ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКОНОМИКА

DOI 10.15826/rjcst.2024.2.002 УДК 69.07

Е. А. Вилисова [1], *З. В. Беляева* [2]
[1,2] Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: [1] vilisova_lena@mail.ru, [2] z.v.beliaeva@urfu.ru
ORCID: [2] https://orcid.org/0000-0001-7807-7102

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ С УЧЕТОМ МЕСТНОГО КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

Аннотация: В работе рассмотрена металлическая сварная 12-метровая двутавровая подкрановая балка, для которой исследовано напряженно-деформированное состояние с учетом местного коррозионного износа. Расчет конструкций производился в программном комплексе ЛИРА-САПР. В модели менялась толщина пластин с учетом значений коррозии. Рассматривалось три области локализации коррозионного износа: в нижней и средней зонах стенки, расположенные близко к середине пролета балки; в верхней зоне стенки, расположенная под нагрузкой от колеса крана. Вместе с тем учитывался диаметр коррозионного износа. По результатам расчета построены графики изменения максимальных напряжений в стенке в зависимости от глубины и диаметра коррозии, а также диаграммы изменения напряжений в зависимости от глубины и диаметра коррозионного износа относительно напряжений при отсутствии коррозии.

Ключевые слова: подкрановая балка, напряженно-деформированное состояние, локальный коррозионный износ, программный комплекс LIRA-CAD, область локализации коррозионного износа

Для цитирования: *Вилисова Е. А., Беляева З. В.* Анализ напряженно-деформированного состояния подкрановой балки с учетом местного коррозионного износа // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2024. – Т. 10. – №2. – 1002002. – DOI 10.15826/rjcst.2024.2.002.

E. A. Vilisova [1], *Z. V. Belyaeva* [2]
[1,2] Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia
e-mail: [1] vilisova_lena@mail.ru, [2] z.v.beliaeva@urfu.ru
ORCID: [2] https://orcid.org/0000-0001-7807-7102

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A CRANE BEAM TAKING INTO ACCOUNT LOCAL CORROSION WEAR

Abstract: The paper considers a metal welded 12-meter I-beam crane beam, for which the stress-strain state is studied taking into account local corrosion wear. The calculation of the structures was carried out in the LIRA-CAD software package. In the model, the thickness of

the plates changed taking into account the corrosion values. Three areas of corrosion wear localization were considered: in the lower and middle zones of the wall, located close to the middle of the beam span; in the upper zone of the wall, located under load from the crane wheel. At the same time, the diameter of corrosion wear was taken into account. Based on the calculation results, graphs of changes in maximum stresses in the wall depending on the depth and diameter of corrosion, as well as diagrams of stress changes depending on the depth and diameter of corrosion wear relative to stresses in the absence of corrosion are constructe.

Key words: crane beam, stress-strain state, local corrosion wear, LIRA-CAD software package, area of localization of corrosion wear

For citation: Vilisova E. A., Belyaeva Z. V. (2024) Analysis of the stress-strain state of a crane beam taking into account local corrosion wear. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 10(2). 1002002. (In Russ.) DOI 10.15826/rjcst.2024.2.002.

1. Введение

В числе конструктивных элементов, определяющих надежность, эксплуатационную пригодность и долговечность промышленных зданий и сооружений, особое место принадлежит подкрановым конструкциям. Подкрановые балки, являясь частью каркаса производственного здания, требуют приоритетного рассмотрения их работоспособности, так как являются наиболее нагруженными и часто повреждаемыми элементами. Выражается это в достаточно большом количестве всевозможных повреждений, практически во всех конструктивных элементах балки, и особенно в стенке [1–3].

Подкрановые системы являются не только наиболее нагруженными элементами, но и зачастую используются в различных по агрессивности коррозионных средах, что только увеличивает их повреждаемость и, как следствие, ухудшает работоспособность.

Высокое содержание агрессивных компонентов в сочетании с повышенной влажностью, достигающей 90% и более, приводит к быстрому разрушению защитных покрытий и развитию коррозионных повреждений.

При решении вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации таких конструкций возникает необходимость в изучении их действительного напряженно-деформированного состояния с учетом приобретенных за время эксплуатации повреждений [4–7].

Целью данной работы является исследование напряженно-деформированного состояния элементов подкрановой балки в зависимости от величины и области расположения коррозионного износа.

