

Численные исследования перераспределений усилий в статически неопределимых коррозионно-поврежденных железобетонных балках

Д.С. Попов

Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация: Исследование статически неопределимых железобетонных конструкций на современном этапе возможно с помощью программных комплексов, способных учитывать нелинейную работу материала, что позволяет в полной мере оценить напряженно-деформированное состояние на предмет иного перераспределения возникающих усилий, спровоцированного коррозионными повреждениями арматуры и бетона. Выполнены численные исследования 14 моделей с коррозионными повреждениями в верхнем сечении двухпролетной балки в программном комплексе Ansys. Представлены графики нагрузка-прогиб в зависимости от процента коррозионного повреждения. Показаны зависимости перераспределения растягивающих усилий в арматуре балки при различном проценте коррозионного повреждения. Установлено, что при повреждениях до 10% происходит резкое увеличение растягивающих усилий в пролетной арматуре балок. Определено, что при коррозионном повреждении балки до 70%, усилия в надпорной арматуре увеличиваются до 10%.

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

Введение

Бетонные и железобетонные конструкции могут подвергаться воздействию как эксплуатационных нагрузок, так и воздействию различных агрессивных сред. Это может приводить к изменениям прочностных и деформационных свойств материалов, также к накоплению повреждений конструкций.

В этой связи исследование особенностей работы конструкций в таких условиях и создание методов расчета конструкций с учётом коррозионных повреждений и особенностей напряжённо-деформированного состояния, является актуальным [1,2].

На современном этапе строительства популярностью пользуются конструкции из монолитного железобетона при сравнении с сборными конструкциями по причине снижения пролетного изгибающего момента, за счет монолитных опорных соединений с вертикальными конструкциями и как результат образования статически неопределимых конструкции.

При этом расчет статически неопределимых железобетонных балочных конструкций в отличие от статически определимых имеет свою специфику, а именно появлением пластических шарниров, обусловленных достижением в растянутой арматуре предела текучести [3-5].

Работа подобной конструкции такова, что образование пластического шарнира на одной из опор не приведет к разрушению всей конструкции, а лишь снимет одну связь (Рис. 1), последующие увеличение нагрузки переведёт к образованию пластического шарнира на других участках балки. При этом критерием разрушения подобных статически неопределимых конструкций является достижение предела текучести (образование пластического шарнира) на трех участках балки [6].

Так же стоит понимать, что значение действующего изгибающего момента в зоне возникновения пластического шарнира не увеличивается, так как определяется предельным изгибающим моментом: $M_{ult} = R_s A_s z$. Дальнейшее нагружение приведет к увеличению изгибающего момента на других участках конструкции, в данном понимании работы статически неопределимых железобетонных конструкций и заключается смысл перераспределения изгибающих моментов.

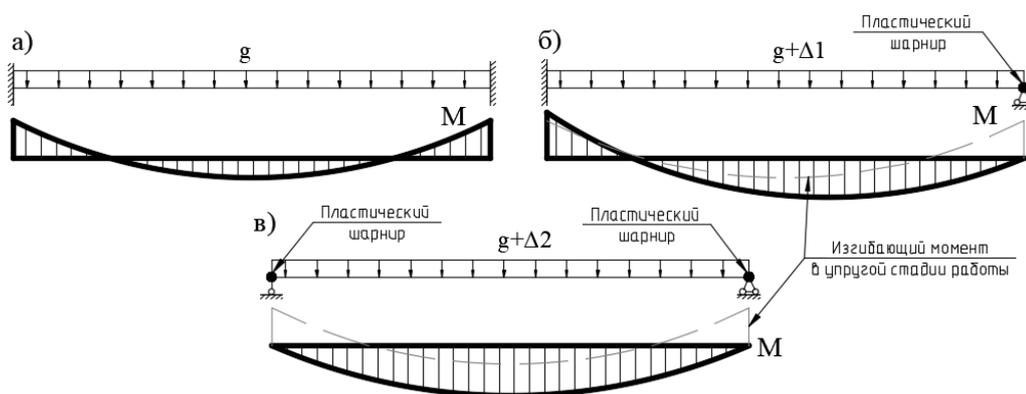


Рис. 1 - Перераспределение изгибающих моментов в статически неопределимой балки. Расчетная схема балки: а) с жесткими креплениями на опорах; б) с пластическим шарниром на опоре; в) с пластическими шарнирами на обеих опорах.

Исследование работы многопролетных железобетонных конструкций подверженных коррозионным повреждениям на предмет анализа изменения перераспределения изгибающих моментов носит актуальный характер [7,8].

Метод расчета

Задачей данного численного исследования является анализ коррозионно-поврежденных двухпролетных железобетонных балок в зависимости от длины деградации на предмет перераспределение усилий. Расчет выполнен в программном комплексе Ansys [9].

На рисунке 2 показана расчетная схема исследуемой двухпролетной железобетонной балки с прикладываемой нагрузкой 1/3 части пролета и жестким закреплением колонн.

