

Оценка напряженно-деформированного состояния монолитного перекрытия с коррозионными повреждениями бетона и арматуры

Н.С. Курченко, В.В. Кислова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва

Аннотация: Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния монолитной плиты перекрытия с учетом коррозионных повреждений бетона и арматуры сжатой и растянутой зон в пролетной части плиты в ПК ЛИРА-САПР. Рассмотрено 6 вариантов коррозионных повреждений в зависимости от площади распространения и степени деградации. Расчеты проведены с учетом физической и геометрической нелинейности. Выявлены особенности изменения прогибов конструкции при различных вариантах коррозионных повреждений и уровнях нагружения плиты перекрытия. Проанализированы перераспределения усилий в пролетах и на опорах, возникающие при локальных изменениях жесткостей бетона и арматуры. При принятых конструктивных характеристиках и вариантах повреждений не выявлена стадия разрушения конструкции.

Ключевые слова: монолитное перекрытие, коррозионные повреждения железобетона, численный анализ, перераспределение усилий, несущая способность, деформативность.

Введение

В процессе строительства или эксплуатации зданий и сооружений неизбежно случаются ситуации, приводящие железобетонную конструкцию в уязвимое по отношению к воздействию агрессивных сред состояние. Такие ситуации могут возникать в том числе из-за ошибок при проектировании или при возведении объекта. Иногда по определенным причинам строительство приостанавливается без консервации объекта капитального строительства. Длительное увлажнение железобетонных конструкций в процессе эксплуатации возможно из-за протечек инженерных коммуникаций или нарушений герметичности гидроизоляционного ковра кровли. В таких условиях материал годами испытывает неблагоприятные воздействия окружающей среды, что может привести к возникновению в том числе и таких дефектов, как коррозия арматуры и бетона. Эти повреждения относятся к несиловым, и могут приводить к уменьшению несущей способности конструкций [1-3].

В настоящее время строительными нормами не регламентируется методика оценки несущей способности железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений. При этом отечественные и зарубежные исследователи занимаются анализом напряженно-деформированного состояния коррозионно-поврежденных изгибаемых элементов [4-6], сжатых элементов [7, 8], экспериментальной оценкой прочности подвергнутых коррозии железобетонных конструкций [9, 10]. В нашей работе осуществлен анализ НДС монолитной плиты перекрытия с коррозионными повреждениями, расположенными в пролетной части плиты.

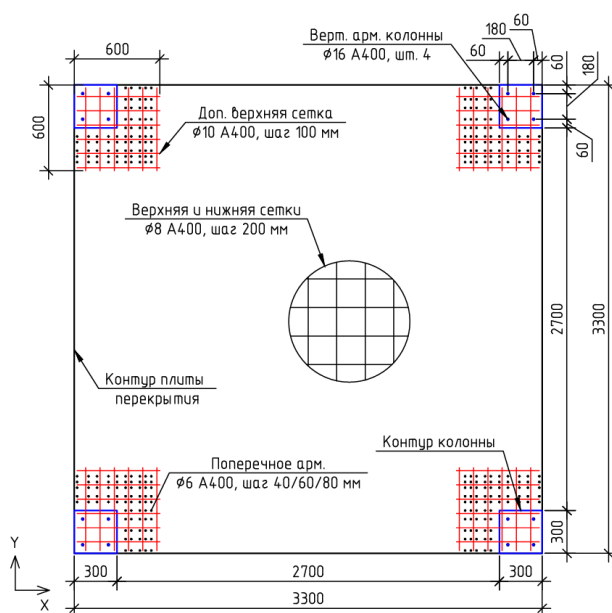
Метод расчета

Для проведения численного исследования использовался программный комплекс ЛИРА-САПР. Модель монолитного перекрытия представляет собой плоскую плиту толщиной 0,15 м, опертую на колонны сечением 0,3х0,3 м. Шаг и пролет колонн в осях составляет 3 м. Параметры конструирования подобраны исходя из линейного расчета плиты на действие эксплуатационной нагрузки, составляющей 10 кН/м².

