

К оценке прочности изгибаемых железобетонных элементов с дефектами и повреждениями

Л. А. Шарафутдинов, Р. М. Маннапов

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: Статья посвящена оценке прочности железобетонных элементов с дефектами и повреждениями. В ней рассматриваются основные виды дефектов (коррозия арматуры, трещины, деформации, усадка, отслаивание бетона и др.), их причины и последствия. Также в документе представлены различные методики расчета остаточной несущей способности конструкций с учетом этих дефектов, включая формулы для оценки влияния коррозии, трещин и других повреждений на прочность балок. Отмечается, что текущие методики в основном фокусируются на анализе одного типа дефекта, а комплексный подход к оценке множественных повреждений требует дальнейших исследований. Результаты исследований могут быть полезны для разработки рекомендаций по эксплуатации и ремонту железобетонных конструкций, а также для улучшения методов оценки их безопасности в условиях длительной эксплуатации.

Ключевые слова: прочность, несущая способность, повреждение, дефект, трещина, коррозия, деградация, эксперимент, железобетон, балка.

Введение

Со временем эксплуатационные нагрузки, воздействие агрессивных факторов внешней среды, а также технологические дефекты могут приводить к ухудшению механических свойств железобетонных конструкций, что в свою очередь может существенно снизить их прочность и жёсткость [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка инженерных методов расчёта, которые позволят точно оценить несущую способность конструкций, имеющих дефекты и повреждения. Например, коррозия арматуры, развитие трещин, а также другие повреждения могут значительно изменить структуру материала, что влияет на прочностные и деформационные характеристики конструкций.

Для оценки прочности поврежденных железобетонных конструкций используют различные нормативные документы, регламентирующие их проектирование, эксплуатацию и восстановление. Так, в СП 63.13330.2018 изложены требования к расчету и проверке прочности железобетонных

элементов. Кроме того, ГОСТ 27751-88 содержит методики определения прочности изделий, в том числе с учетом повреждений. В СП 349.1325800.2017 и СП 13-102-2003 указано на необходимость оценки остаточной несущей способности конструкций с существующими дефектами. Однако действующие нормативные материалы недостаточно конкретно раскрывают методические подходы и расчетные формулы для выполнения таких оценок, что затрудняет разработку проектной документации для железобетонных несущих конструкций.

Основные повреждения и дефекты

Железобетонные конструкции могут подвергаться различным дефектам и повреждениям, которые существенно снижают их эксплуатационные характеристики, долговечность и безопасность. Далее приведены основные повреждения и дефекты встречающиеся в железобетонных конструкциях [2]:

1. Коррозия арматуры. Это один из самых распространенных дефектов, возникающих из-за воздействия влаги, кислорода и агрессивных химических веществ на арматуру внутри бетона. Коррозия (рис. 1) приводит к увеличению объема арматуры, что вызывает внутренние напряжения и трещины в бетоне. К основным причинам повреждения относятся недостаточная защита арматуры, проникновение воды, низкое качество бетона и воздействие химических веществ, таких как хлориды. Эти факторы ведут к снижению прочности и срока службы конструкции, а также могут вызвать развитие трещин и обрушений.

2. Трещины (рис. 2). Могут возникать по различным причинам, включая усадку бетона, коррозию арматуры, перегрузки или неправильное проектирование. Данное повреждение приводит к потере прочности и долговечности.

Трещины могут быть следующих типов:

- Усадочные трещины, образующиеся в процессе высыхания бетона.
-



Рис. 1. – Коррозия арматуры

- Трещины, возникающие вследствие перегрузок или деформаций конструкции.
- Трещины, вызванные неравномерным оседанием фундамента.



Рис. 2. – Трещина в железобетонной балке

3. Деформации. Данное повреждение включает в себя прогибы, сдвиги или перекосы конструкций, возникающие из-за длительных статических или динамических нагрузок. Причинами является перегрузка, неправильное проектирование, ошибки при монтаже, деформация основания. Последствиями является уменьшение безопасности эксплуатации, появление трещин и разрушений.