2. Виды коррозионного износа

Коррозионные разрушения бывают нескольких видов [8]:

1. Сплошная, которая охватывает всю поверхность металла, может быть равномерной или неравномерной. Неравномерная коррозия металла имеет своеобразный чешуйчатый или структурно-избирательный характер, когда разрушается один из компонентов сложного металлического сплава (рис. 1).
2. Местная коррозия характеризуется воздействием среды на отдельных участках поверхности металла. При этом различаются: коррозия пятнами, когда диаметр поражения больше глубины; язвенная коррозия, когда диаметр поражения примерно равен глубине проникновения; точечная (питтинговая) коррозия, когда диаметр поражения меньше глубины проникновения; межкристаллитная коррозия, когда разрушение сосредоточено по границам кристалла, внешний вид изделия не меняется, коррозия проникает вглубь (рис. 2).

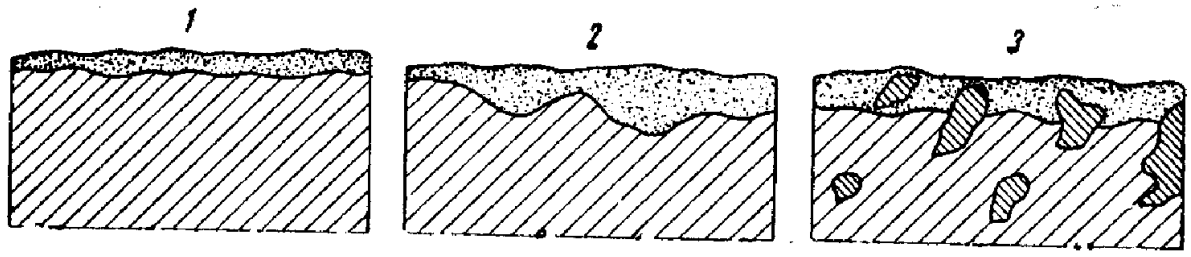

Рис. 1. Виды сплошной коррозии: *1* – равномерная; *2* – неравномерная; *3* – структурно-избирательная

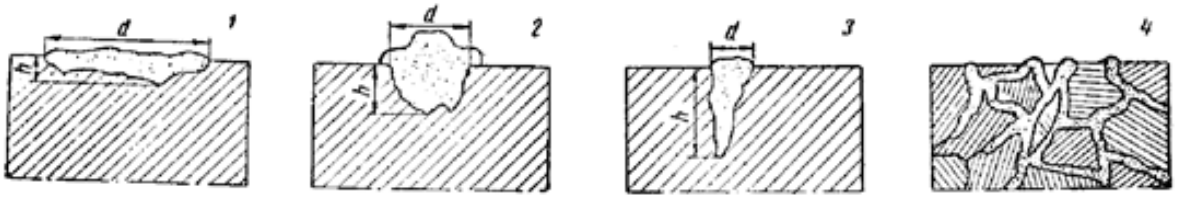

Рис. 2. Виды местной коррозии: *1* – коррозия пятнами ($d > h$); *2* – язвенная коррозия ($d \sim h$); *3* – точечная коррозия ($d < h$); *4* – межкристаллитная коррозия.

3. Подповерхностная, в это случае разрушается защитное покрытие (пленки, оксиды и т.п.) на отдельных участках. При этом разрушение локализуется преимущественно под покрытием, и продукты коррозии сосредотачиваются внутри металла. Подповерхностная коррозия часто вызывает вспучивание и расслоение металла.

4. Щелевая, здесь разрушение металла находится под прокладками, в зазорах, резьбовых креплениях, в клепаных соединения и т. п. Она чаще развивается на участке конструкции, находящейся в зазоре (щели).

3. Расчет в программном комплексе ЛИРА-САПР

Для создания объемной модели подкрановой системы, состоящей из подкрановой балки (ПБ) и тормозной конструкции, в ПК ЛИРА-САПР использовался элемент – 4 узловая пластина. Шаг узлов выбран 0,035 м. Для пластин были заданы параметры жесткости: модуль упругости, коэффициент Пуассона, толщина, удельный вес материала.

Собственный вес подкрановой системы был учтен автоматически ПК ЛИРА-САПР с $\gamma_f = 1{,}05$. Тормозная конструкция загружалась полезной нагрузкой, нагрузка от пыли задавалась на все конструкции подкрановой системы. Положение крановой нагрузки определялось согласно правилу Винклера, поскольку так возможно возникновение наибольших значений напряжений. Для дальнейшего расчета задавалась таблица расчетных сочетаний нагружений.

На рис. 3. представлена модель подкрановой системы, которая содержит 60581 элементов и 61058 узлов.

В данной работе исследуется местное коррозионное разрушение стенки ПБ пятнами. Была определена интенсивность коррозионного износа во времени, она составила: отсутствие коррозии – на начальном этапе эксплуатации конструкции; 2 мм – после 12 лет эксплуатации; 4 мм – после 22 лет эксплуатации; 6 мм – после 32 лет эксплуатации [9].

