огромными размерами нашей страны, конструкции мостов и других транспортных сооружений эксплуатируются в различных климатических регионах. На мосты и сооружения в процессе эксплуатации действуют статические и динамические нагрузки (собственный вес, транспорт, пешеходы, ветер и др.), температурные условия, различные жидкие агрессивные среды. Это пресные речные воды (в зоне опор мостов), грунтовые воды, атмосферные осадки в виде дождей, туманов, промышленные водные стоки, щелочные и кислые среды и т.п. [1], а также минеральные вещества и соли, которые входят в состав антигололедных материалов [2-5].

Металлические конструкции мостовых сооружений весьма разнообразны. Из стали, помимо пролетных строений, изготавливаются лестничные сходы, барьерные и перильные ограждения, деформационные швы и даже опоры.

Одним из самых простых и распространенных пролетных строений является балочное (рис. 1). Оно применяется как в автодорожных, так и в железнодорожных мостах.

Коррозионные процессы в металлоконструкциях мостовых сооружений можно классифицировать по характеру разрушения поверхности:

- сплошная коррозия, при которой агрессивная среда действует на поверхность элементов конструкции равномерно и сопровождается уменьшением толщины сечения элемента конструкции;
- местная коррозия, обусловлена локальным повышением уровня агрессивности среды и развивается на отдельных участках;
- язвенная коррозия, при которой на поверхности металла образуются поражения в виде

язв, глубина и поперечные размеры которых составляют до нескольких миллиметров [2].

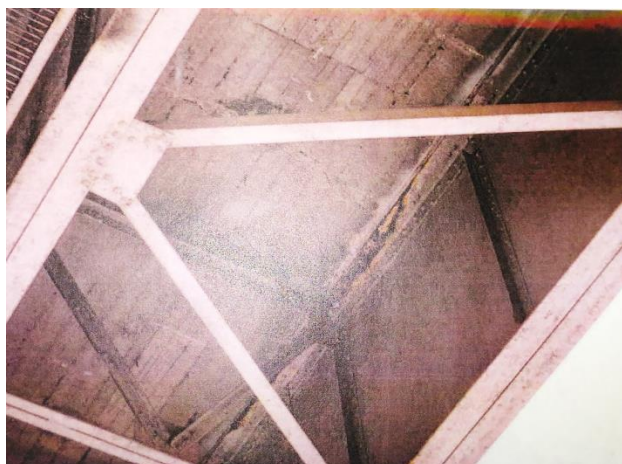


Рис. 1. Коррозия верхнего пояса балки пролетного строения автодорожного моста через р. Белую в г. Уфе

Для перекрытия пролетов в железнодорожных мостах, широкое применение нашли пролетные строения с решетчатыми фермами. Данные пролетные строения наиболее распространены в отечественном мостостроении [5].

Узлы мостовых ферм (рис. 2) являются наиболее уязвимым местом в пролетных строениях:



Рис. 2. Коррозия в узле фермы железнодорожного моста

Также стоит отметить такой дефект, как нарушение целостности антикоррозионного покрытия, как в процессе длительной эксплуатации (рис. 3), так и при их устройстве.



Рис. 3. Нарушение целостности антикоррозионного покрытия

$$\begin{cases} \frac{d\delta_1}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_1(\delta_1)] \\ \frac{d\delta_2}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_2(\delta_2)] \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d\delta_N}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_N(\delta_N)] \end{cases} \quad (4)$$

Теперь каждое уравнение системы (4) может быть решено независимо от других, причем для его решения нет необходимости в численных методах решения задачи Коши. Так как промежуток времени τ известен, то, зная НДС конструкции в начальный момент времени, можно определить значение параметра поврежденности δ_i , соответствующее моменту времени τ . Затем, как и в традиционных алгоритмах, происходит пересчет геометрических параметров сечений элементов:

$$H_{ij}^s = H_{ij}^{s-1} - \delta_i; \quad i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, n} \quad (5)$$

Далее решается задача МКЭ, в результате чего происходит учет перераспределения внутренних усилий в стержневых элементах конструкции, и процесс повторяется требуемое число раз.

Как уже отмечалось, использование равномерного шага по времени не рационально. Более того, величина промежутка времени, в течение которого изменением внутренних усилий в элементах конструкции можно пренебречь, зависит от скорости коррозионного износа и, следовательно, от скорости роста напряжений в них. В данном случае, в качестве параметра интегрирования предлагается использовать шаг по напряжению $\Delta\sigma$. Число итераций, в отличие от известных алгоритмов, является параметром вычислительной процедуры, а долговечность конструкции определяется следующим образом:

$$t^* = \sum_{s=1}^n t^s \quad (6)$$

Рассмотрим теперь постановку задачи, когда долговечность конструкции определяется, кроме ограничений по прочности и устойчивости, еще и ограничениями по жесткости, то есть по перемещению какого-либо узла (или нескольких узлов) в каком-либо направлении:

$$U_{kl} \leq [f]; \quad k = \overline{1, r}; \quad l = \overline{1, L} \quad (7)$$

Здесь U – матрица перемещений узлов конструкции; r – число узлов; L – число степеней свободы узла; $[f]$ – предельное перемещение.