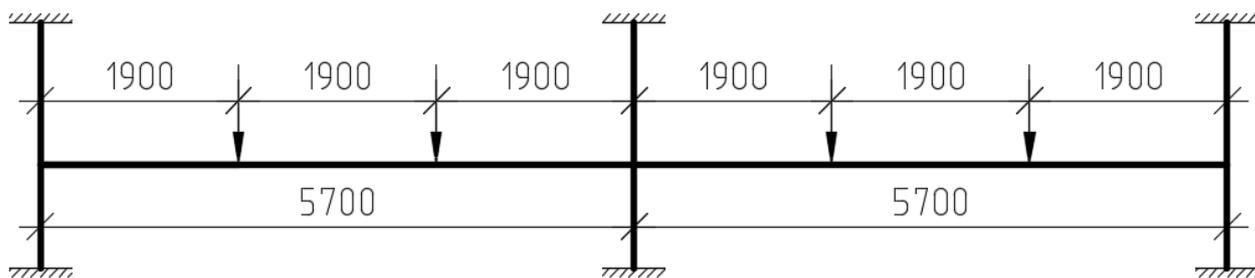


Рис. 2 - Расчетная схема двухпролетной балки.

Сечение балки принято 300x500мм (bхh), колонн 300x300мм, армирование (Рис. 3, Рис. 4) подобрано на основании предварительного расчета на стандартные (общепринятые) конструкции пола, перегородок и полезную нагрузку.

Работа бетона описывалась моделью Menetrey-Willam (далее MW) [10-12] использующая относительные пластические деформации бетона. Для задания диаграммы деформирования бетона (σ - ϵ) класса В30, точнее ее характерных точек использовалось приложение Г (СП 63.13330.2018) и представлена на рисунке 5

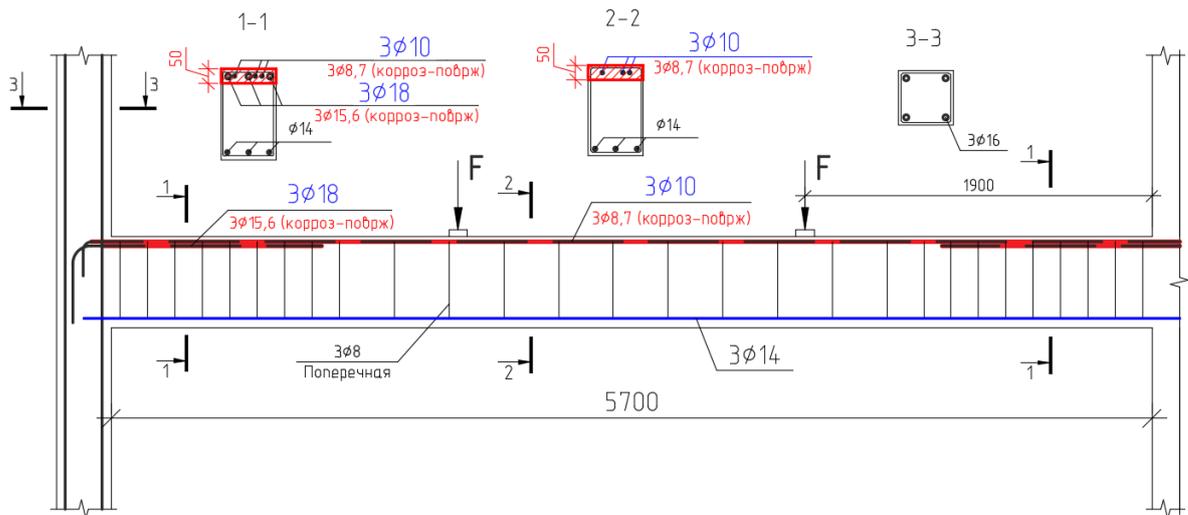


Рис. 3. - Схема армирования двухпролетной балки (показана 1/2 балки).

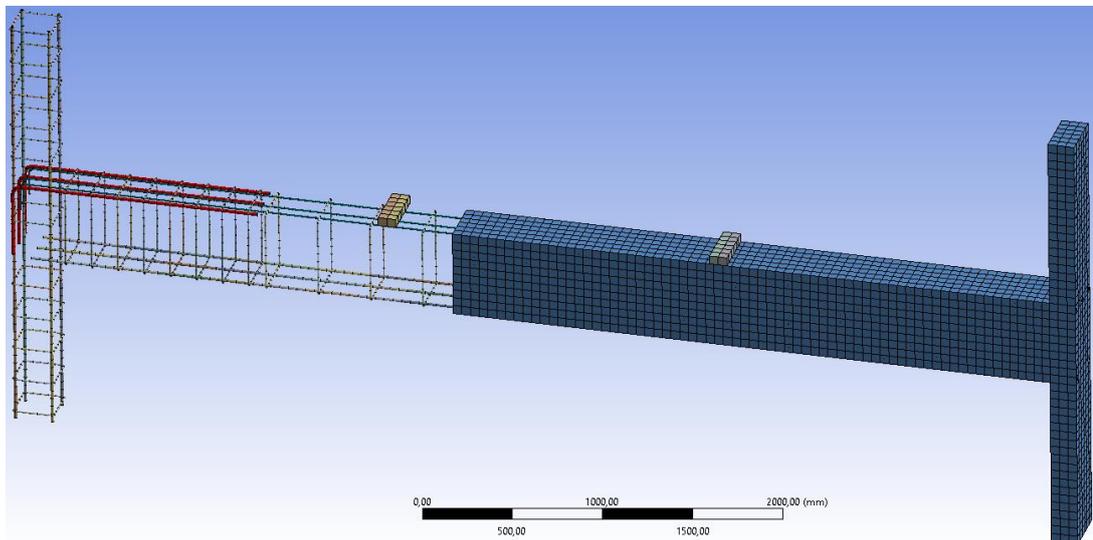


Рис. 4. – Модель двухпролетной балки в Ansys (показана 1/2 балки).

