

УДК 539.384

*В. О. БОНДАРЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОК РАЗЛИЧНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ КОРРОЗИИ**

Рассматривается изгиб металлических балок различного поперечного сечения под действием статической нагрузки. Принимается во внимание изменение с течением времени геометрических параметров сечений, связанное с коррозией материала. Показано, что интенсивная коррозия сортаментных профилей типа двутавра может стать причиной увеличения напряжений в два и более раза по сравнению с их начальным уровнем.

**Ключевые слова:** металлическая балка, напряжённо-деформированное состояние, коррозия.

Строительные конструкции при эксплуатации подвергаются действию всевозможных факторов окружающей среды, которые приводят к износу и изменению физико-механических характеристик материалов. Превалирующими причинами снижения несущей способности изгибаемых металлических элементов являются влажность воздуха и длительность увлажнения объекта, температура и состав атмосферы, загрязнение воздуха агрессивными компонентами, которые приводят к коррозионным повреждениям [1]. Уменьшение размеров рабочего сечения элементов приводит к увеличению напряжений под действием прилагаемой нагрузки, что в свою очередь становится причиной снижения надёжности конструкций [2–4]. Поэтому существует практическая необходимость анализа влияния коррозии металлических элементов конструкций на их несущую способность.

Как правило, деформационно-прочностные характеристики металлоконструкций под влиянием агрессивной среды в значительной мере не изменяются, что достигается антикоррозионной обработкой поверхности конструкций, хотя и в этом случае возможен выход объекта из строя в связи с концентрацией напряжений в местах расположения коррозионных каверн и межкристаллических трещин.

Для оценки изменения напряжённо-деформированного состояния элементов с течением времени необходимо знать кинетику коррозионных процессов в материалах [5–7]. Большой вклад в разработку моделей деформирования различных элементов конструкций при совместном действии нагрузок и агрессивных сред внесли Д. Б. Чапаев и его коллеги [8–10].

Экспериментальные исследования влияния коррозии на прочность металлических труб рассмотрены в статьях [11–12]. На основе анализа напря-

жённо-деформированного состояния в зоне наклонных трещин в статьях было показано, что продольные поверхностные трещины развиваются в результате воздействия кольцевых напряжений, которые имеют наибольшие значения, а по направлению перпендикулярны плоскости роста этих трещин. В результате концентрации напряжений, вызванной коррозией, максимальные напряжения превысили номинальные значения более чем в три раза.

В работах И. Г. Овчинникова [13–15] рассмотрены несколько моделей коррозионного износа, которые дают различную степень потери несущей площади стальной балки и поэтому требуют оценки корректности применения в каждом конкретном случае. Анализ экспериментальных данных показал, что коррозионный износ симметричен относительно вертикальной оси сечения трубопровода. Исследования также показали, что коррозионный износ может приводить к изменению положения опасного сечения по длине пролетного строения, что необходимо учитывать при анализе надежности.

В работе [16] проведён анализ влияния факторов окружающей среды на скорость развития коррозии, а также приведены модели её прогнозирования. Полученные результаты показывают, что коррозия может приводить к уменьшению долговечности конструкции в два и более раза. В наибольшей мере на развитие коррозионных процессов в конструкциях влияют степень агрессивности среды и длительность ее воздействия.

В большинстве случаев коррозия стальных конструкций оценивается по потере площади их поперечного сечения, которая определяется глубиной коррозионного поражения. В то же время распределение напряжений в конструкции определяется видом ее деформирования. Поэтому целью представленной работы стало установление влияния поверхностной коррозии на напряженно-деформированное состояние металлических балок, опирающихся концами на горизонтальную поверхность.

Для изучения влияния коррозионного износа металлоконструкций на их напряженно-деформированное состояние рассматривались балки длиной  $l = 6$  м каждая, имеющие разные виды поперечных сечений, приведенные на рисунке 1.

