

Перераспределение усилий в коррозионно-поврежденных статически неопределимых двухпролетных железобетонных балках

Д.С. Попов

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация: Расчет статически неопределимых конструкций, таких, как двухпролетная железобетонная балка в упругой постановке не отображает фактического силового сопротивления, поэтому расчеты подобных конструкций выполняют с учетом возникновения пластических деформаций и образования пластических шарниров, а наличие локальных коррозионных повреждений бетона, и арматуры определяет иные зависимости перераспределений усилий в изгибаемых элементах. Выполнен численный расчет 14 моделей с различными коррозионными повреждениями по длине балки. Представлена зависимость увеличения прогибов от процента коррозионных повреждений на различных стадиях нагружения. Показаны зависимости перераспределения возникающих усилий в пролетной и опорной частях двухпролетной балки от процента (длины) коррозионных повреждений. Установлено, что при 1% повреждений на начальных стадиях нагружения присутствует скачок растягивающих усилий в арматуре расположенной в пролете балки. Определено, что наибольшее перераспределение растягивающих усилий в опорной части балки, имеющей 50-70% коррозионных повреждений составляет 11%.

Ключевые слова: железобетонная балка, перераспределение усилий, пластический шарнир, коррозия железобетона, численный расчет, несущая способность.

Введение

На современном этапе проектирования промышленных и гражданских зданий большой популярностью пользуются монолитные железобетонные конструкции. Расчет таких конструкций, в частности, многопролетных железобетонных балок имеет некоторые особенности по сравнению с однопролетными сборными конструкциями.

Особенностью расчета является учет перераспределения усилий в элементе, которые появляются вследствие неупругих деформаций бетона и арматуры, вызывающих в элементах необратимые изменения [1,2].

Сущность расчета статически неопределимых железобетонных конструкций заключается в следующем: при некоторой нагрузке, напряжения в растянутой арматуре достигают предела текучести, далее, с развитием пластических деформаций, образуется участок с большими местными деформациями, который называется пластическим шарниром [3].

Рассматривая защемленную балку на двух опорах, при образовании пластического шарнира на опоре, увеличении углов поворота, прогибу элемента и увеличению напряжений в сжатой зоне бетона препятствуют защемленные опоры балки (связи). Как результат, последующее увеличение нагрузки не приведет к разрушению в зоне образования пластического шарнира, пока не образуются пластические шарниры на других участках и не снимутся опорные связи [4]. В многопролетной балке, то есть статически неопределимой системе, образование пластического шарнира соразмерно с выключением связи и понижением на одну степень статической неопределимости (Рис. 1).

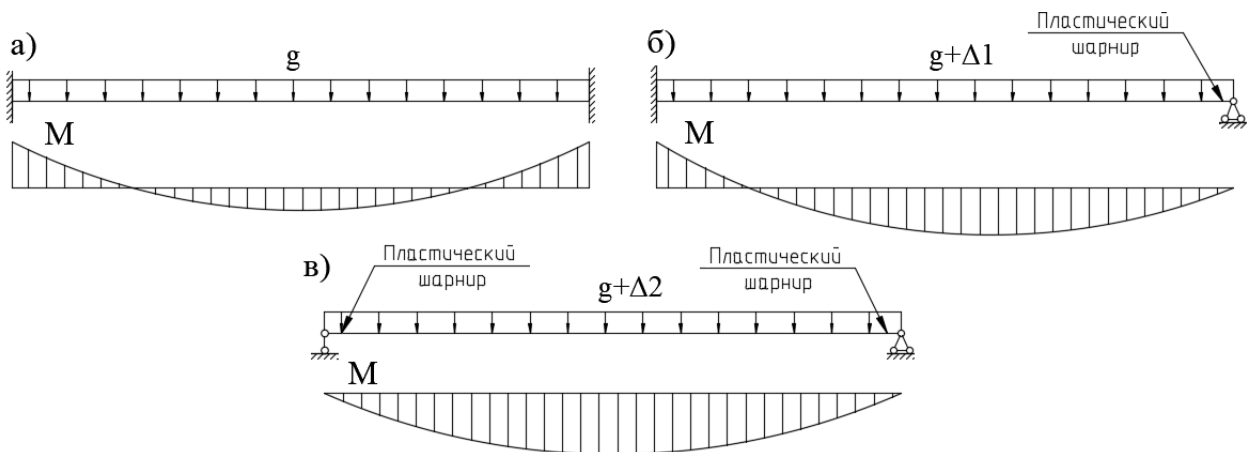


Рис. 1 - Перераспределение изгибающих моментов в статически неопределимой балке. Расчетная схема балки: а) с жесткими закреплениями на опорах; б) с пластическим шарниром на опоре; в) с пластическими шарнирами на обеих опорах.

Потеря геометрической неизменяемости и, как результат, превращение системы в механизм наступит только при возникновении трех пластических шарниров, то есть на обеих опорах и в пролете железобетонной балки. При этом значения деформаций растянутой арматуры в пластическом шарнире увеличиваются, но величина действующего изгибающего момента не изменяется, так как он определяется предельным изгибающим моментом, равным: $M_{ult} = R_s A_s z$

На сегодняшний день все большую актуальность приобретают вопросы, связанные с влиянием агрессивных сред на работу железобетонных конструкций [5-7], в частности, на перераспределение усилий в многопролетных балках за счет коррозионного повреждения бетона и арматуры.

Выполняя расчеты многопролетных железобетонных балок (с учетом отсутствия сцепления арматуры с бетоном), можно определить иные зависимости перераспределения усилий за счет коррозионных повреждений, что позволит в полной мере оценить несущую способность таких конструкций.

Метод расчета

Цель данного расчета - выявление закономерностей перераспределения усилий в коррозионно-поврежденных двухпролетных балках в зависимости от длины повреждений. Расчет выполнялся численным методом в программном комплексе Ansys [8].

На Рис. 3 и Рис. 4 изображено армирование двухпролетной балки, для удобства представления отражена $\frac{1}{2}$ ее части. Пролет балки составляет 5700мм, сечение с размерами - 500x300мм (hxb), нагрузка прикладывается через металлические пластины, расположенные на расстоянии 1900мм ($\frac{1}{3}$ пролета) от колонны. Колонны размером 300x300мм, верх и низ которых имеют жесткое закрепление. На Рис. 2 показана расчетная схема двухпролетной балки.