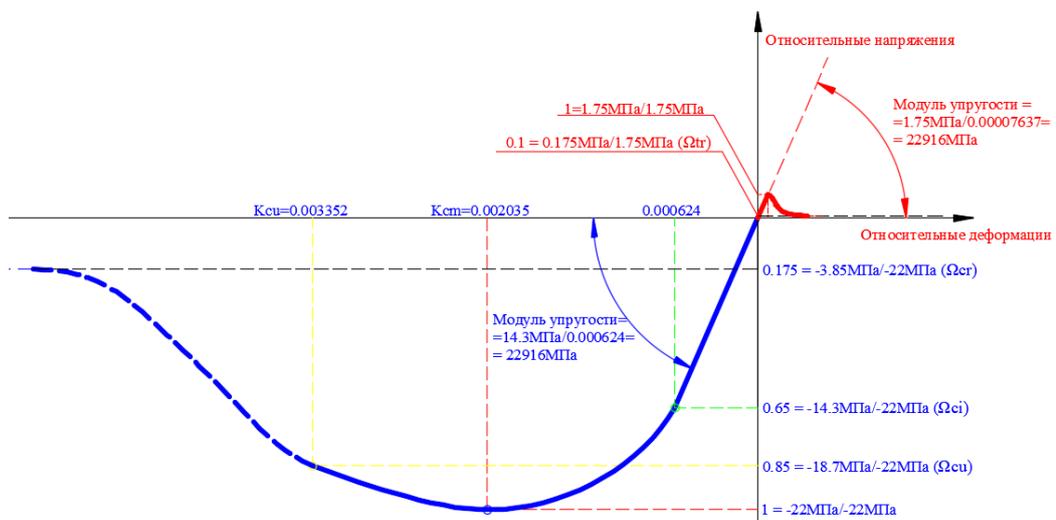


Рис. 5. - Диаграмма деформирования бетона класса В30.

Для определения поведения бетона при упрочнении и разупрочнении применялся отдельный инструмент «Exponential softening in compression and tension» с характерными точками представленного на рисунке 6.

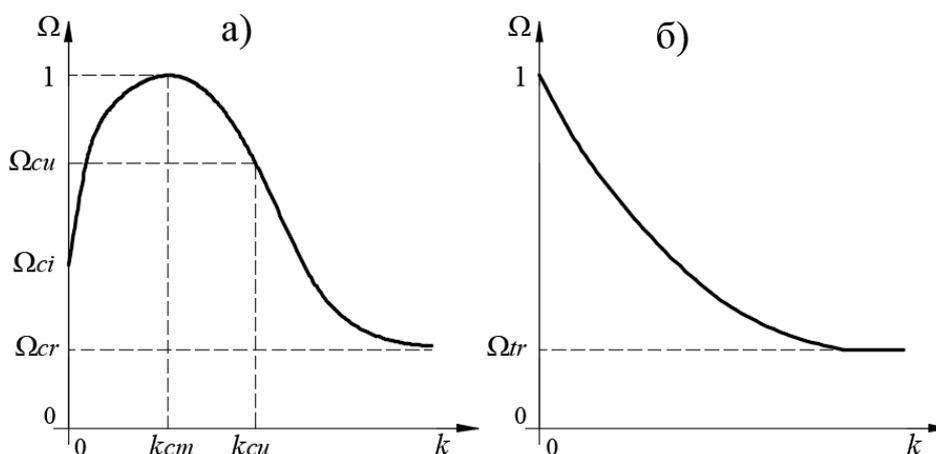


Рис. 6. – Схема упрочнения и разупрочнения бетона при сжатии (а) и растяжении (б).

Моделирование бетона выполнялось конечными элементами SOLID 185 для арматурных стержней использовался REINF 264 (Рис.7), преимуществом данного соотношения КЭ, является отсутствие необходимости разбиения триангуляционной сети таким образом, чтобы стержневые элементы (BEAM 188) соединялись с узлами объемных элементов, следовательно, можно получить более качественную сетку исследуемых конструкций [13].

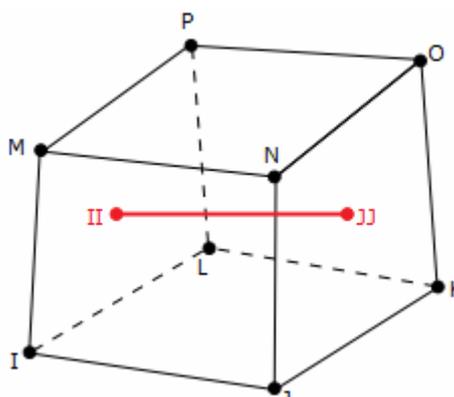


Рис. 7 - Объемный конечный элемент с REINF 264.

Поведение арматурной стали описано билинейной зависимостью (Рис.8). Предел текучести принят на основании проведенных экспериментальных исследованиях арматурных стержней класса А500 [14], предел текучести которых составил 615МПа.