Если ограничения (7) нарушаются раньше, чем (2), то алгоритм решения задачи оценки долговечности несколько изменяется. Действительное значение долговечности конструкции t^* оказывается ограниченным слева и справа абсциссами временной сетки $s-1$ и s итераций. Для его определения на каждом шаге итерационного процесса происходит запоминание значений перемещений заданных узлов таким образом, чтобы иметь информацию для трех последовательных моментов времени: t^{s-2} , t^{s-1} , t^s . В том случае, если для момента времени t^s ограничения уже не выполняются, то значение долговечности определяется методом парабол.

Рассмотрим теперь в качестве объекта исследования статически неопределимую плоскую ферму (рис. 4). К узлу фермы приложена сила P , направленная горизонтально. Характеристики материала конструкции и агрессивной среды полагаются известными.

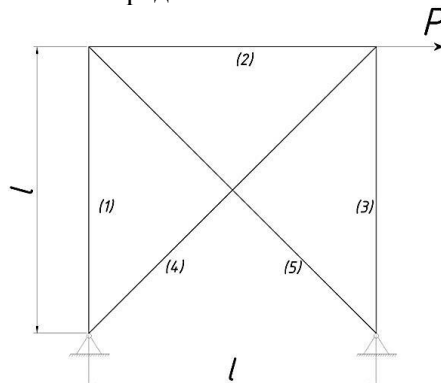


Рис. 4. Статически неопределимая ферма

Решение задачи оценки долговечности проводилось с использованием исправленного метода Эйлера. При этом исправленный метод Эйлера использовался для получения эталонного решения задачи. Для этого для заданного уровня нагружения выбирался элемент, напряжение в котором в начальный момент времени по абсолютной величине было максимальным: $\sigma = \max\{\sigma_i\}; i = \overline{1, N}$ и определялась величина усилия S в данном элементе [10].

По формулам для стержня круглого сечения или для стержня произвольного сечения вычислялось точное значение долговечности отдельного стержня, нагруженного растягивающей нагрузкой P . Затем задача оценки долговечности для этого же стержня несколько раз решалась численно. При этом последовательно уменьшалась величина шага интегрирования Δt и определялась погрешность численного решения. На основании анализа полученных результатов определялось значение шага по времени Δt , при котором погрешность численного решения не превышала 0,1%. Очевидно, что значение долговечности конструкции, определенное численно с использованием полученного значения Δt , не будет отличаться от истинного более чем на 0,1 %, и может считаться эталонным.

Численный эксперимент проводился для $E=2,1 \times 10^5$ МПа; $\nu_0=0,1$ см/год; $k=0,005$ МПа⁻¹. Для получения эталонного решения использовался шаг по времени $\Delta t = 0,025$ года. Величина приложенной нагрузки: $P= 5000$ кг. Нагрузка подбиралась таким образом, чтобы начальные напряжения в максимально нагруженных элементах фермы отличались незначительно.

В табл. 1 приведены численные значения долговечности ферм из пяти стержней в зависимости от длин стержней. При этом растянутые стержни имели круглое сечение, сжатые – круглое, кольцевое и двутавровое (элементы (3) и (5)). Размеры фасонных профилей выбирались из условия равенства их площади сечения площади круглого сечения. Таким образом обеспечивалось приблизительно равенство начальных напряжений в соответствующих элементах конструкции.

Таблица 1

Долговечность статически неопределимой фермы

	t, лет				
	Круг R = 1,93 см	5,782	4,377	3,066	1,835
Труба № 70×6	4,224	4,224	4,224	4,175	4,047
Двутавр № 10	1,808	1,808	1,808	1,808	1,497
l, см	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0

Долговечность фермы, все элементы которой имели круглое сечение, определялась долговечностью элемента (5), активными ограничениями являлись ограничения по устойчивости. Поэтому при относительно малой длине стержней начальное значение критического напряжения было достаточно высоким, что наряду с низкой скоростью роста напряжений в элементах обусловило высокое значение долговечности. Увеличение длин стержней привело к резкому уменьшению критического напряжения, и, следовательно, и долговечности.

На основании анализа результатов численных экспериментов можно сделать вывод о том, что характер и скорость изменения внутренних усилий в элементах фермы зависят от нескольких факторов: степени статической неопределимости фермы, числа элементов в ней, топологии конструкции, скорости изменения жесткости стержней. Последний фактор, в свою очередь, зависит от параметров агрессивной среды, величины механических напряжений и коэффициента слитности сечения.