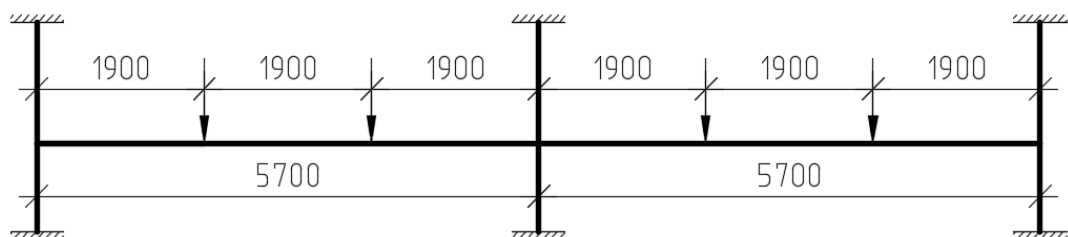


Рис. 2. - Расчетная схема двухпролетной балки

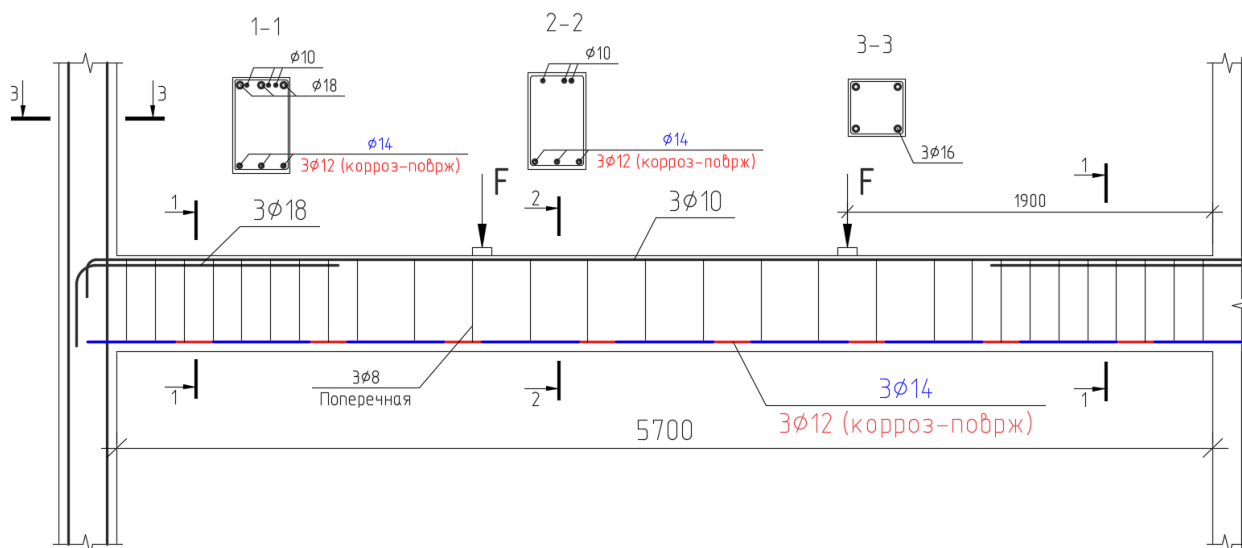


Рис. 3. - Схема армирования двухпролетной балки (показана 1/2 балки)

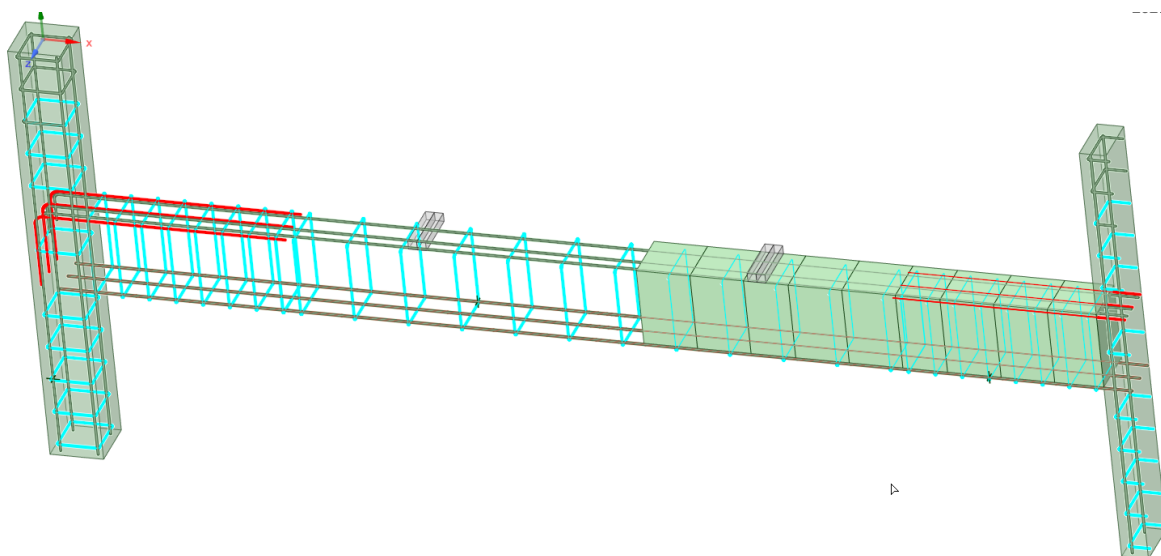


Рис. 4. - Модель двухпролетной балки в Ansys (показана 1/2 балки)

Для описания процесса упрочнения и разупрочнения бетона использовалась модель Menetrey-Willam (далее MW) [9-11], которая основана на теории пластичности (расчет выполняется по относительным пластическим деформациям бетона). При задании диаграммы деформирования бетона использовался отдельный инструмент «Exponential softening in compression and tension», определяющий поведение бетона при упрочнении и разупрочнении (Рис. 5). Использование данного

инструмента связывает образование трещин в растянутой зоне бетона с возникновением энергии в момент ее формирования, которая определяется как площадь под диаграммой работы бетона на растяжении, после достижения предельных деформаций.