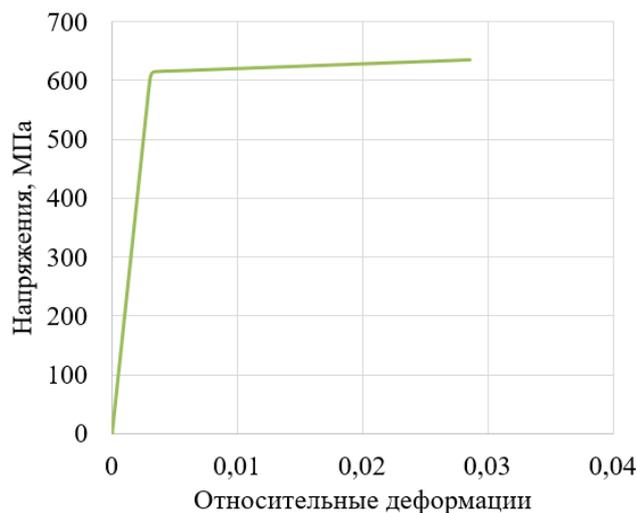


Рис. 8 - Диаграмма деформирования арматуры.

Коррозионные повреждения двухпролетной балки моделировались только в верхнем сечении, такое повреждение обоснованно как одним из возможным вариантом воздействия агрессивной среды на конструктивные элементы здания, высота деградации бетона принималась - 50мм. При этом, прочностные характеристики в зоне повреждения снижались до класса бетона В3.5. В зоне коррозионного повреждения площадь сечения арматуры уменьшался на 25% (Рис.3) и составила для пролетной части с 10мм ($0,785\text{см}^2$) до 8,7мм ($0,59\text{см}^2$), опорной части с 18мм ($2,54\text{см}^2$) до 15,6мм ($1,9\text{см}^2$).

Для выполнения исследований на предмет перераспределения усилий в коррозионно-поврежденных железобетонных элементах, создавалось 14 моделей отличающиеся друг от друга длиной повреждений.

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 рисунках 9-11 представлены некоторые типы повреждения из общего числа моделей.

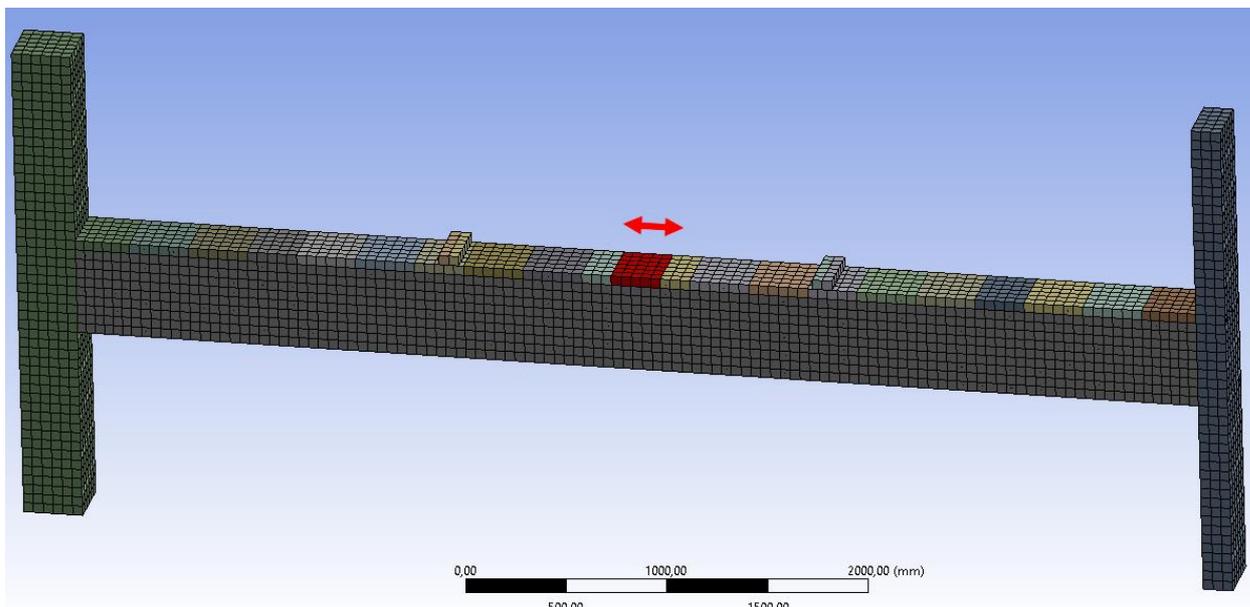


Рис. 9. - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 5% (150мм).