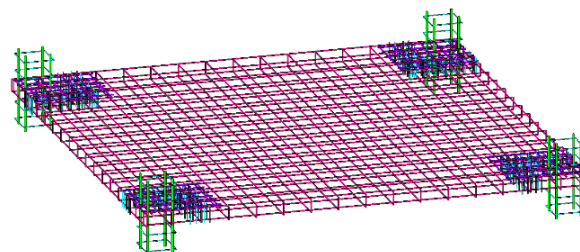
Плита перекрытия запроектирована из бетона класса В20. Армирование плиты (рис. 1) включает: верхнюю и нижнюю сетки из Ø8-A400 с шагом 200 мм; дополнительные верхние арматурные сетки в надопорных зонах из Ø10-A400 с шагом 100 мм; поперечное армирование в пределах контура продавливания колонн – Ø6-A400 с шагом 40/60/80 мм.

Объемная конечно-элементная модель (рис. 2) состоит из следующих КЭ: 1. пространственные восьмиузловые КЭ236 – для бетонных элементов плиты (размеры 2х2х1 см и 2х2х1,5 см) и для колонн (размеры 2х2х4 см); 2. стержневые КЭ410 – для арматурного каркаса.

Рассматривались коррозионные повреждения, расположенные в пролетной части плиты перекрытия. Площади повреждений составляют 6%, 25% и 41% от общей площади плиты (рис. 3).

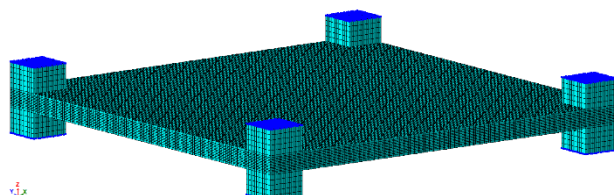


а)

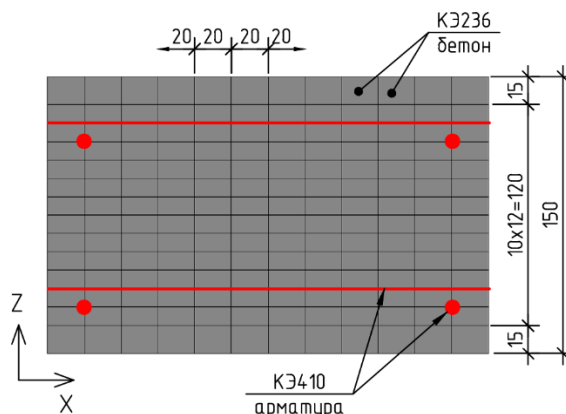


б)

Рис. 1. – Армирование плиты перекрытия: а) схема армирования; б) 3D вид арматурного каркаса в КЭ-модели



а)



б)

Рис. 2. – К расчету плиты перекрытия: а) общий вид объемной КЭ-модели; б) поперечное сечение КЭ-модели плиты перекрытия

Расчет осуществлялся с учетом физической и геометрической нелинейности. Диаграммы деформирования приняты по нормативной документации (СП 63.13330). С целью учета геометрической нелинейности загрузку плиты равномерно-распределенной нагрузкой происходило последовательно с помощью шагового алгоритма.

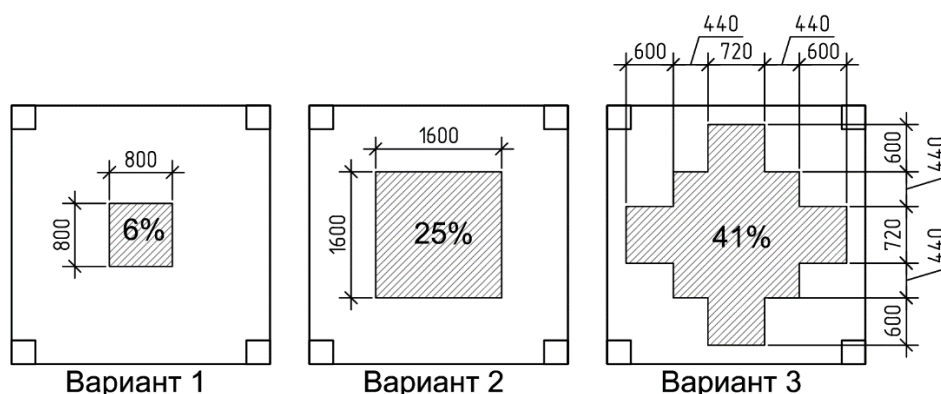


Рис. 3. – Варианты распространения коррозионных повреждений

В расчетах принят случай, когда механические и физические характеристики материалов (бетона и арматурной стали) деградируют одновременно в сжатой и растянутой зонах. Глубина повреждения бетона при первой степени равна 45 мм, при второй – 55 мм.