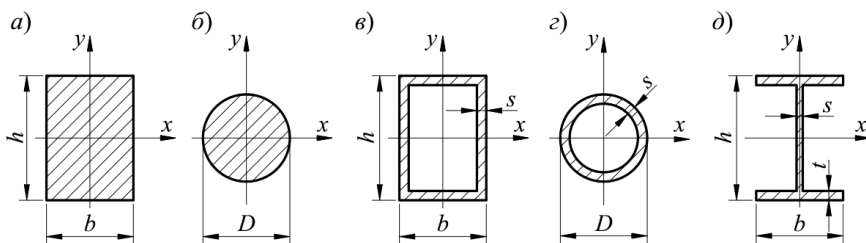


Рисунок 1 – Виды сечений стальных профилей:

*a* – прямоугольное; *б* – круглое; *в* – труба прямоугольная профильная; *г* – труба круглая; *д* – двутавр прокатный

Размеры, мм, прямоугольного сплошного сечения и трубы:  $b = 140$ ,  $h = 200$ ,  $s = 30$ ; сплошного круга и круглой трубы:  $D = 150$ ,  $s = 30$ ; двутавра:  $b = 90$ ,  $h = 180$ ,  $s = 5,1$ ,  $t = 8,1$ .

К рассматриваемым балкам прикладывалась равномерно распределенная статическая нагрузка. Чтобы обеспечить жесткость конструкций, при задании граничных условий принято, что балки опираются обоими своими концами на основание. Анализ деформаций выполнялся с учетом того, что модуль упругости стали  $E = 210$  ГПа.

В рассматриваемом случае максимальные нормальные напряжения в поперечных сечениях балки определяются по формуле

$$\sigma = \frac{ql^2}{8W_x},$$

а наибольшие деформации – из соотношения [18]

$$v = \frac{5ql^4}{384EJ_x},$$

где  $W_x$ ,  $J_x$  – момент сопротивления и момент инерции поперечного сечения относительно оси  $x$ .

С учётом эксплуатации в неблагоприятной среде, например хлоридсодержащей, принято, что в зависимости от условий, при которых эксплуатируются конструкции, скорость протекания равномерной поверхностной коррозии без учёта локальных дефектов составляет от 0,025 до 0,125 мм/год [17].

По результатам расчетов построены графики, демонстрирующие изменения напряжений от времени для разных скоростей проникновения развития коррозии (рисунки 2–6).

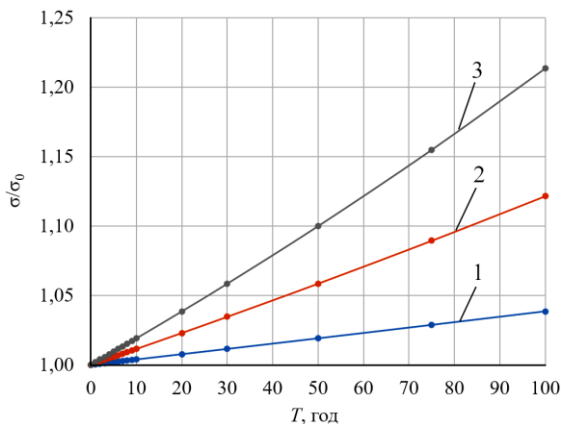


Рисунок 2 – Напряжения в прямоугольном сечении при скорости коррозии: 1 – 0,025 мм/год; 2 – 0,075 мм/год; 3 – 0,125 мм/год

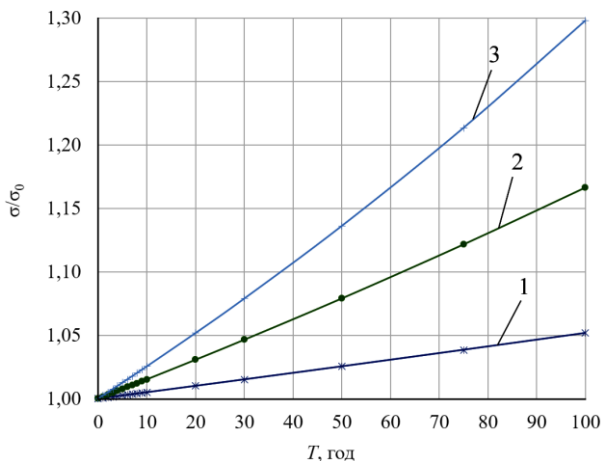


Рисунок 3 – Напряжения в круглом сечении при скорости коррозии:  
 1 – 0,025 мм/год; 2 – 0,075 мм/год; 3 – 0,125 мм/год