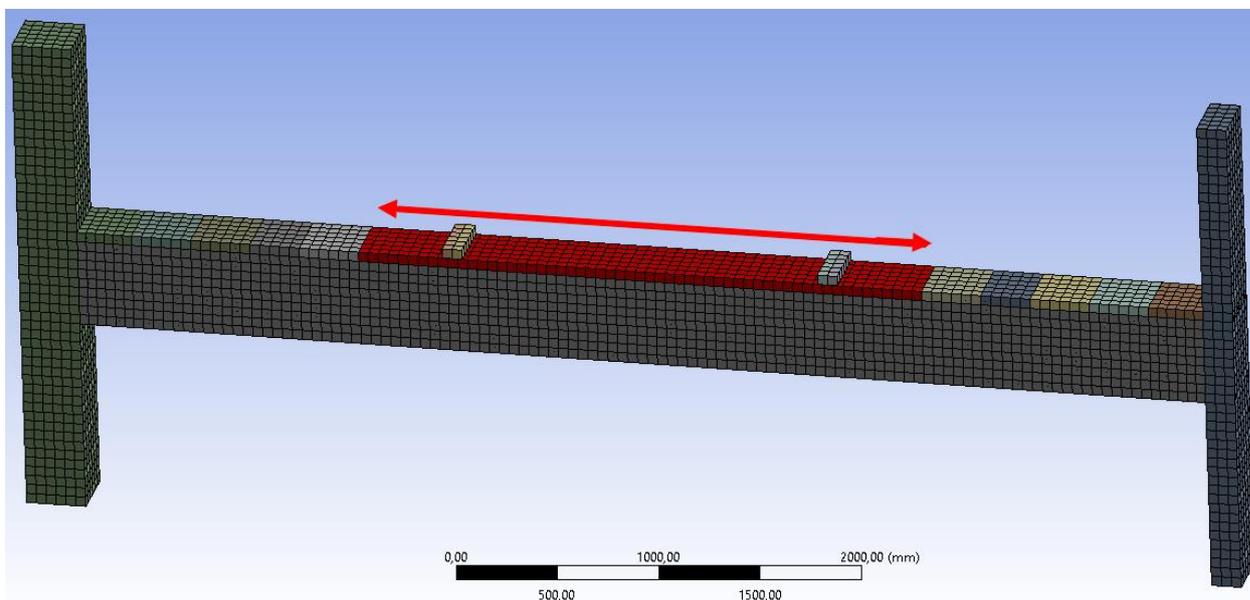


Рис. 10. - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 50% (2850мм).

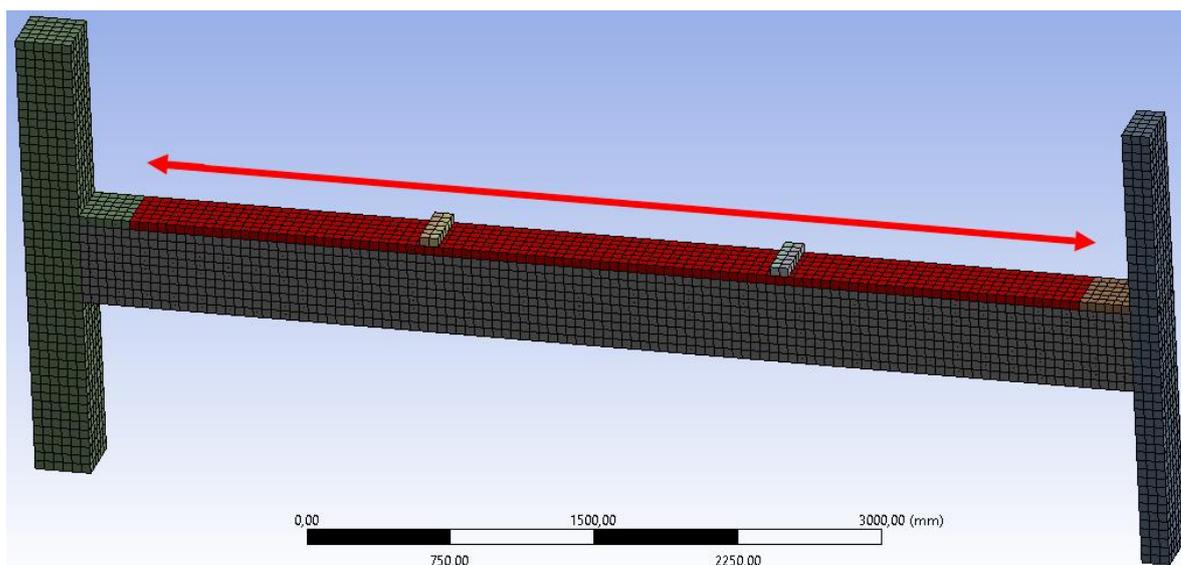


Рис. 11 - Длина коррозионно-поврежденного участка балки 90% (4550мм)

Результаты

Результатами исследования коррозионно-поврежденной двухпролетной железобетонной балки являются соотношение прогиба и перераспределение растягивающих усилий в арматурных стержнях в зависимости от процента коррозионного повреждения.

На рисунке 12 показаны прогибы неповрежденной двухпролетной балки (1/2 часть) в стадии перед разрушением.