В ПК ЛИРА-САПР менялась толщина пластин с учетом значений коррозии. Рассматривалось три области

локализации коррозионного износа: в нижней и средней зонах стенки, расположенные близко к середине пролета балки; в верхней зоне стенки, расположенная под нагрузкой от колеса крана (рис. 4). Вместе с тем учитывался диаметр коррозионного износа. В табл. 1 представлены значения напряжений в зависимости от величины и области расположения коррозионных пятен.

На рис. 5–8 представлены графики изменения максимальных напряжений в стенке в зависимости от глубины и диаметра коррозии.

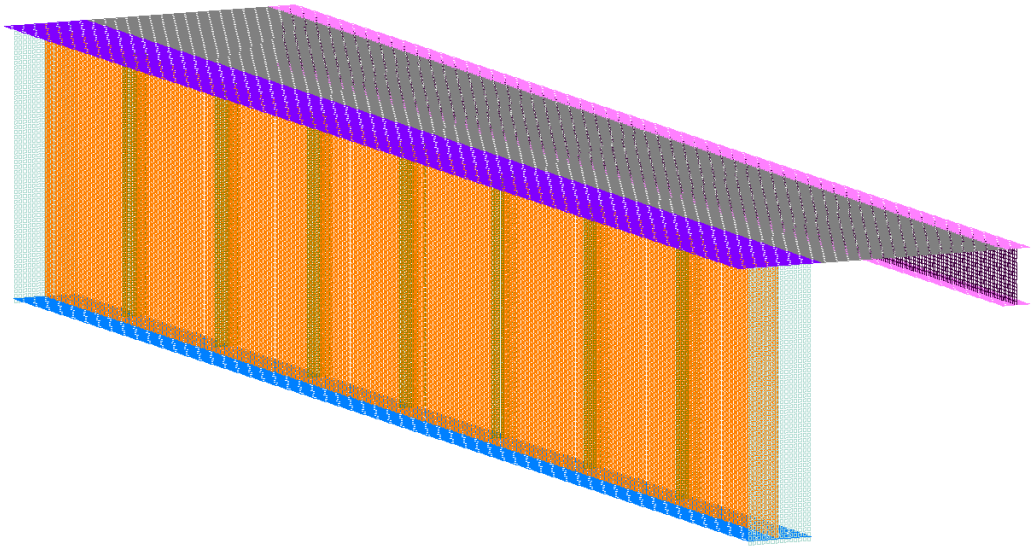

Рис. 3. Модель подкрановой системы в ПК ЛИРА-САПР

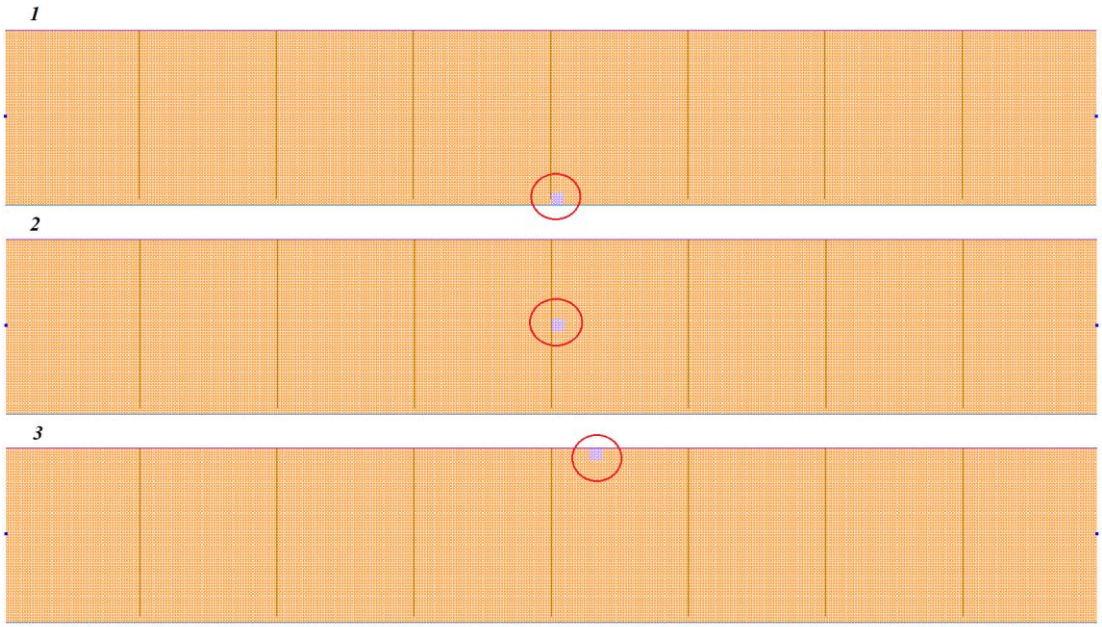

Рис. 4. Области локализации коррозионного износа, заданные в модели: *1* – в нижней зоне стенки; *2* – в средней зоне стенки; *3* – в верхней зоне стенки