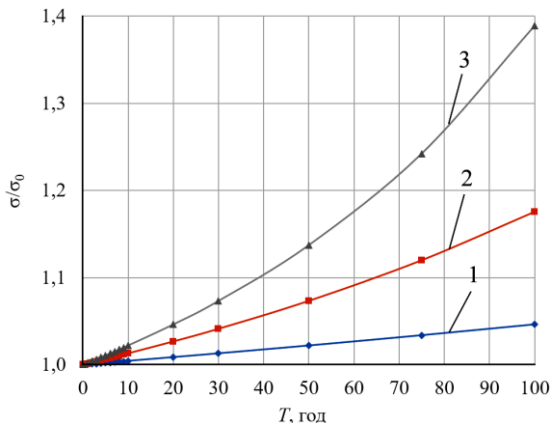


Рисунок 4 – Напряжения в прямоугольной трубе при скорости коррозии:  
 1 – 0,025 мм/год; 2 – 0,075 мм/год; 3 – 0,125 мм/год

На приведенных графиках по вертикали отложены значения напряжений  $\sigma$ , рассчитанные по отношению к значению  $\sigma_0$ , которое представляет собой максимальное напряжение в балках, не подверженных коррозии.

Из рисунков 2 и 3 следует, что изменение напряжений, связанное с коррозией балок сплошного поперечного сечения, происходит по закону, близкому к линейному. При малых скоростях проникновения коррозии увеличение напряжений за сто лет не превышает 5 % от первоначальной величины, а при увеличении скорости коррозии в 5 раз значения напряжений увеличиваются приблизительно в 6 раз.

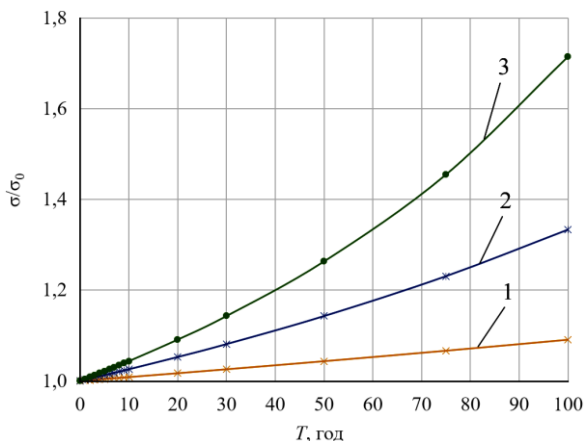


Рисунок 5 – Напряжения в круглой трубе при скорости коррозии:  
 1 – 0,025 мм/год; 2 – 0,075 мм/год; 3 – 0,125 мм/год

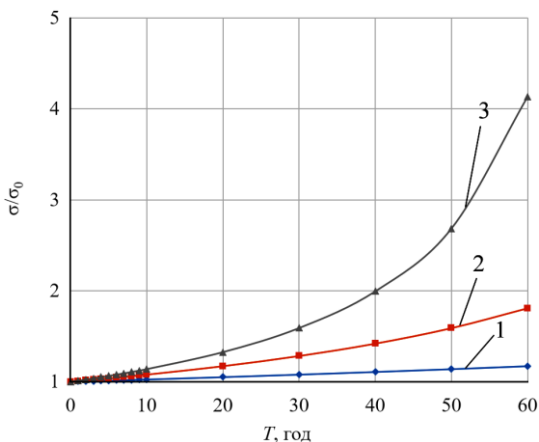


Рисунок 6 – Напряжения в двутавре прокатном при скорости коррозии:  
 1 – 0,025 мм/год; 2 – 0,075 мм/год; 3 – 0,125 мм/год

В случае несплошного поперечного сечения становится заметным нелинейный характер зависимости напряжений от времени коррозии, причем напряжения в круглой трубе растут быстрее, чем в прямоугольной (см. рисунки 4, 5), и по истечении 50 лет такое увеличение при высокой скорости коррозии может достигать 24 %, а через 100 лет – более 70 %.

Наибольший рост напряжений наблюдается у двутавровой балки (см. рисунок 6). Если при малых скоростях проникновения коррозии за 50 лет рост напряжений не превышает 15 %, то увеличение скорости распространения

коррозии до 0,125 мм/год приводит к увеличению напряжений в 2,7 раза по сравнению с начальным их значением. А к 75 годам несущая способность двутавра исчерпывается полностью. У тонкостенных балок такие их элементы, как стенка или полка, могут потерять устойчивость раньше, чем происходит потеря прочности балки в целом. Такая потеря устойчивости элемента сечения и выход его из работы резко ослабляют конструкцию, сечение становится несимметричным, что ведет к перемещению центра изгиба, закручиванию балки и быстрой потере ее устойчивости.