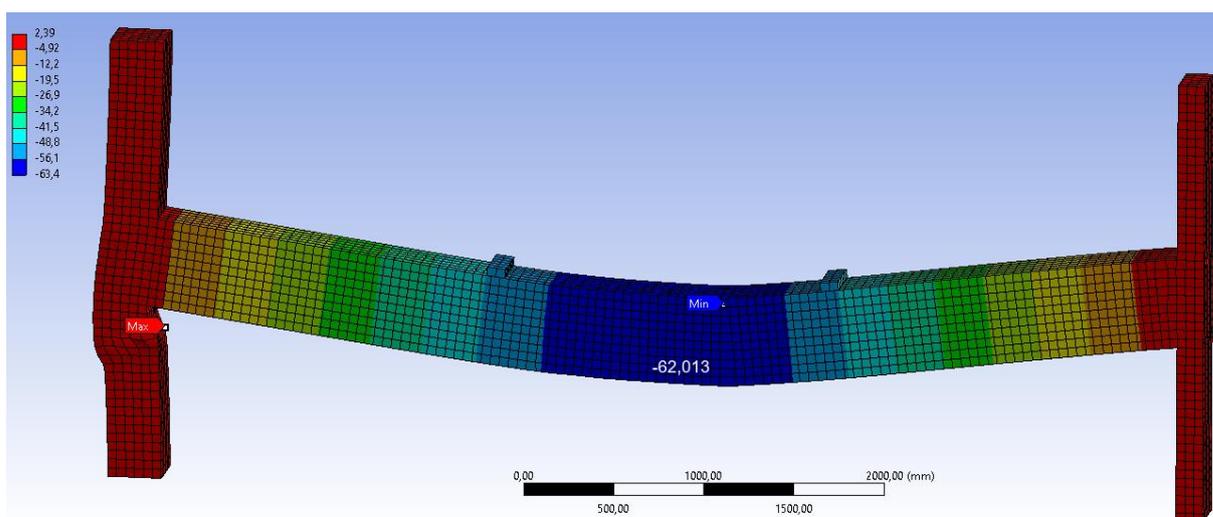


Рис. 12 - Вертикальные деформации (прогиб) двухпролетной неповрежденной балки (показана 1/2 часть)

На основании выполненных численных расчетов на рисунке 13 представлены зависимости прогиб-нагрузка исследуемых балок от процента коррозионного повреждения.

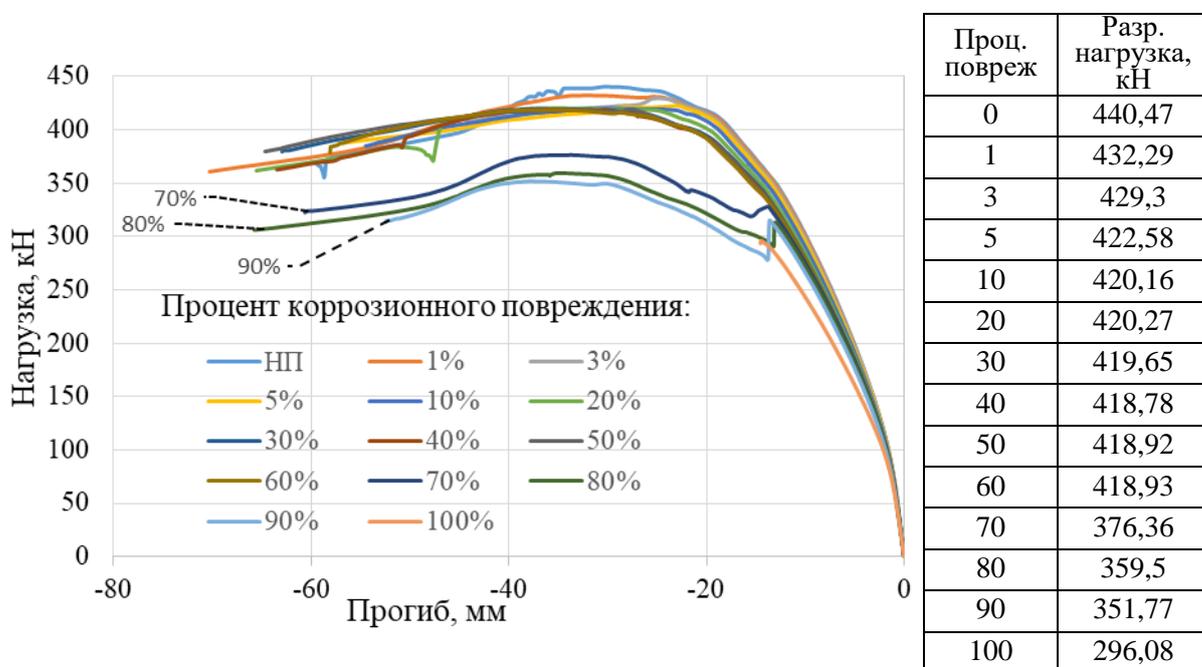


Рис. 13 - Зависимости прогиб-нагрузка балок от процента коррозионного повреждения.

Из графических зависимостей следует, что даже при небольшом проценте коррозионных повреждений происходит снижение несущей способности балок. При достижении коррозии в 70% и более происходит резкое снижение несущей способности, что обуславливается коррозионными повреждениями опорных арматурных стержней на 25% (с 2,54см² до 1,9 см²) и достаточно отчетливо проявляется группированием (отделением) графиков на рисунке 13.

Для оценки изменения возникающих прогибов в коррозионно-поврежденных балках относительно неповрежденной на различных стадиях нагружения на рисунке 14 представлены графические зависимости, определяемые 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 .

На рисунке 14 зависимости нагрузка-прогиб коррозионно-поврежденных балок выполнены на различных стадиях нагружения. При этом значения нагрузок 25%-95% принимаются относительно разрушающей нагрузки неповрежденной балки составляющей 440,47кН (Рис. 13), поэтому графики для нагрузок 75%-95% обрываются, что свидетельствует о разрушении конструкций в результате предельного значения процента повреждения.