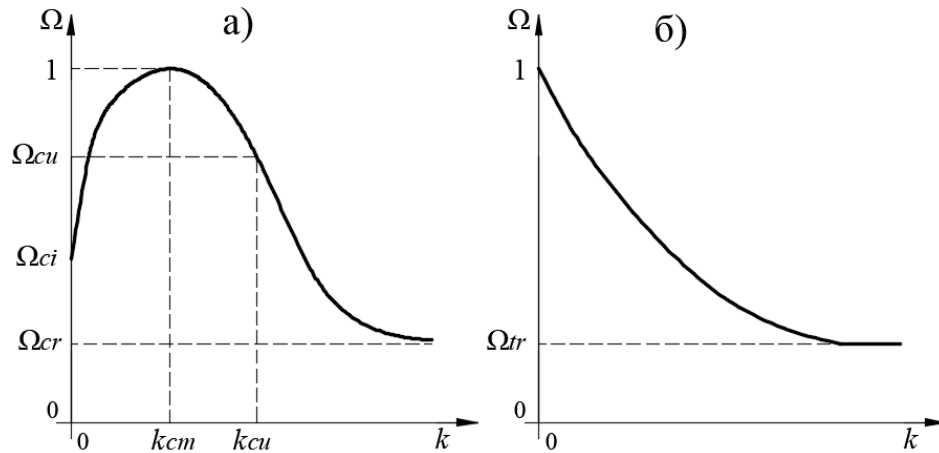


Рис. 5. – Схема упрочнения и разупрочнения бетона при сжатии (а) и растяжении (б)

По оси абсцисс и ординат на Рис. 5 отображены характерные точки диаграммы бетона, которые найдены для бетона класса В30, согласно приложению Г (СП 63.13330.2018) и представлены на Рис. 6

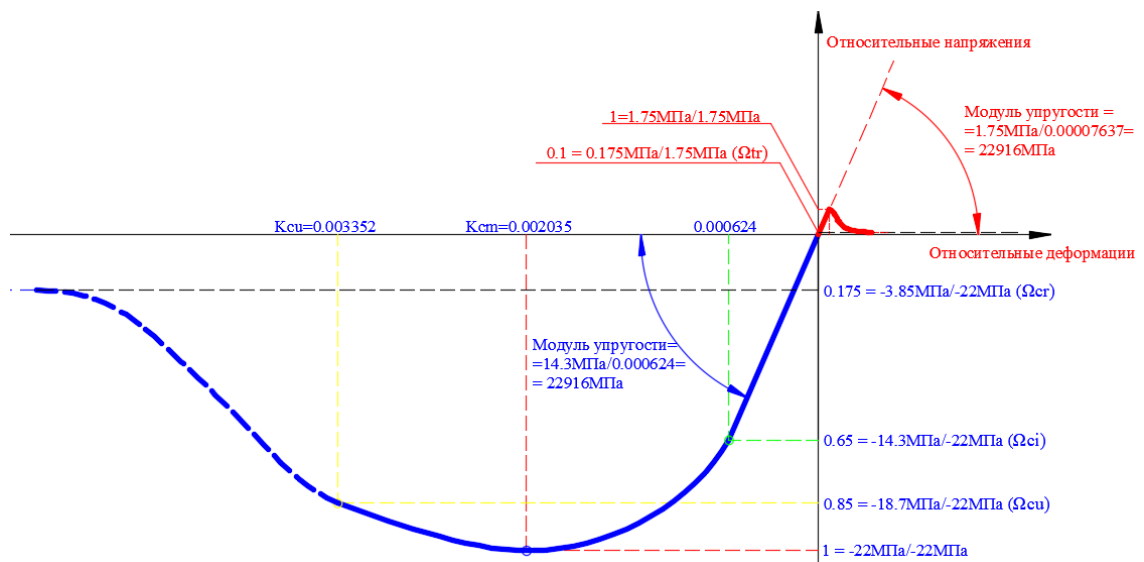


Рис. 6. - Диаграмма деформирования бетона класса В30

Моделирование арматурных стержней производилось конечными элементами REINF 264, пластическое поведение стали описывалось

билинейной зависимостью $\sigma - \varepsilon$ (Рис. 7), с пределом текучести, равным 615МПа при достижении которого арматура становится идеально пластическим телом. Арматура использовалась класса А500, значения прочностных характеристик приняты на основании экспериментальных данных [12].

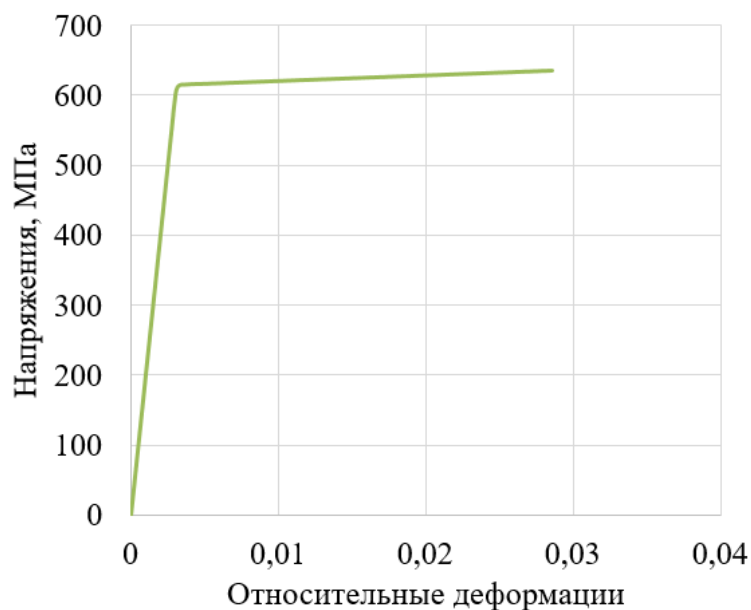


Рис. 7. - Диаграмма деформирования арматуры класса А500

Для определения закономерностей перераспределений усилий в коррозионно-поврежденных элементах в зависимости от длины поврежденного участка рассмотрено 14 моделей. Коррозионные повреждения моделировались только в нижнем сечении балки на высоту 50мм, данный участок бетона удалялся из расчетной схемы, моделируя тем самым отсутствие сцепления арматуры с бетоном, в зоне удаления КЭ уменьшался диаметр арматуры на 15%, с 14мм до 12мм (Рис. 3). Длина коррозионно-поврежденных участков выражается в процентах, относительно длины балки, а именно: 0%-НП; 1%-50мм; 3%-150мм; 5%-250мм; 10%-мм; 20%-1150мм; 30%-1750мм; 40%-2250мм; 50%-2850мм; 60%-3450мм; 70%-3950мм; 80%-4550мм; 90%-5150мм; 100%-5700мм.

На Рис. 8-Рис. 10 представлены некоторые типы повреждения из общего числа моделей.