Таблица 1

Значения напряжений в стенке подкрановой балки с учетом диаметра и глубины коррозионного износа

Расположение коррозионного износа	Диаметр коррозионного износа	Глубина коррозионного износа в стенке ПБ							
		0 мм		2 мм		4 мм		6 мм	
		σ, кг/см^2	σ_{loc}, кг/см^2	σ, кг/см^2	σ_{loc}, кг/см^2	σ, кг/см^2	σ_{loc}, кг/см^2	σ, кг/см^2	σ_{loc}, кг/см^2
Нижняя зона стенки	70 мм	3404,01	1693,55	3638,86	1693,55	3921,21	1693,55	4285,71	1693,55
	105 мм	3404,01	1693,55	3624,91	1693,55	4008,76	1693,55	4529,63	1693,55
	140 мм	3404,01	1693,55	3621,28	1693,55	3991,89	1693,55	4495,54	1693,55
Средняя зона стенки	70 мм	3404,01	1693,55	3403,98	1693,55	3403,94	1693,55	3403,9	1693,54
	105 мм	3404,01	1693,55	3403,94	1693,55	3403,85	1693,54	3403,74	1693,54
	140 мм	3404,01	1693,55	3403,89	1693,54	3403,74	1693,54	3403,55	1693,54
Верхняя зона стенки	70 мм	3404,01	1693,55	3404,06	1867,43	3404,13	2083,06	3483,61	2355,56
	105 мм	3404,01	1693,55	3404,12	1893,84	3404,25	2147,31	3491,33	2475,86
	140 мм	3404,01	1693,55	3404,18	1906,61	3404,37	2180,88	3465,7	2544,14

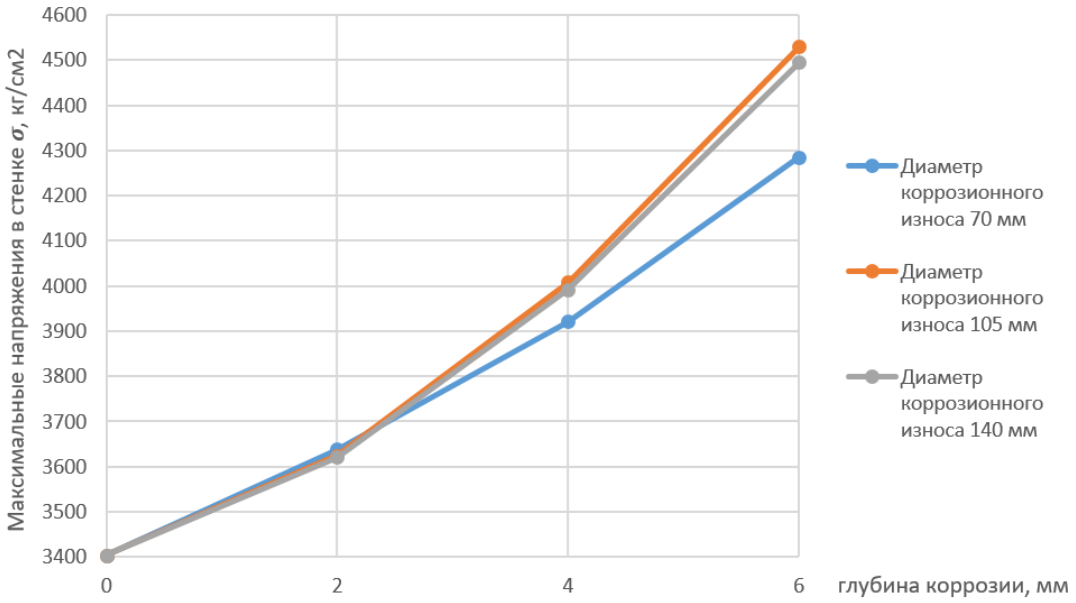

Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений в стенке от глубины коррозии (расположение коррозионного пятна в нижней зоне стенки)