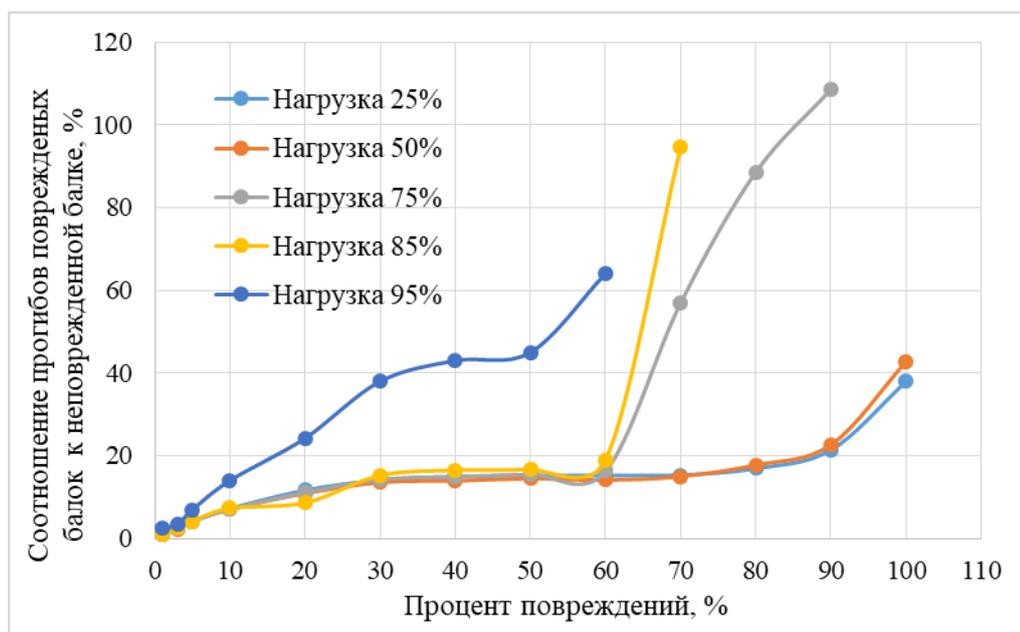


Рис. 14. - Зависимость изменения прогибов коррозионно-поврежденных балок к неповрежденной балке на различных стадиях нагружения.

На представленных графических зависимостях присутствует явная тенденция увеличения прогибов поврежденных балок относительно неповрежденной, при этом стоит отметить, что при нагружении до 85% и

коррозионном повреждении от 30% до 60% исследуемое соотношение прогибов постоянно, что объясняется упругой работой арматурных стержней. При дальнейшем увеличении процента коррозионных повреждений, происходит резкое возрастание прогибов балок.

Соотношение прогибов поврежденных балок к неповрежденной перед разрушением (нагрузка 95%) значительно больше, относительно других стадий нагружения (25-85%), что обуславливается достижением в растянутой арматуре площадки текучести, как результат увеличение длины коррозионного повреждения на последней стадии нагружения (перед разрушением) приводят к значительному увеличению прогибов.

Исследования перераспределяющихся усилий в монолитных железобетонных балка в результате их коррозионного повреждения, выполнялось на основании возникающих усилий в растянутой арматуре (Рис.15-17).