Таким образом, в работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния металлических балок при изгибе с учетом их коррозии. Он показал, что в некоторых условиях развитие коррозии может приводить к достаточно быстрому увеличению напряжений в конструкции и ее разрушению. Наиболее неблагоприятно воздействие коррозии на балки несплошного поперечного сечения. Полученные результаты следует учитывать при проектировании металлических конструкций сооружений с достаточно большим планируемым сроком эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Тимохова, О. М.** Исследования взаимодействия поверхности металла с агрессивной средой в зависимости от технологии обработки / О. М. Тимохова, О. Н. Бурмистрова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – № 1–2. – С. 322–326.

2 **Бондаренко, В. О.** Анализ деформирования армированной балки с учетом коррозии защитного слоя / В. О. Бондаренко, А. О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 18–24.

3 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.

4 **Межнякова, А. В.** Методы оценки долговечности армированных конструкций при действии нагрузок и агрессивных сред / А. В. Межнякова, И. Г. Овчинников // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 8. – С. 54–55.

5 Влияние внутренних и внешних факторов на кинетику процесса коррозионно-механического разрушения арматурных сталей / Н. Н. Сергеев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 410–429.

6 Влияние условий испытаний на длительную прочность высокопрочных арматурных сталей в условиях электролитического наводороживания / Д. М. Хонелидзе [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 532–540.

7 Analysis of corrosion processes kinetics on the surface of metals / M. R. Enikeev [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 383. – Article 123131.

8 **Ивакина, А. А.** Пример расчета скорости внутренней равномерной коррозии городских теплопроводов, протекающей с кислородной деполаризацией / А. А. Ивакина, Д. Б. Чапаев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. Всерос.

науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ, 2014. – Вып. 18. – Ч. 4 : Технические науки. – С. 161–164.

9 **Чапаев, Д. Б.** Учет коррозии при прогнозировании срока службы тепловых сетей / Д. Б. Чапаев, А. С. Басин // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : тр. региональной науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк : СибГИУ. – 2001. – С. 390–392.

10 **Чапаев, Д. Б.** Расчет скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей из углеродистых сталей / Д. Б. Чапаев, А. А. Оленников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 4. – С. 33–36

11 **Богданович, А. В.** Оценка ресурса труб главного циркуляционного трубопровода АЭС по критерию трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств / А. В. Богданович // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 153–161.

12 **Плювинаж, Г.** Оценка опасности коррозионных дефектов при помощи диаграммы оценки областей разрушения / Г. Плювинаж, О. Буледруа, М. Хадж-Мелиани // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 4. – С. 384–396.

13 **Овчинников, И. Г.** Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация / И. Г. Овчинников, М. Ю. Почтман. – Днепропетровск : Изд-во ДГУ, 1995. – 192 с.

14 **Овчинников, И. Г.** Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений. / И. Г. Овчинников, Г. А. Наумова. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. – 227 с.

15 **Овчинников, И. Г.** Проблемы антикоррозионной защиты мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, Е. В. Дудкин // Мир дорог. – 2012. – № 62. – С. 37–38.

16 **Коннов, Д. В.** Прогнозирование коррозионных дефектов в нефтяных трубопроводах // Universum: технические науки. – 2023. – № 10-5 (115). – С. 22–32.

17 **Иванова, О. А.** Влияние различных факторов на коррозию конструктивных элементов плавучих сооружений в морской воде / О. А. Иванова, А. В. Родькина // Вестник ВГАВТ. – 2018. – № 56. – С. 42–50.

18 Справочник по сопротивлению материалов / Е. Ф. Винокуров [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 464 с.

*V. O. BANDARENKA*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **STRESS-STRAIN STATE CHANGE OF BEAMS OF DIFFERENT CROSS SECTIONS AS A RESULT OF CORROSION**

The bending of metal beams of various cross sections under the static load influence is considered. The change in geometric parameters of sections over time associated with the material corrosion is taken into account. It is shown that intense corrosion of assortment profiles such as I-beams can cause an increase in stresses by a factor of two or more compared to their initial level.

**Keywords:** metal beam, stress-strain state, corrosion.

Получено 17.10.2023