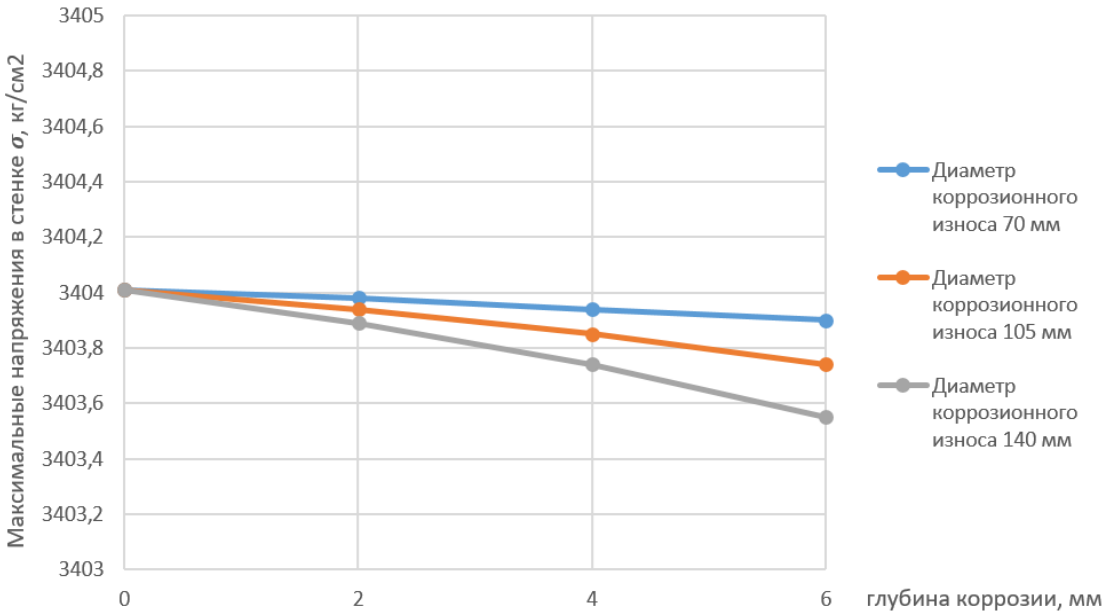

Рис. 6. Зависимость максимальных напряжений в стенке от глубины коррозии (расположение коррозионного пятна в средней зоне стенки)

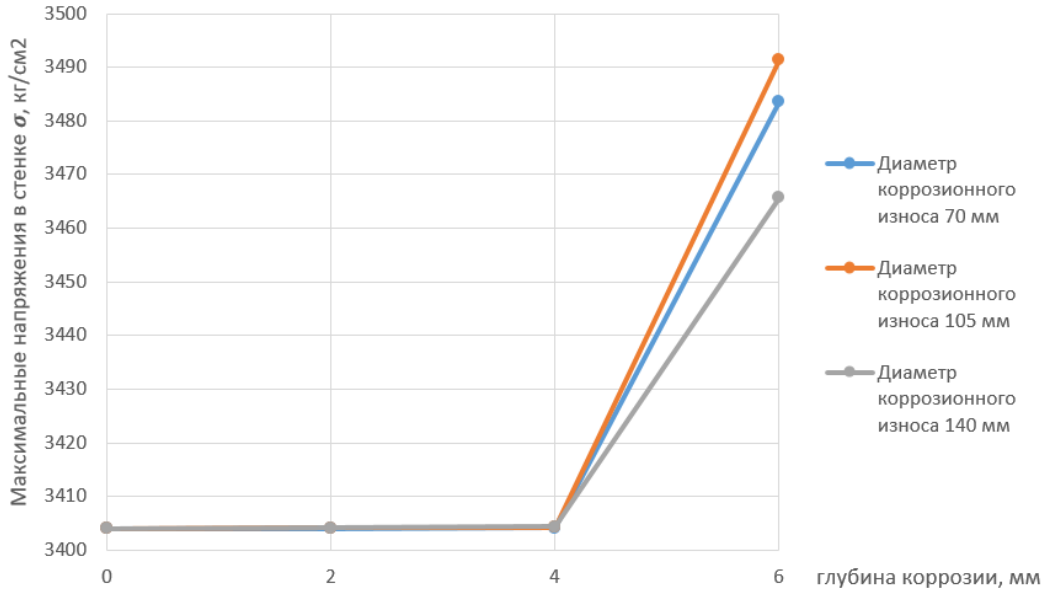

Рис. 7. Зависимость максимальных напряжений в стенке от глубины коррозии (расположение коррозионного пятна в верхней зоне стенки)