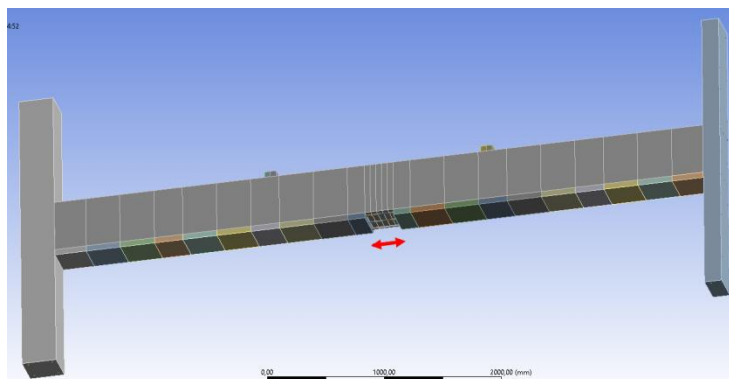


Рис. 8. - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 3% (150мм)

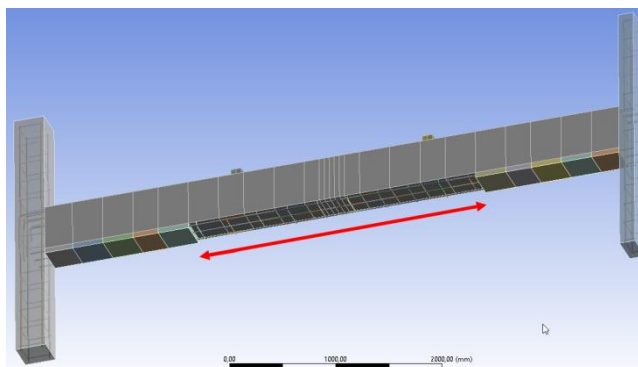


Рис. 9. - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 50% (2850мм)

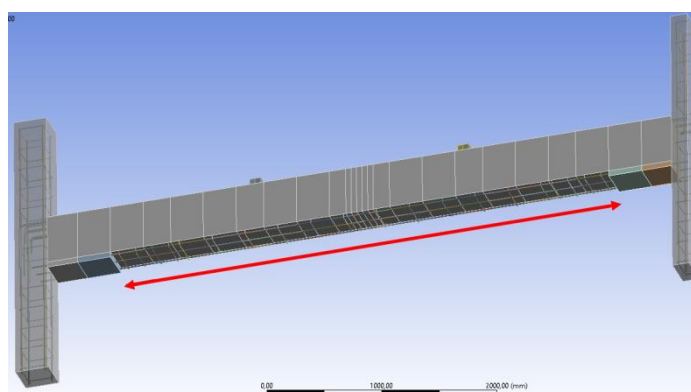


Рис. 10. - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 80% (4550мм)

Результаты

На Рис. 11 представлен общий вид двухпролетной балки с предельными прогибами перед разрушением.

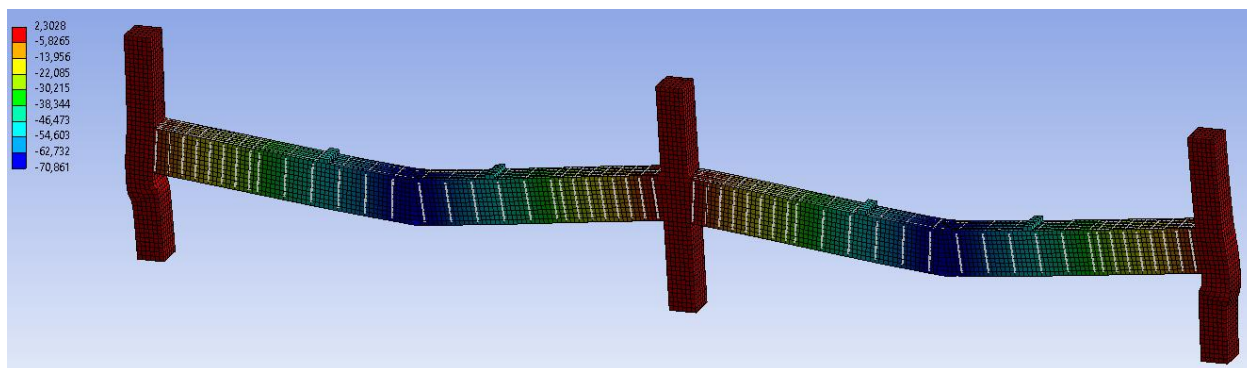


Рис. 11. - Вертикальные деформации (прогиб) двухпролетной неповрежденной балки

На рис.Рис. 12 представлены зависимости прогиба неповрежденной и коррозионно-поврежденных двухпролетных железобетонных балок от прикладываемой нагрузки.

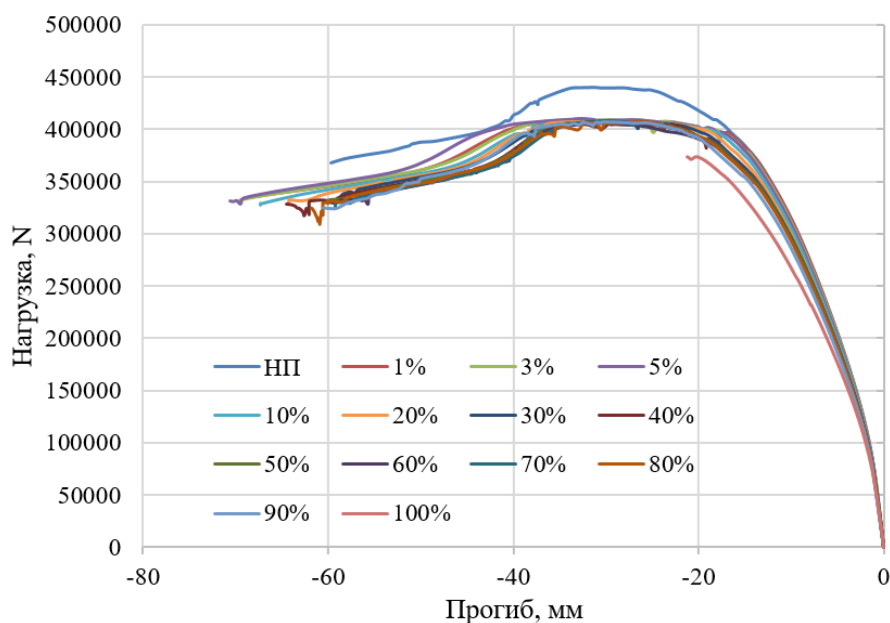


Рис. 12. - Зависимость прогиба балок от нагружения для различных степеней коррозионного повреждения

Согласно графической зависимости, на рРис. 12 наибольшую нагрузку воспринимает неповрежденная (НП) двухпролетная балка с арматурой в нижнем сечении $\varnothing 14$ мм. Изменение диаметра арматурного стержня в нижнем сечении балки на 15% (с $\varnothing 14$ до $\varnothing 12$) в результате воздействия

агрессивной среды, приводит к резкому уменьшению воспринимаемой нагрузки в момент разрушения (образования трех пластических шарниров).