Данные результаты могут применяться для прогнозирования долговечности металлических конструкций транспортных сооружений, эксплуатирующихся в реальных условиях: металлические фермы железнодорожных и автодорожных мостов, металлическая часть сталебетонных мостов и др.

Список библиографических ссылок

1. Овчинников И.И. Обеспечение сохранности малых и средних мостов с металлическими пролетными строениями / И.И. Овчинников, М.Ю. Миронов, И.Г.

Овчинников, Г.В. Снегирев, В.К. Черных, О.Ю. Моисеев // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №5 (18).

2. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания/ И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др. – Саратов: Изд-во «Кубик», 2014. – 504 с.

3. Раткин В.В., Черных В.К., Тарасов А.А. Разрушительное действие хлоридсодержащей среды на примере обследования железобетонного моста в Новгородской области // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 1 (9); URL: trts.esrae.ru/15-62.

4. Раткин В.В., Черных В.К. Хлоридная коррозия и ее влияние на свойства бетона // Сборник материалов XVII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». Тула: издательство ТулГУ, 2016– С.150-151.

5. Черных В.К. Коррозионные повреждения металлических конструкций транспортных сооружений // Материалы XII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России». Волгоград: издательство ВолгГТУ, 2018– С.87-91.

6. Черных В.К. Оценка долговечности металлических конструкций транспортных сооружений в условиях воздействия агрессивных эксплуатационных сред // Материалы Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем - 2018». Волгоград, 2018– С.297-298.

7. Chernykh V.K., Ovchinnikov I.I. Bearing capacity and life time of multielement structures exposed to corrosive wear // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012062 P.1-5. doi: 10.1088/1757-899X/451/1/012062.

8. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. – Саратов: СГУ, 1987. – 288 с.

9. Метод конечных элементов в механике твердых тел. / Под общ. ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.

10. Зеленцов Д. Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2006. – 168 с.

Chernykh V.K. – senior lecturer

E-mail: mtt91@yandex.ru

Samara State Transport University (Saratov branch), Saratov, Russia

Prediction of behavior of multi-element metal structures of transport facilities in real operating conditions

Abstract

Multi-element metal structures are widely used in the construction of transport facilities (metal spans, trusses of railway bridges, overpasses, etc.) during operation, such structures are exposed to the combined action of loads, temperatures and corrosive environments. In accordance with this, the task of predicting the behavior of such structures seems to be relevant. It consists in the development of effective models focused on the calculation of the bearing capacity of structural elements subjected to corrosion wear. The article is devoted to the study of the stress-strain state and the evaluation of the durability of the loaded truss operating under conditions of corrosion wear. An algorithm that can be used to predict the durability of metal structures of transport facilities is proposed.

Keywords: corrosion, corrosive environment, metal structures, corrosion wear, stress-strain state, finite element method, truss, rod structures.

Reference list

1. Ovchinnikov I.I. Ensuring the safety of small and medium bridges with metal spans / I.I. Ovchinnikov, M.Yu. Mironov, I.G. Ovchinnikov, G.V. Snegirev, V.K. Chernykh, O. Yu. Moses // Internet magazine "Science". - 2013. - №5 (18).

2. Protection against corrosion of metal and reinforced concrete bridge structures by the staining method / IG Ovchinnikov, A.I. Likverman, O.N. Raspora et al. - Saratov: Publishing House Kubik, 2014. - 504 seconds.
3. Ratkin V.V., Chernykh V.K., Tarasov A.A. The destructive effect of the chloride-containing environment on the example of a survey of a reinforced concrete bridge in the Novgorod region // Technical regulation in transport construction. - 2015. - № 1 (9); URL: trts.esrae.ru/15-62.
4. Ratkin V.V., Chernykh V.K. Chloride corrosion and its influence on the properties of concrete // Collection of materials of the XVII International Scientific and Technical Conference "Actual problems of the construction, construction industry and industry." Tula: publishing house TSU, 2016– P.150-151.
5. Chernykh V.K. Corrosive damage to metal structures of transport facilities // Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Scientific and Technological Progress in the Road Industry of the South of Russia". Volgograd: VolgGTU publishing house, 2018– P.87-91.
6. Chernykh V.K. Assessment of the durability of metal structures of transport facilities under the influence of aggressive operating environments // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Progress of vehicles and systems - 2018". Volgograd, 2018– P.297-298.
7. Chernykh V.K., Ovchinnikov I.I. Bearing capacity and life wear // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012062 P.1-5. doi: 10.1088 / 1757-899X / 451/1/012062.
8. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shikhov Yu.M. Calculation of structural elements interacting with aggressive environment. - Saratov: SSU, 1987. - 288 p. The finite element method in solid mechanics. / Under total ed. A.S. Sakharov and I.
9. Altenbach. - K. : Vishcha school, 1982. - 480 p.
10. Zelentsov DG Calculation of structures with varying geometry in aggressive media. Core systems. - Dnepropetrovsk: UGHTU, 2006. - 168 p.