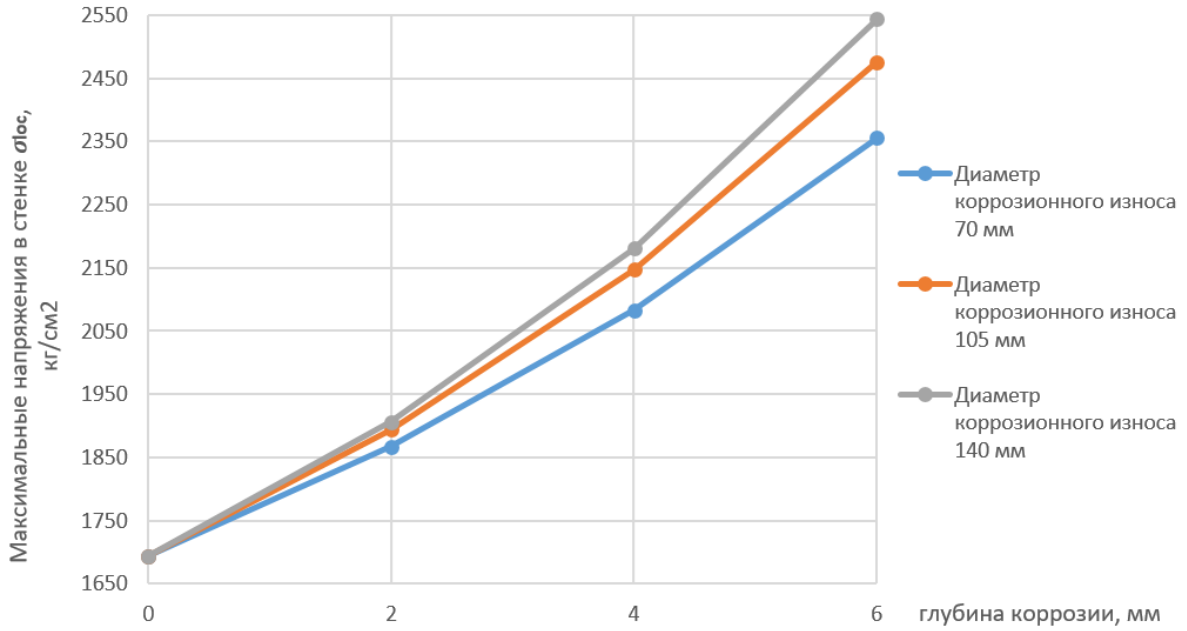

Рис. 8. Зависимость максимальных напряжений от местного давления колес крана в стенке от глубины коррозии (расположение коррозионного пятна в верхней зоне стенки)

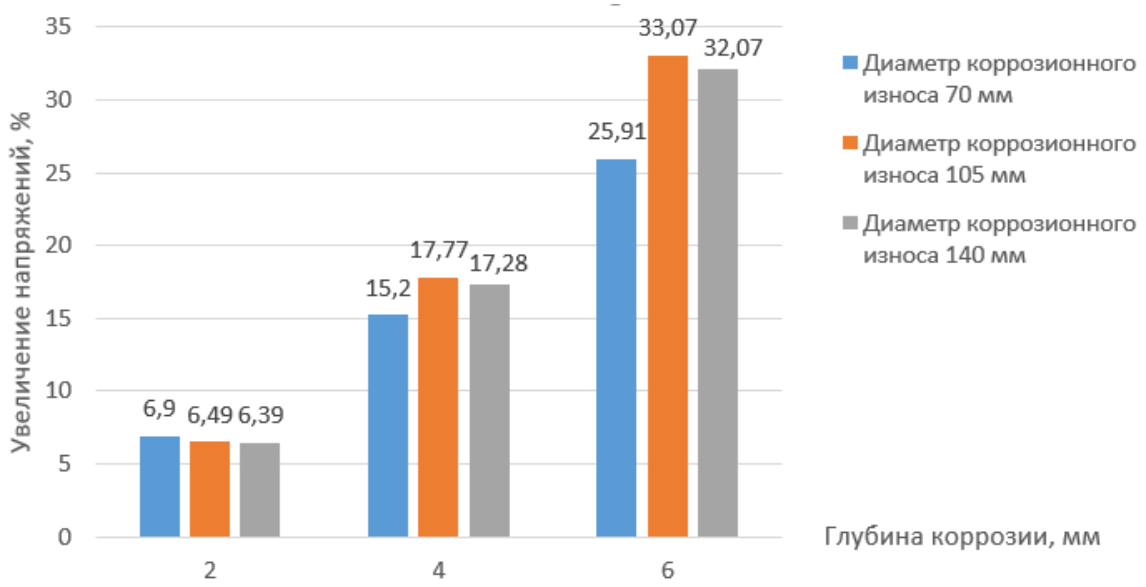

Рис. 9. Диаграмма изменения напряжений в зависимости от глубины и диаметра коррозионного износа относительно напряжений при отсутствии коррозии (расположение коррозионного пятна в нижней зоне стенки)

На рис. 9–11 представлены диаграммы изменения напряжений в зависимости от глубины и диаметра коррозионного износа относительно напряжений при отсутствии коррозии.