На Рис. 13 отображено процентное соотношение увеличения прогибов двухпролетных балок (имеющих разную степень коррозионных повреждений) к прогибу неповрежденной балки на различных стадиях нагружения, определяемое по формуле:

$$\Delta_{\%,F} = \left(\frac{f_{\%,F}}{f_{III,F}} \right) \cdot 100\% - 100\%, \quad (1)$$

где $f_{\%,F}$ - прогиб коррозионно-поврежденной двухпролетной балки разной степени при нагрузке F ; $f_{III,F}$ - прогиб неповрежденной двухпролетной балки при нагрузке F .

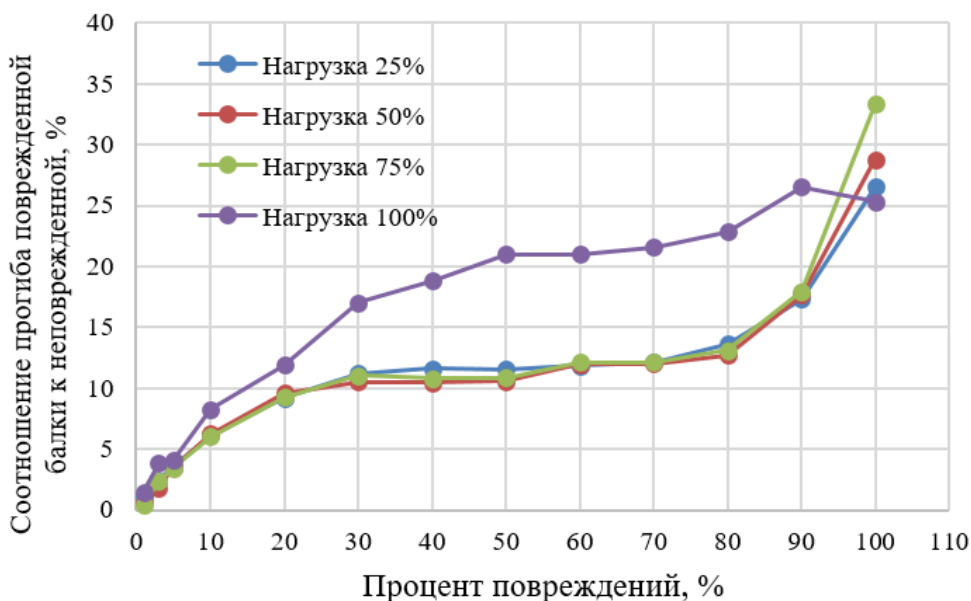


Рис. 13. - Зависимость увеличения прогиба двухпролетных балок при различном соотношении процента повреждения и нагрузки

Как видно из зависимостей на Рис. 13, при увеличении процента коррозионного повреждения (длины повреждения), увеличивается прогиб балки относительно неповрежденного элемента, достаточно резкий прирост прогибов до 10% происходит при повреждении до 20%, далее до 70% повреждений соотношение прогибов остается стабильным, при увеличении

повреждений до 100%, соотношение прогибов увеличивается от 26 до 35%. Данные соотношения справедливы при приложении нагрузки до 75% от ее разрушающего значения. Соотношение рассматриваемых прогибов непосредственно перед разрушением (100% нагружения) сильно возрастает, по причине достижения в коррозионно-поврежденной растянутой арматуре площадки текучести, как результат, увеличение длины коррозионного повреждения арматурных стержней на последних стадиях нагружения (перед разрушением) приводит к значительному увеличению прогибов относительно неповрежденной балки.

На рис.Рис. 14-Рис. 16 показаны возникающие усилия в арматурных стержнях у верхней и нижней грани балок в опорных и пролетной зонах.

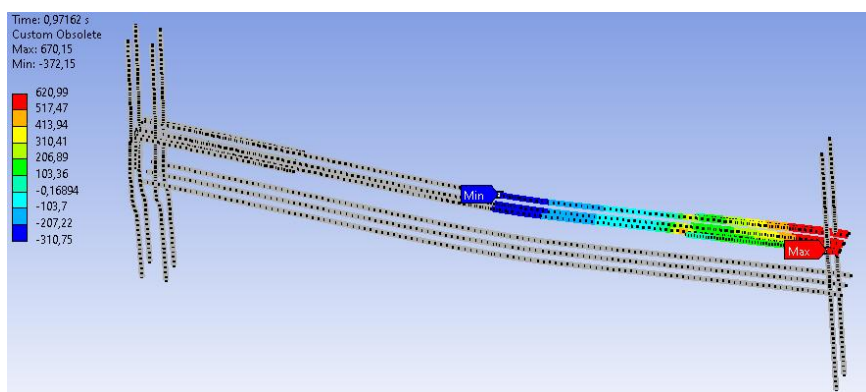


Рис. 14. - Сжимающие и растягивающие усилия в верхней арматуре у промежуточной опоры балки

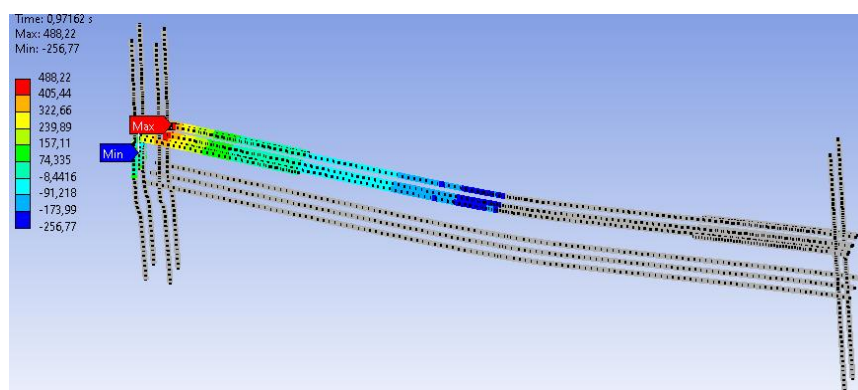


Рис. 15. - Сжимающие и растягивающие усилия в верхней арматуре у крайней опоры балки