4. Избыточная усадка. При затвердевании и высыхании бетонная смесь может изменять свои размеры, сокращаясь в объеме. Это явление часто становится причиной появления трещин и различных деформаций в конструкциях. Причинами являются несоответствие технологии

производства бетона, чрезмерное испарение влаги, которые приводят к нарушению целостности конструкции, ухудшению ее эксплуатационных характеристик.

5. Отслаивание и выкрашивание бетона. В результате воздействия внешней среды, таких как перепады температуры, влажность или химические реакции, бетон может отслаиваться от арматуры (рис. 3) или выкрашиваться. Причинами данного повреждения являются коррозия арматуры, агрессивные химические воздействия, неправильное выполнение защитных слоев, что в свою очередь приводят к ослаблению связи между бетоном и арматурой, снижению прочности конструкции.



Рис. 3. – Отслоение бетона

6. Появление пузырей, раковин и пор (рис. 4) в бетоне - это дефект, при котором в бетоне образуются пустоты, что снижает его прочность и плотность. Причиной является плохое уплотнение смеси, неправильное соотношение компонентов, нарушение технологии заливки. К последствиям можно отнести: уменьшение прочности бетона, потеря герметичности, снижение долговечности.

7. Проблемы в узлах сопряжения и рабочих швах. Неправильное выполнение соединений железобетонных элементов или несоответствие швов может привести к их ослаблению и разрушению. Причины: Ошибки в

проектировании, плохое качество материалов, неправильное выполнение работ. Последствия: уменьшение несущей способности, повреждение структуры конструкции.

8. Нарушение проектных геометрических размеров [3] при расчете железобетонных элементов может проявляться в нескольких формах. Вот основные виды нарушений:

- нарушение размеров элементов конструкций;
- нарушение толщины защитного слоя бетона;
- ошибки в расположении и размерах арматуры;
- нарушение размеров при монтажных работах.

9. Нарушение однородности бетона. Нарушение однородности бетона происходит, если компоненты смеси не равномерно распределены, что может быть вызвано некачественным замесом, неправильным дозированием материалов или ошибками при укладке и уплотнении. В результате происходит уменьшение прочностных характеристик бетона, появлению дефектов и сокращению срока службы конструкции. Чтобы избежать этого, важно соблюдать технологические процессы, контролировать качество материалов и условий твердения бетона.

Для обеспечения долговечности и безопасности железобетонных конструкций необходимо проводить регулярные осмотры, своевременно выявлять дефекты и предпринимать меры по их устранению. Однако не всегда удаётся исключить дефекты и повреждения, вызванные ошибками при строительстве, проектировании и эксплуатации. В большинстве случаев приходится определять фактическую несущую способность с имеющимися несовершенствами. Далее рассмотрим некоторые формулы и выражения, позволяющие учесть отдельные дефекты и оценить прочность конструкций при эксплуатации.

Аналитические данные по учёту дефектов и повреждений на прочность железобетонных балок

В работе Пахомовой Е.Г. [4] использованы предложения А.И. Попеско, С. И. Меркулова о том, что свойства коррозионно-поврежденного бетона, по аналогии с неповрежденным бетоном, определяются его структурой. Характеристики бетона с повреждениями зависят от значений деградации бетона $K_R(Z)$, $K_E(Z)$ при коррозии и вычисляются по формулам:

$$R_{b,cr} = K_R(Z) \cdot R_b; \quad (1)$$

$$R_{bt,cr} = K_R(Z) \cdot R_{bt}; \quad (2)$$

$$E_{b,cr} = K_E(Z) \cdot E_{b,cr}. \quad (3)$$

В научной работе [5] для оценки прочности железобетонных балок с трещинами применяется формула, основанная на значении максимальных напряжений в бетоне сжатой зоны $\sigma_b^{v,h}$:

$$M_b^{v,h} = \sigma_b^{v,h} \cdot \xi \cdot (1 - 0,5\xi) \cdot b \cdot h_0^2. \quad (4)$$