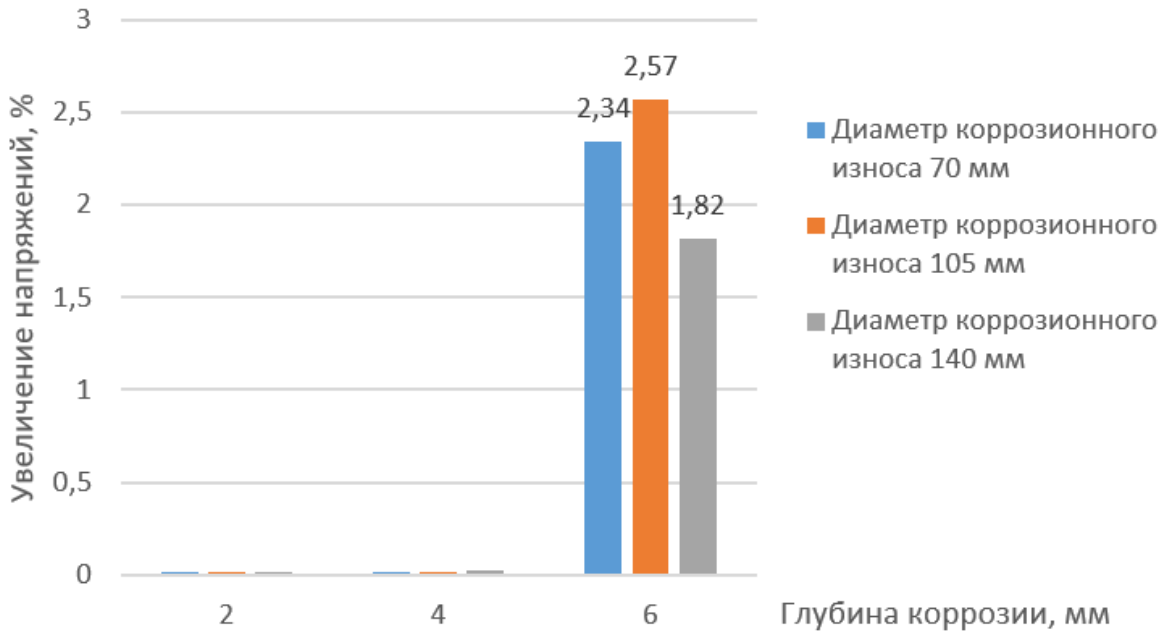

Рис. 10. Диаграмма изменения напряжений в зависимости от глубины и диаметра коррозионного износа относительно напряжений при отсутствии коррозии (расположение коррозионного пятна в верхней зоне стенки)

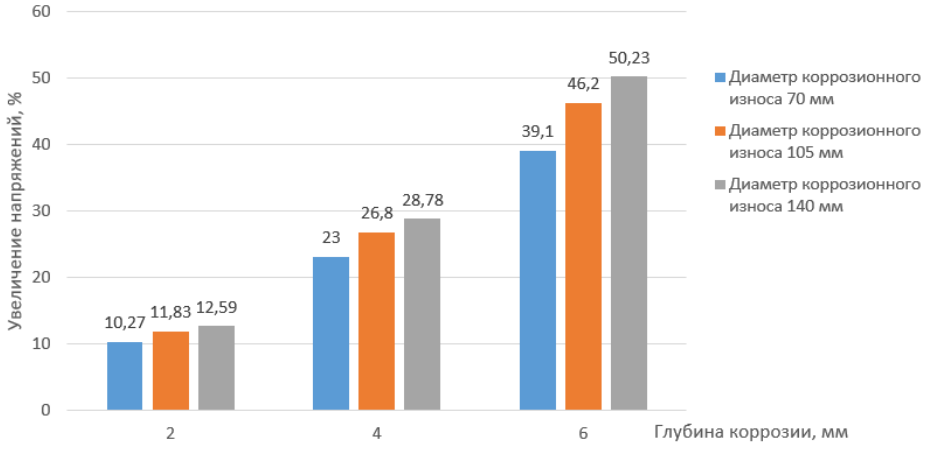

Рис. 11. Диаграмма изменения напряжений в зависимости от глубины и диаметра коррозионного износа относительно напряжений при отсутствии коррозии (расположение коррозионного пятна в верхней зоне стенки)

4. Заключение

Анализ напряженно-деформиро-ванного состояния стенки подкрановой балки с учетом коррозионного износа позволяет сделать следующие выводы:

1. При расположении коррозионного износа в нижней зоне стенки наблюдается линейная зависимость максимальных напряжений в стенке от глубины и диаметра коррозии.