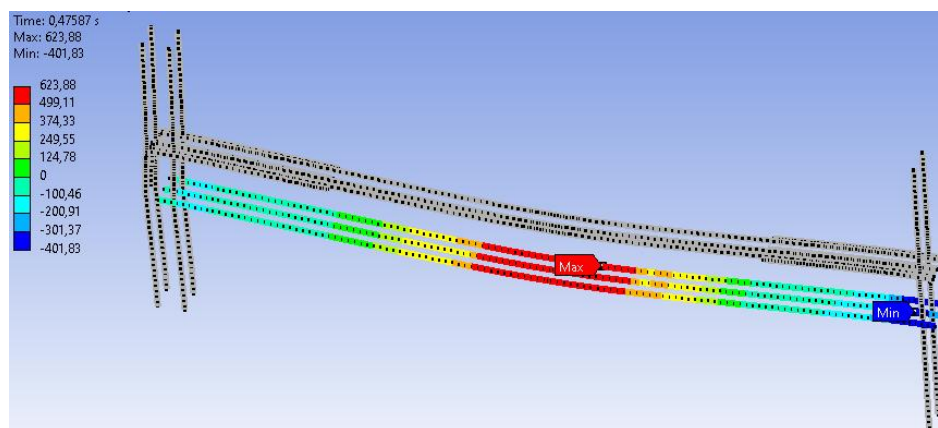


Рис. 16. - Сжимающие и растягивающие усилия нижней арматуры в пролете балки

Увеличение длины коррозионных повреждений приводит не только к увеличению прогибов, но и к перераспределению возникающих усилий в балках, результаты выполненных численных расчетов представлены на рис.Рис. 17Рис. 19, где показаны возникающие растягивающие усилия в арматуре, полученные для опорных и пролетных частей двухпролетных балок при различном проценте повреждений и степени нагружения. На рис.Рис. 17Рис. 19 по вертикали отображены возникающие усилия, по горизонтали области балки, а именно: 0 – левая опора; 1 – первый пролет; 2 – промежуточная опора; 3 – второй пролет; 4 – правая опора.

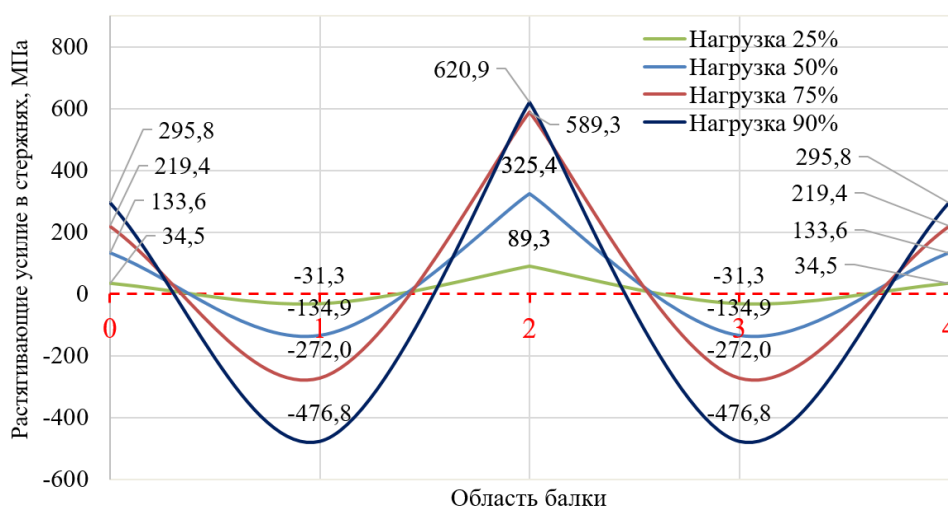


Рис. 17. – Растягивающие усилия в арматуре неповрежденной балки

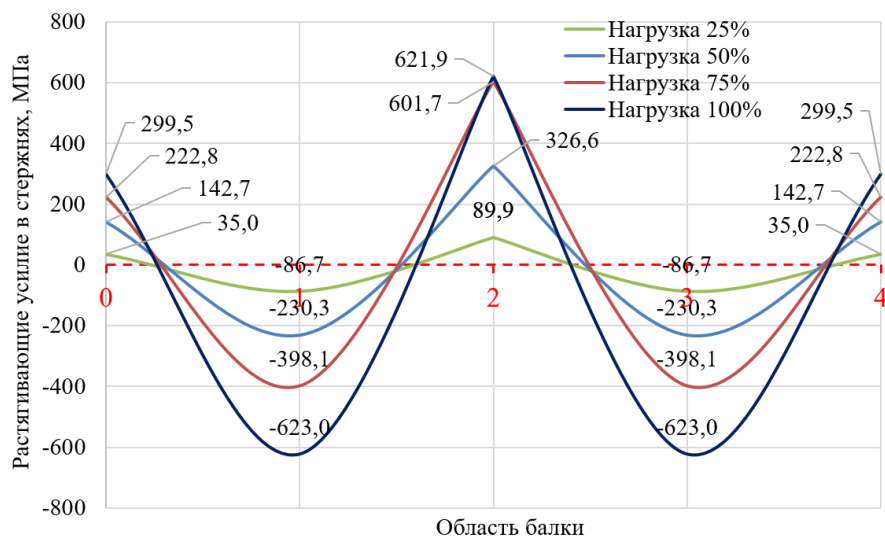


Рис. 18. – Растягивающие усилия в арматуре коррозионно-поврежденной балки (1% повреждений)