На основе экспериментальных исследований [6–8] была разработана методика для расчета остаточной несущей способности конструкций. При этом, для оценки прочности бетона в сжатой части сечения балок, где наблюдались нормальные трещины в растянутой зоне, было рекомендовано использование специальной формулы:

$$R_b^y(t) = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \cdot h(t)}} \cdot k_v, \quad (5)$$

где $h(t)$ – средняя высота нормальной трещины, k_v – эмпирический коэффициент, рассчитываемый путем интерполяции с учетом суммарной длины нормальных трещин, их количества n , высоты сечения балки h и процента армирования сечения μ .

Анализ экспериментальных данных и теоретических расчетов показывает, что наличие трещин в изгибаемых железобетонных элементах оказывает влияние на их напряженно-деформированное состояние. Несущая способность балок с трещинами снижается на 2–18% в зависимости от прочности бетона, армирования и характеристик трещин. Теоретические значения, рассчитанные методом с эмпирическими коэффициентами, в среднем на 4% ниже экспериментальных.

В работе Дронова А.В. [9] предложена методика расчёта элементов, подвергшихся коррозионным повреждениям, основанная на анализе напряженно-деформированного состояния сечений, где со временем изменяется площадь поперечного сечения рабочей арматуры.

$$A_s^* = A_s - \Delta A_s, \quad (6)$$

где A_s^* – площадь сечения арматуры после коррозии, A_s – площадь сечения арматуры до коррозии, ΔA_s – площадь арматуры, которая уменьшилась при коррозии.

В работе [10] было проведено экспериментальное исследование поведения железобетонных балок под воздействием одновременной нагрузки и коррозии арматуры. Исследователи обнаружили, что при таком сочетании факторов прогиб балок увеличивался быстрее, чем у неповрежденных конструкций, и мог превысить допустимые значения задолго до ожидаемого срока службы. Более того, коррозия значительно снижала не только предельную прочность, но и жёсткость балок, что приводило к хрупкому разрушению без явных предупреждающих признаков в виде значительного увеличения прогиба. Эксперименты доказали, что комбинированное воздействие нагрузки и коррозии разрушительнее, чем их отдельное влияние.

В работе [11] был предложен универсальный метод расчета прочности поперечных сечений гибких железобетонных элементов, учитывавший

механические и агрессивные воздействия окружающей среды. Исследователи провели эксперименты с балками, находившимися под статической нагрузкой в сульфат- и хлорсодержащих агрессивных средах в течение длительного времени. Было установлено, что сульфатная агрессия вызывает более серьезное разрушение бетона, тогда как хлорсодержащая среда оказывает большее влияние на коррозию арматуры. Результаты экспериментов показали, что предел прочности балок с коррозионными повреждениями снижался на 6,6% в сульфатной среде и на 13,2% в хлорсодержащей среде по сравнению с контрольными образцами. Разработанный метод расчета продемонстрировал достаточную точность, с отклонением менее 3%, что делало его применимым для практических расчетов.

Все рассмотренные работы в основном направлены на изучение влияния отдельного вида дефекта или повреждения на несущую способность. Но в конструкциях зачастую возникает ряд дефектов и повреждений, которые в совокупности могут значительно снизить прочность в целом. Как учитывать одновременно трещины и коррозию бетона и арматуры, пока остается открытым вопросом. Решением данной проблемы авторами видится использование дискретной нелинейной деформационной модели [12 – 14].

Таким образом, дальнейшие исследования и разработки в области методов расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов с дефектами и повреждениями имеют ключевое значение для обеспечения долговечности и безопасности строительных объектов.