Для учета снижения жесткости коррозионно-поврежденного бетона использована функция коэффициента повреждений [11], соответствующая затухающей кинетике коррозии [1]:

$$K_{(z)}^* = -\frac{(1 - K^*)}{\delta^2} \cdot z^2 + \frac{2 \cdot (1 - K^*)}{\delta} \cdot z + K^*, \quad (1)$$

где $K^* < 0$ – коэффициент повреждения на поверхности железобетона, соответствующий наибольшему снижению физических характеристик; $K_{(z)}^*$ – коэффициент повреждения по высоте сечения в диапазоне $0 < z < \delta$; δ – глубина повреждения бетона; z – координата середины слоя бетона в диапазоне $0 < z < \delta$.

С помощью умножения коэффициента повреждения $K_{(z)}^*$ на нормативное сопротивление сжатию/растяжению моделировалось изменение прочности слоев сечения (рис. 4). Представленным степеням коррозии бетона

соответствуют две степени коррозии арматуры. В первом случае время коррозии составляет 5 лет, а во втором – 10 лет.

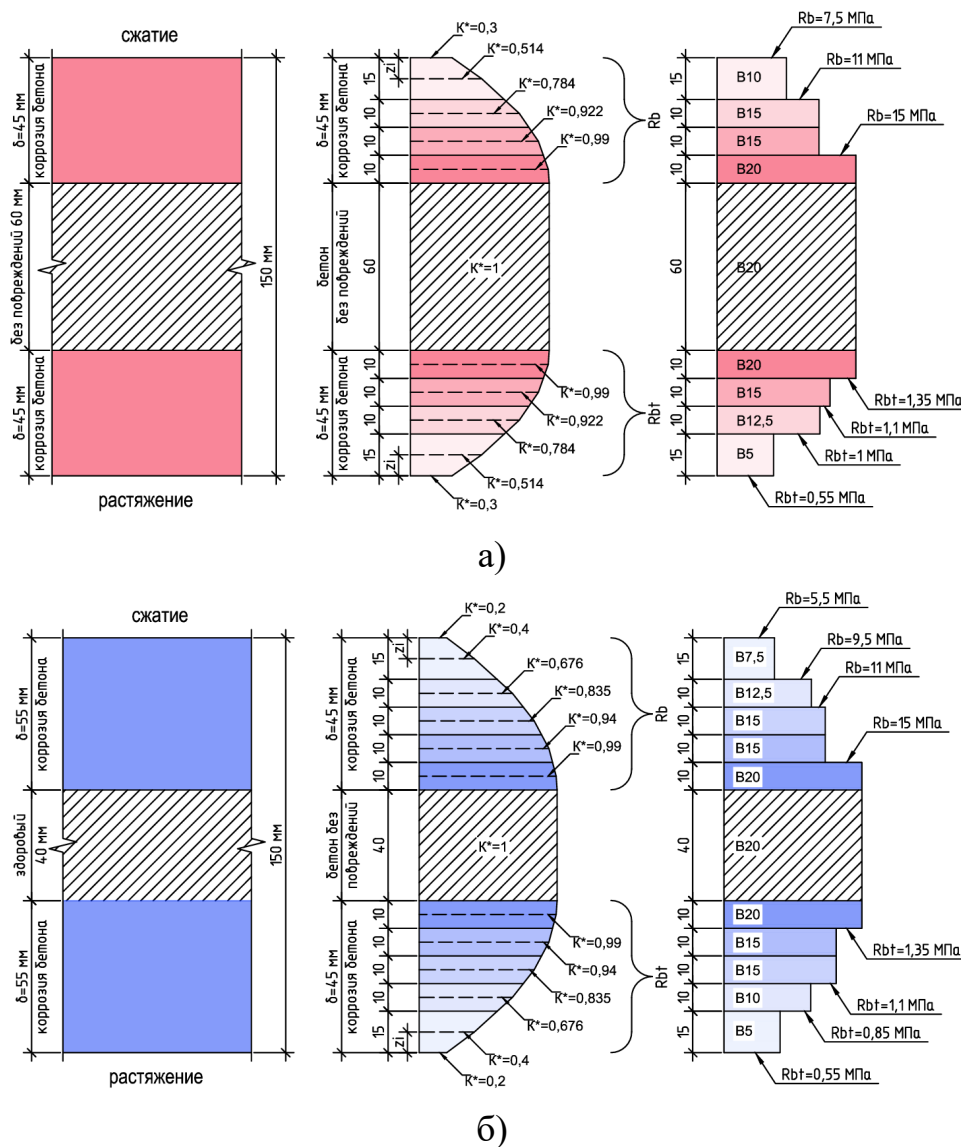


Рис. 4. – Модель коррозии бетона в нормальном сечении:

а) степень 1 ($K^*=0,3$; $\delta=45$ мм); б) степень 2 ($K^*=0,2$; $\delta=55$ мм)

Потерянная площадь сечения определена по следующей формуле [9]:

$$\Delta A_s = R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R - \delta}{R}\right) - (R - \delta) \cdot \sqrt{R^2 - (R - \delta)^2}, \quad (2)$$

где R – первоначальный радиус арматурного стержня; δ – глубина коррозионного повреждения стержня, зависящая от времени действия коррозии, величины защитного слоя и эмпирических коэффициентов.

Таким образом, расчету и анализу подлежали 7 расчетных схем, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица №1

Характеристики анализируемых расчетных схем

	Площадь коррозии (рис. 4), %	Модель коррозии бетона (рис. 5), степень	Диаметр стержней после коррозии, мм		Потерянная площадь сечения стержней, %	
			Ø8-A400	Ø10-A400	Ø8-A400	Ø10-A400
Базовая	—	—	8	10	0	0
6% (степень 1)	6	1	7,48	9,55	12,6	8,7
6% (степень 2)	6	2	6,90	9,08	25,6	17,6
25% (степень 1)	25	1	7,48	9,55	12,6	8,7
25% (степень 2)	25	2	6,90	9,08	25,6	17,6
41% (степень 1)	41	1	7,48	9,55	12,6	8,7
41% (степень 2)	41	2	6,90	9,08	25,6	17,6

Результаты исследования и выводы

По результатам нелинейных расчетов объемных КЭ-моделей перекрытия выявлено, что приложенная нагрузка не доводит плиту до разрушения. Это связано с тем, что армирование плиты принято на основании простого линейного расчета плоской модели, в котором заложены коэффициенты запаса. Кроме того, арматурные сетки заложены и в сжатых зонах изгиба, вследствие чего достаточно большая часть сжимающих усилий передается на арматурные стержни.

На рис. 5 приведен график, отображающий зависимость прогиба от уровня нагружения для всех исследуемых случаев коррозионных повреждений. Из графика видно, что наличие коррозионных повреждений любой степени приводит к увеличению прогиба изгибаемой конструкции.

На рис. 6 приведены графические зависимости, отражающие относительный прирост прогибов плит всех степеней повреждения (в процентах от прогибов неповрежденной плиты) для различных уровней нагружения.