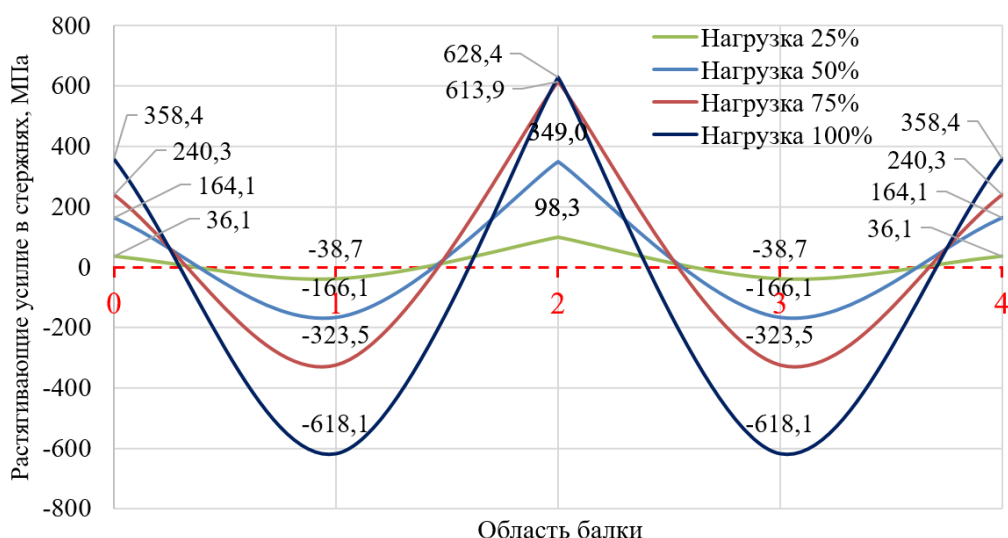


Рис. 19. – Растягивающие усилия в арматуре коррозионно-поврежденной балки (50% повреждений)

На представленных рисунках показаны растягивающие усилия в арматурных стержнях неповрежденной и коррозионно-поврежденной балках (1% и 50% повреждения) на различных стадиях нагружения. Стоит отметить, что разрушение всех коррозионно-поврежденных балок происходило при одинаковой нагрузке (400кН), так как увеличение коррозионного повреждения касалось только изменения длины участка балки с

соответствующим уменьшением диаметра стержня с 14мм до 12мм, тем самым силовое сопротивление остается неизменным.

Для оценки перераспределений усилий в двухпролетной балке, имеющей коррозионные повреждения, выполнялся сравнительный анализ возникающих напряжений в растянутых стержнях при 25%(100кН), 50%(200кН), 75%(300кН) и 100%(400кН) от разрушающей нагрузки. Неповрежденная балка нагружалась идентичными нагрузками для сопоставления результатов, при этом значение нагрузки в 400кН соответствует 90% от разрушающей нагрузки.

На рис.Рис. 20Рис. 21 отображено процентное соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях первого пролета и над промежуточной опорой двухпролетных балок (имеющих разную степень коррозионных повреждений) относительно возникающих усилий в неповрежденной балке на различных стадиях нагружения, определяемое по формуле:

$$\Delta_{\%,F} = \left(\frac{\sigma_{\%,F}}{\sigma_{НП,F}} \right) \cdot 100\% - 100\%, \quad (2)$$

где $\sigma_{\%,F}$ - усилие в растянутых стержнях коррозионно-поврежденной двухпролетной балки разной степени при нагрузке F ; $\sigma_{НП,F}$ - усилие в растянутых стержнях неповрежденной двухпролетной балки при нагрузке F .

Результаты сравнительного анализа (Рис. 20) неповрежденной балки с коррозионно-поврежденной, показывают, что соотношения изменений усилий в растянутых стержнях пролетной части балки при 1% повреждений достаточной сильной возрастают, что характеризуется концентрацией усилий в растянутой арматуре. Далее с увеличением коррозионных повреждений процент соотношений усилий снижается и от 50% до 100% повреждений балки стабилизируется и находится в диапазоне от 17% до 40% в зависимости от степени нагружения.

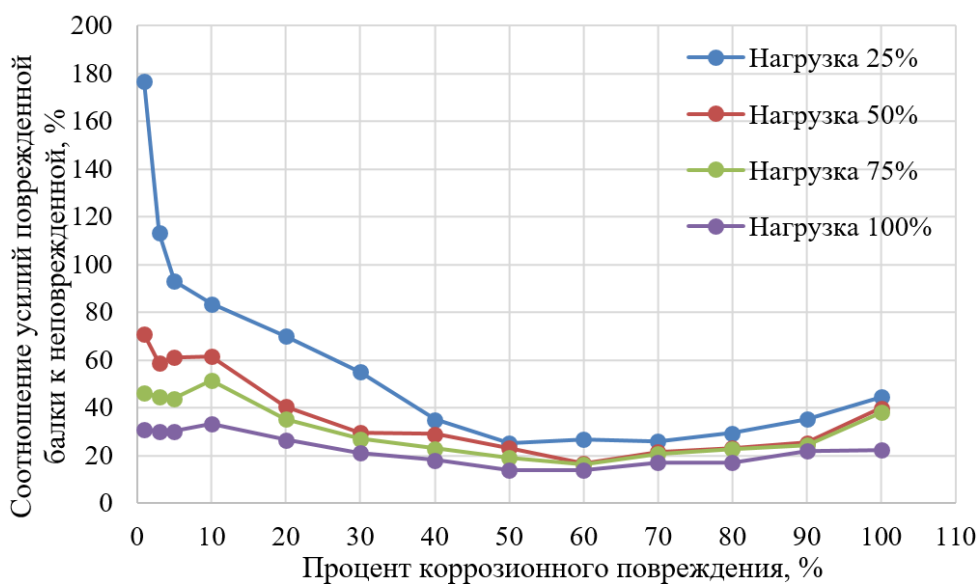


Рис. 20. - Соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях в пролете при различном % коррозионных повреждений

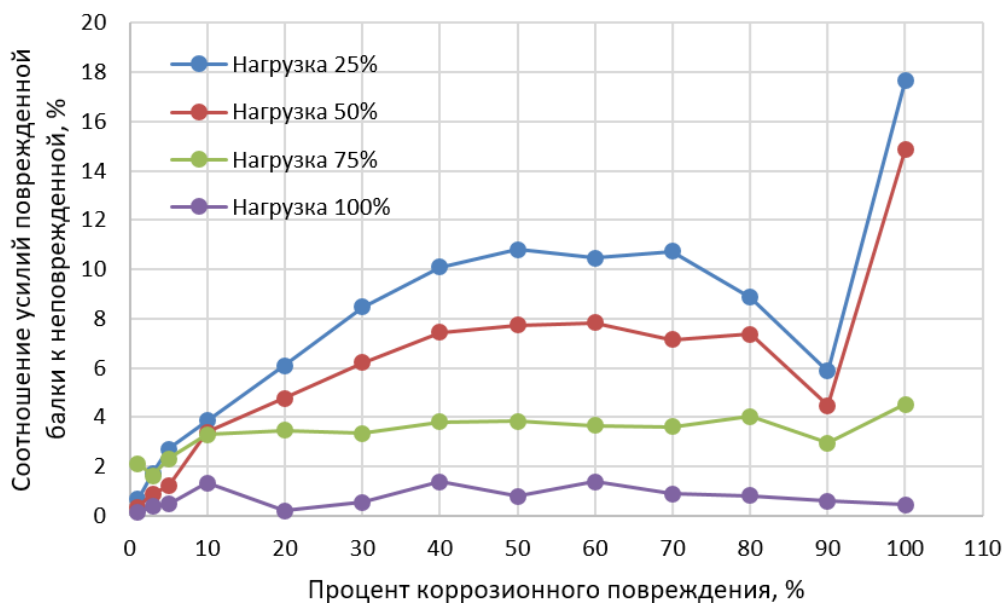


Рис. 21. - Соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях над промежуточной опорой при различном % коррозионных повреждений