Литература

1. Миронов А.Н., Гаранжа И.М., Вершинин В.П., Саад М.Г. Резерв несущей способности мостового сооружения через реку Кальмиус в г. Донецке // Инженерный вестник Дона, 2021, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6902/.
-

2. Касимов Р.Г. Дефекты и повреждения строительных конструкций, методы и приборы для их количественной и качественной оценки: учебное пособие / Р. Г. Касимов; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2016. 109 с.

3. Перунов А.С., Егоров Д.В. Обзор распространенных дефектов монолитных железобетонных конструкций при строительстве многоэтажных зданий // Инженерный вестник Дона, 2025, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9927/.

4. Пахомова Е.Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионном повреждении бетона и арматуры // Известия Орловского государственного технического университета. 2008. № 3-19. С. 29–32.

5. Орлова М.А. Экспериментальные исследования прочности железобетонных балок с трещинами // Жилищное строительство. 2015. № 12. С. 33-37.

6. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6. С. 98-105.

7. Орлова М.А. Испытания железобетонных балок с начальными трещинами. Ч. 2. Результаты эксперимента // Жилищное строительство. 2010. № 9. С. 38–42.

8. Орлова М.А. Влияние дефектов и повреждений на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов // Инженерный вестник Дона, 2022, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7668/.

9. Дронов А.В. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями: дис... канд. техн. наук: 05.23.01. Курск, 2017. 175 с.

10. Du Y., Cullen M., Li C. Structural effects of simultaneous loading and

reinforcement corrosion on performance of concrete beams // Construction and Building Materials. 2013. № 39. pp. 148–152.

11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences // Magazine of Civil Engineering. 2021. №3 (103). URL: cyberleninka.ru/article/n/reinforced-concrete-beams-strength-under-power-and-environmental-influences (дата обращения: 02.03.2025).

12. Радайкин, О.В. Теоретические основы диаграммного метода расчёта стержневых элементов из армированного бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 6. С. 26-42.

13. Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Ахтямова Л.Ш., Аракчеев Т.П. Общий случай расчёта стержневых элементов из армированного бетона диаграммным методом // Строительство и реконструкция. 2021. № 1. С. 26–37.

14. Радайкин О.В. Прочность железобетонных элементов прямоугольного профиля при косом внецентренном сжатии с применением нелинейной деформационной модели // Строительство и реконструкция. 2020. №1. С. 31-39.

References

1. Mironov A.N., Garanzha I.M., Vershinin V.P., Saad M.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6902/.

2. Kasimov R.G. Defekty i povrezhdeniya stroitel'nykh konstruktsiy, metody i pribory dlya ikh kolichestvennoy i kachestvennoy otsenki: uchebnoye posobiye [Defects and damages of building structures, methods and devices for their quantitative and qualitative assessment: a tutorial]. Orenburgskiy gos. un-t. Orenburg: OGU, 2016. 109 p.

3. Perunov A.S., Yegorov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9927/.

4. Pakhomova E.G. Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo



universiteta. 2008. № 3-19. pp. 29–32.

5. Orlova M.A. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2015. № 12. pp. 33-37.

6. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2015. № 6. pp. 98-105.

7. Orlova M.A. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2010. № 9. pp. 38–42.

8. Orlova M.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2022, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7668/.

9. Dronov A.V. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh izgibayemykh elementov s korroziionnymi povrezhdeniyami [Strength and deformability of reinforced concrete bending elements with corrosion damage]: dis... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Kursk, 2017. 175 p.

10. Du Y., Cullen M., Li C. Construction and Building Materials. 2013. № 39. pp 148–152.

11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Magazine of Civil Engineering, 2021, № 3. (103) URL: cyberleninka.ru/article/n/reinforced-concrete-beams-strength-under-power-and-environmental-influences (accessed 02.03.2025).

12. Radaykin, O.V. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2020. № 6. pp. 26-42.

13. Radaykin O.V., Sabitov L.S., Akhtyamova L.SH, Arakcheyev T.P. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. № 1. pp. 26–37.

14. Radaykin O.V. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2020. №1. pp. 31-39.

Дата поступления: 4.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025