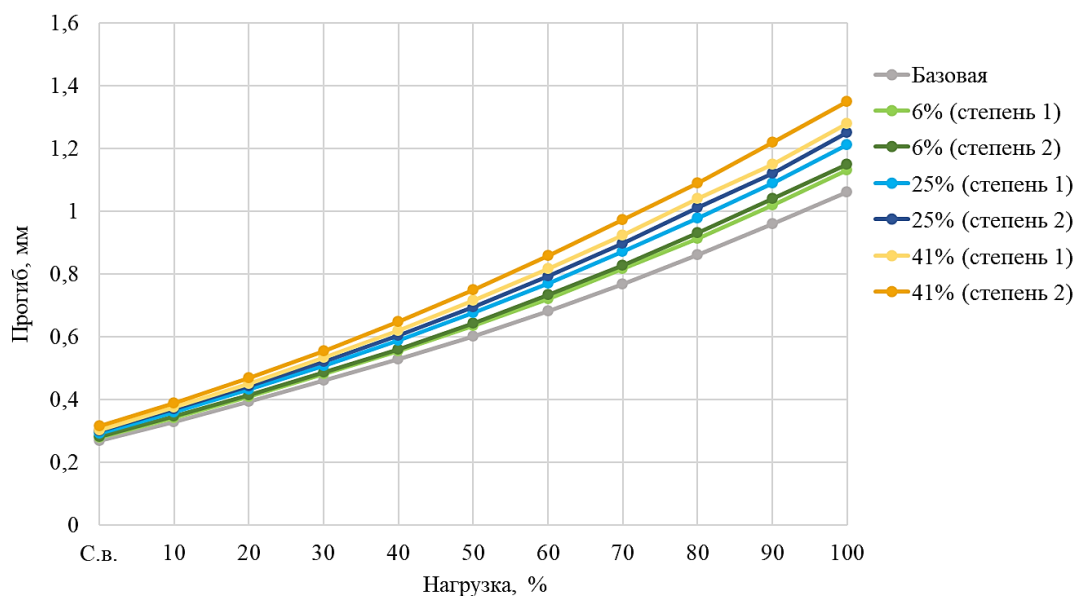


Рис. 5. – График зависимости прогиба от уровня нагрузки для различных степеней коррозионных повреждений

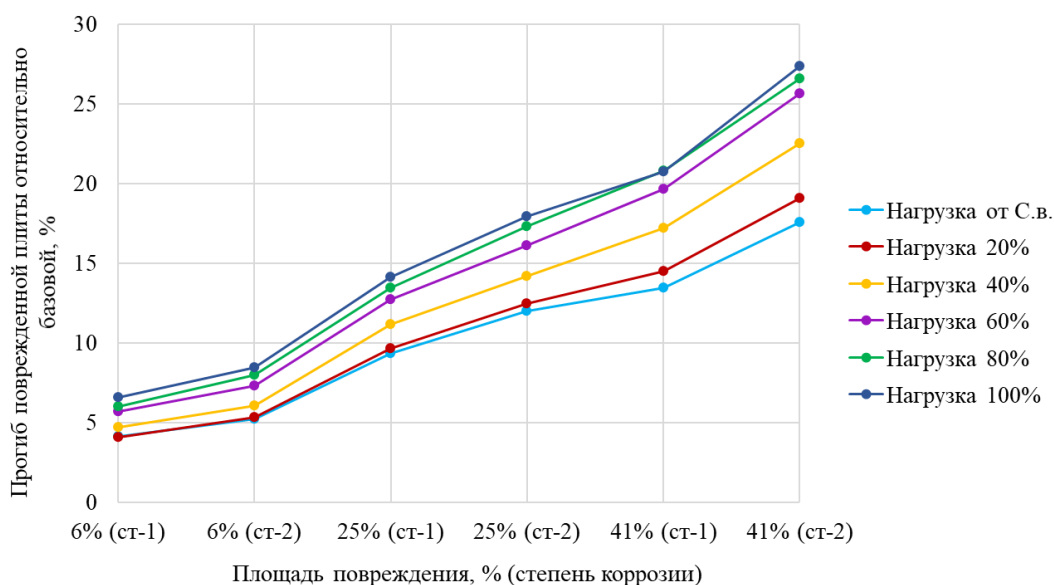


Рис. 6. – График зависимости прогиба поврежденной плиты относительно базовой от степени повреждения для различных уровней нагружения

По результатам анализа прогибов можно отметить, что увеличение площади коррозионных повреждений в большей мере влияет на деформативность плиты, чем увеличение степени коррозии. При этом, чем больше площадь, тем сильнее влияние степени. При нагружениях от 40% до

60% от полного значения эксплуатационной нагрузки происходит наибольший прирост прогибов для всех случаев повреждения. Для случая второй степени коррозии, распространенной на 41% площади плиты (см. табл. 1) при полном нагружении эксплуатационной нагрузкой (100%) максимальный прогиб составил 1,35 мм, или 27,4% от прогиба базовой плиты (т.е. без коррозионных повреждений).

Перераспределения усилий в коррозионно-поврежденных плитах анализировались при 100% нагрузке путем сравнения усилий в растянутой арматуре в пролете и на опорах. На рис. 7, 8 приведены графики увеличения растягивающих усилий в поврежденных плитах относительно неповрежденной. Наиболее нагруженные пролетные сечения расположены у свободных краев между колонн. При уменьшении жесткостей бетона и арматуры в середине плиты происходит перераспределение усилий, которое, в частности, проявляется в увеличении растягивающих усилий арматурных стержней нижней сетки в установленных опасных сечениях и, как следствие, стержней верхней сетки вокруг опор.