Перераспределение растягивающих усилий в арматуре над промежуточной опорой (Рис. 21) имеет иной характер по сравнению с усилиями в пролетной части балки. Так, при увеличении процента коррозионных повреждений балки, последовательно увеличивается

соотношение изменения усилий, максимальное значение в 11% достигается при коррозионном повреждении в диапазоне от 50% до 70% и нагружении 25%. Стоит отметить, что во всех коррозионно-поврежденных балках в момент перед разрушением (нагрузка 100%), соотношение изменения усилий стремится к единице, что обуславливается достижением арматурных стержней текучести и предела прочности сжатой зоной бетона, как результат, перераспределение усилий в надопорных зонах балки на последних стадиях нагружения практически отсутствует.

Заключение

На основании выполненного исследования перераспределений усилий в двухпролетных балках, имеющих различную длину коррозионных повреждений (процент повреждений), можно сделать следующие выводы:

1. При нагружениях до 75% от разрушающей нагрузки и коррозионных повреждениях до 20% происходит стремительное увеличение прогибов балки, при повреждениях от 20% до 70% балки прогибы практически не изменяются, дальнейшее увеличение повреждений до 100% приводит к повторному резкому увеличению прогибов (Рис. 13).

2. При предельных нагружениях (90-100% нагрузки) увеличение прогибов с увеличением коррозионных повреждений происходит равномерно и достигает 26% относительно прогиба неповрежденной балки (Рис. 13).

3. Разрушение балок с различным процентом повреждений происходит при одинаковой нагрузке, так как в коррозионно-поврежденных зонах арматура изменялась до постоянного диаметра (с 14мм до 12мм).

4. Усилия в растянутой арматуре пролетной части коррозионно-поврежденной балки, имеющей 1% повреждений, достаточно резко возрастают, что объясняется концентрацией усилий за счет локальной коррозии балки. При увеличении процента коррозии, концентрация усилий снижается, так, при значениях коррозии от 50% до 100%, усилия в пролетной

части относительно неповрежденной балки увеличиваются от 17% до 40% в зависимости от значения внешней нагрузки (Рис. 20).

5. При нагружении балки до 50%, усилия в растянутой арматуре над промежуточной опорой последовательно увеличиваются с увеличением процента коррозии (до 50%), в диапазоне повреждений от 50% до 70% увеличение усилий относительно неповрежденной балки стабилизируется и составляет 11%, в диапазоне повреждений от 70% до 100% соотношение растягивающих усилий снижается (Рис. 21).

6. При нагружении от 75% до 100%, усилия в растянутой арматуре над промежуточной опорой всех типов коррозионно-поврежденных балок практически не изменяются и составляют 1-4% относительно усилий в неповрежденной балке.

7. Наиболее явное перераспределение усилий в растянутой арматуре коррозионно-поврежденных балок над промежуточной опорой происходит при нагружении до 50%. На последней стадии нагружения отношение усилий в неповрежденной и поврежденных балках стремится к 1,0 (Рис. 21), что характеризует отсутствие перераспределений возникающих перед разрушением усилий.

Литература

1. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. №6. С.14-21.

2. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2022. pp. 1-9.

3. Кальницкий А.А. Расчёт статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. Москва. 1970. 168 с.

4. Байков В.Н. Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. Учебник для вузов. - 6-е издание. Москва: ООО «БАСТЕТ». 2009. 768 с.

5. Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И. Численное моделирование композитной арматуры для задачи сцепления с бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 56-65.

6. Meet S., Choudhury T., Kwatra N. Investigating the nonlinear performance of corroded reinforced concrete beams // Journal of building engineering. 2021. 44. pp. 102-108.

7. Тамразян А.Г., Минеев М.С. К возникновению трещин в модели толстостенного бетонного цилиндра при коррозии с учетом пористой зоны на границе раздела арматуры и бетона // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 159-165.

8. Ansys Documentation: Ansys User's Guide. p. 1192.

9. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures, PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne. 1994. p. 179.

10. Dmitriev A., Novozhilov Y., Mikhalyuk D., Lalin, V. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Volume 88. Article No 8804. pp. 84-91.

11. Корсун В.И., Карпенко С.Н., Макаренко С.Ю., Недорезов А.В. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях // Строительство и реконструкция. 2021. № 5(97). С. 16-30.

12. Попов Д.С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2022. № 2(100). С. 55-64.

References

1. Tamrazjan A.G., Rashidov B.T. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2018. №6. pp.14-21.
 2. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2022. pp. 1-9.
 3. Kal'nickij A.A. Raschjot staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh konstrukcij s uchjotom pereraspredelenija usilij [Calculation of statically indeterminate reinforced concrete structures taking into account the redistribution of efforts]. Moskva. 1970. 168 p.
 4. Bajkov V.N. Sigalov Je.E. Zhelezobetonnye konstrukcii. Obshhij kurs [Reinforced concrete structures. General course]. Uchebnik dlja vuzov. - 6-e izdanie. Moskva: OOO «BASTET». 2009. 768 p.
 5. Nikoljukin A.N., Jarcev V.P., Kolomnikova I.I. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2019. №5. pp. 56-65.
 6. Meet S., Choudhury T., Kwatra N. Journal of building engineering. 2021. 44. pp. 102-108.
 7. Tamrazjan A. G., Mineev M.S. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. 2021. № 3(393). pp. 159-165.
 8. Ansys Documentation: Ansys User's Guide. p. 1192.
 9. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures, PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne. 1994. p. 179.
 10. Dmitriev A., Novozhilov, Y., Mikhalyuk D., Lalin V. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Volume 88. Article No 8804. pp. 84-91.
 11. Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Ju., Nedorezov A.V. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2021. № 5(97). pp. 16-30.
 12. Popov D. S. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2022. № 2(100). pp. 55-64.
-