2. При расположении коррозионного износа в средней зоне стенки максимальные напряжения в стенке в зависимости от глубины и диаметра коррозии уменьшаются менее чем на 1%.

3. При расположении коррозионного износа в верхней зоне стенки максимальные напряжения в стенке не изменялись и находились в зоне растяжения до величины глубины коррозии 4 мм, при дальнейшем увеличении глубины коррозии максимальные напряжения стали увеличиваться в сжатой зоне стенки.

4. Максимальные напряжения в стенке от местного давления колес крана не меняют свое значение при расположении коррозионного износа в нижней и средней зонах стенки, а при расположении в верхней зоне наблюдается линейная зависимость максимальных напряжений от глубины и диаметра коррозии.

5. Расположение коррозионного износа в верхней зоне стенки оказывает наибольшее влияние на НДС стенки.

Список используемых источников

1. *Кикин А. И.* Повышение долговечности конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин, А. А. Васильев, Б. Н. Кошутин. — М. : Стройиздат, 1969. — 415 с.
2. *Нежданов К. К.* Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчета : дис. ... д-ра техн. наук / К. К. Нежданов. — Пенза, 1992. — 250 с.
3. *Беленя Е. И.* Металлические конструкции. Общий курс : учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Веденников [и др.]. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1986. — 560 с., ил.
4. Металлические конструкции : справочник проектировщика / под общ. ред. В. В. Кузнецова. — Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. — М. : АВС, 1998. — 506 с.
5. *Васильев А. А.* Особенности работы подкрановых конструкций и повышение срока их службы / А. А. Васильев // Промышленное строительство. — 1965. — № 7. — С. 33–36.
6. *Сахновский М. М.* Обеспечение надежности стальных конструкций при эксплуатации промышленных зданий / М. М. Сахновский // Исследование надежности металлических конструкций : сб. науч. тр. — М., 1979. — С. 113–117.
7. *Киневский А. И.* Повышение долговечности сварных подкрановых балок на основе исследований в условиях эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Киневский. — Москва, 1983. — 16 с.
8. Рекомендации по проектированию защиты от коррозии строительных металлических конструкций. — М. : ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова, 1988. — 164 с.
9. *Пшеничкина В. А.* Анализ напряженно-деформированного состояния металлических подкрановых балок с учетом несоответствия реализованной конструктивной схемы / В. А. Пшеничкина, К. Н. Сухина, К. А. Сухин, М. Е. Дубовский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2020. — № 1(78). — С. 38–46.

References

1. Kikin, A. I., Vasiliev, A. A., & Koshtin, B. N. (1969). *Increasing the durability of industrial building structures* (415 pp.). Stroyizdat.
2. Nezhdanov, K. K. (1992). *Improvement of crane structures and calculation methods* (Doctoral dissertation, Penza State University, Russia).
3. Belena, E. I., Baldin, V. A., Vedennikov, G. S., et al. (1986). *Metallic structures: General course* (6th ed., 560 pp.). Stroyizdat.
4. Kuznetsov, V. V. (Ed.). (1998). *Metallic structures: Designer's reference book* (Vol. 2, Steel structures of buildings and constructions, 506 pp.). ABC Publishing.
5. Vasiliev, A. A. (1965). Features of crane structure operation and increasing their service life. *Industrial Construction, 7*, 33–36.
6. Sakhnovskiy, M. M. (1979). Ensuring the reliability of steel structures during the operation of industrial buildings. In *Research on the reliability of metal structures* (pp. 113–117). Moscow.
7. Kinevskiy, A. I. (1983). Increasing the durability of welded crane beams based on operational studies (Doctoral dissertation, Moscow State University, Russia).

8. *Recommendations for designing corrosion protection of construction metal structures*. (1988). TsNIIprojectstalconstruction named after Melnikov (164 pp.).
9. Pshenichkina, V. A., Sukhina, K. N., Sukhin, K. A., & Dubovskiy, M. E. (2020). Analysis of the stress-strain state of metallic crane beams considering the mismatch of the implemented structural scheme. *Bulletin of Volgograd State Architectural and Construction University. Series: Construction and Architecture, 1(78)*, 38–46.

Получено: 10.10.24
Прошла рецензирование: 15.10.24
Принята к публикации: 16.10.24
Доступно он-лайн: 17.01.25

Received: 10.10.24
Revised: 15.10.24
Accepted: 16.10.24
Available on-line: 17.01.25