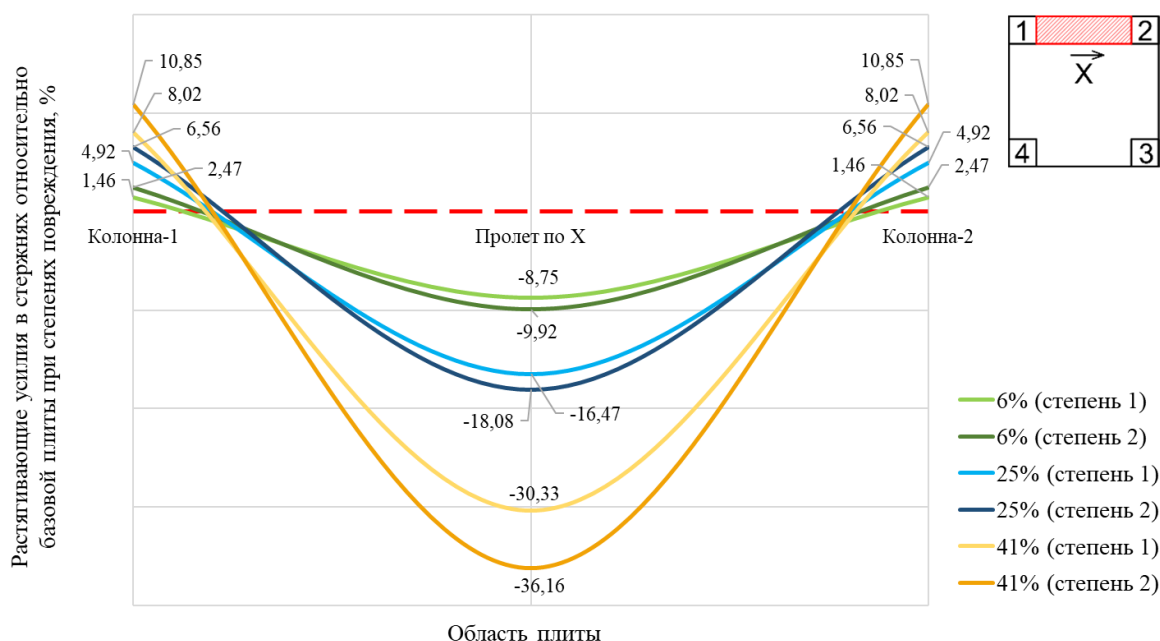


Рис. 7. – График относительного увеличения растягивающих усилий в арматуре в пролете и на опорах вдоль оси X

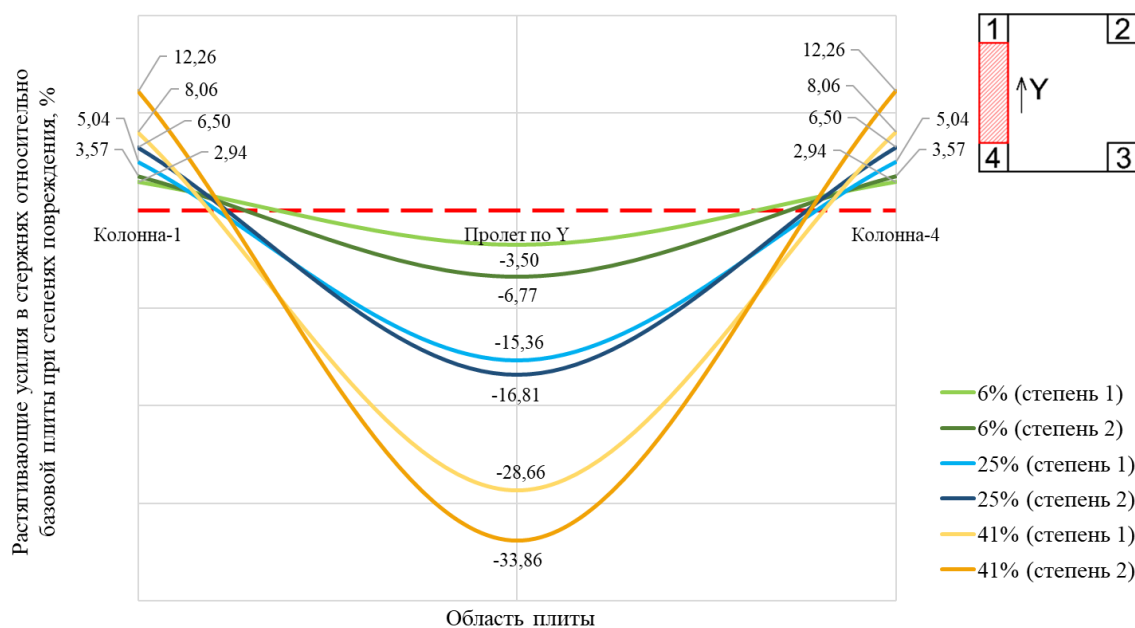


Рис. 8. – График относительного увеличения растягивающих усилий в арматуре в пролете и на опорах вдоль оси Y

Графики на рис. 7, 8 подтверждают зависимости, выявленные при анализе прогибов. А именно: при небольшой площади повреждения (6%, 25%) влияние степени коррозии незначительно, при большей площади (41%) – степень коррозии оказывает сильное влияние. Увеличение усилий в пролете примерно в 2-6 раз больше, чем на опорах.

По результатам проведенных вычислений можно сделать следующие выводы. Увеличение площади коррозионных повреждений в большей мере влияет на прочность и жесткость плиты, чем увеличение глубины коррозии. При этом происходит перераспределение усилий в соответствии с уровнем деградации жесткостей участков плиты перекрытия. Растягивающие усилия в неповрежденных коррозией арматурных стержнях в пролетах между опорами и в надпорных зонах увеличиваются, что ведет к снижению несущей способности конструкции. Рассмотренные сценарии коррозионных повреждений приводят к существенному снижению ее жесткости (более чем на 25%) и прочности (более чем на 30%), что требует обязательного учета

коррозии при проектировании усиления и восстановления несущей способности железобетонных конструкций зданий.

Литература

1. Бондаренко В.М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 13-17.
2. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete. Engineering structures. 2021. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111392.
3. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage // Engineering Optimization. 2023. V. 55. № 11. Pp. 1905-1922.
4. Курченко Н.С., Гришков В.А. К оценке жесткости коррозионно-повреждаемых железобетонных балок // Инженерный вестник Дона. 2022. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2022/7881/.
5. Попов Д.С. Численные исследования перераспределений усилий в статически неопределимых коррозионно-поврежденных железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8362/.
6. Тамразян А.Г. Перераспределения усилий в статически неопределимых корродированных железобетонных балках // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 8. № 4. С. 5-13.
7. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Safety of reinforced concrete columns: effect of initial imperfections and material deterioration under emergency actions // Buildings. 2023. V. 13. № 4. P. 1054.
8. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В., Попов Д.С., Курченко Н.С. Несущая способность коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов

при поперечном нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. №9. С. 5-11.

9. Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21. № 1(70). С. 43–49.

10. Nasser H., Van Steen C., Vandewalle L., Verstrynghe E. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. Construction and Building Materials. 2021. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.

11. Фролов Н.В., Смоляго Г.А. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона сжатой зоны // Безопасный и комфортный город: Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской научно-практической конференции, Орёл, 27 сентября 2019 года. Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2019. С. 121-127.

References

1. Bondarenko V.M. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2009. № 5 (226). Pp. 13-17.

2. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Engineering structures. 2021. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111392.

3. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Engineering Optimization. 2023. V. 55. № 11. Pp. 1905-1922.

4. Kurchenko N.S., Grishkov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2022/7881/.

5. Popov D.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8362/.

6. Tamrazyan A.G. Zhelezobetonnye konstrukcii. 2024. V. 8. № 4. Pp. 5-13.

7. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Buildings. 2023. V. 13. № 4. P. 1054.
8. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V., Popov D.S., Kurchenko N.S. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2023. №9. Pp. 5-11.
9. Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. V. 21. № 1(70). Pp. 43–49.
10. Nasser H., Van Steen C., Vandewalle L., Verstrynge E. Construction and Building Materials. 2021. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.
11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Bezopasnyj i komfortnyj gorod: Sbornik nauchnyh trudov po materialam III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Oryol, 27 sentyabrya 2019 goda. Oryol: Orlovskij gosudarstvennyj universitet imeni I.S. Turgeneva, 2019. Pp. 121-127.

Дата поступления: 10.04.25

Дата публикации: 25.05.25