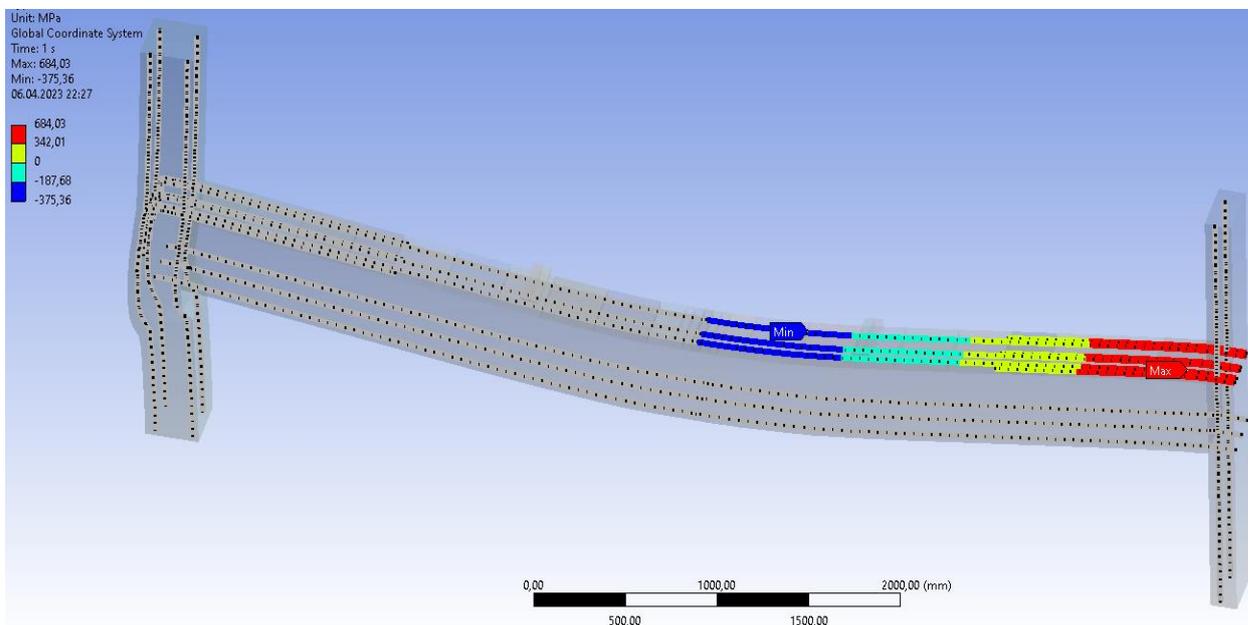


Рис. 15. - Сжимающие и растягивающие усилия в верхней арматуре у промежуточной опоры балки.

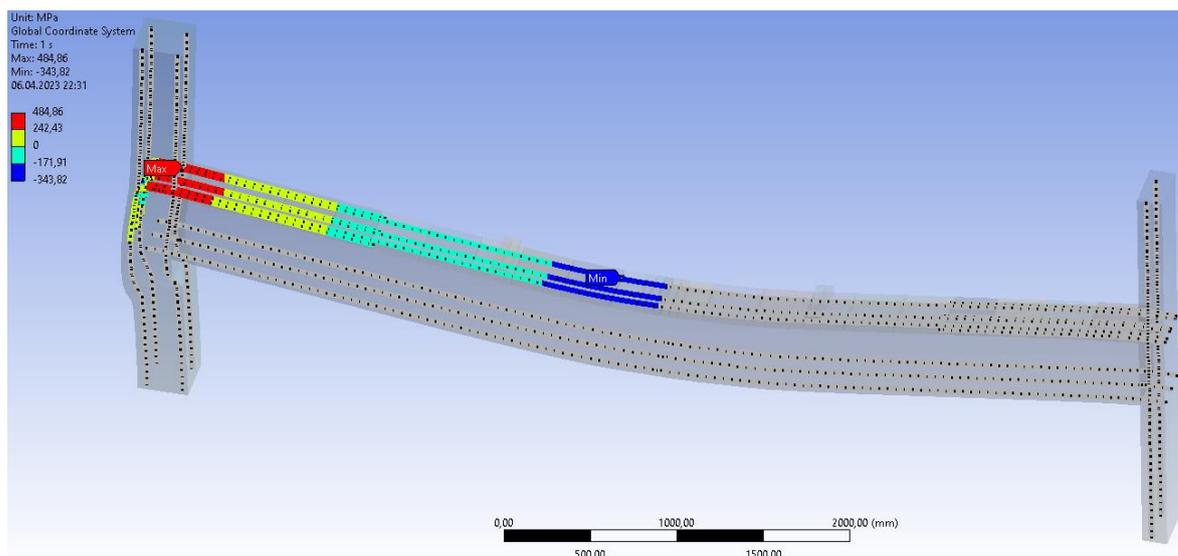


Рис. 16. - Сжимающие и растягивающие усилия в верхней арматуре у крайней опоры балки.

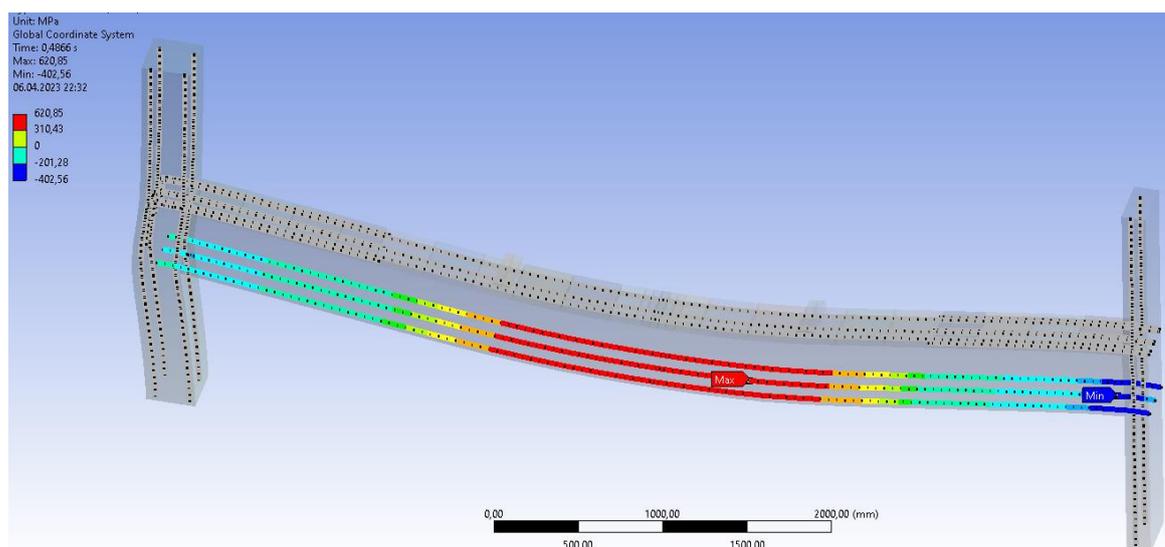


Рис. 17. - Сжимающие и растягивающие усилия нижней арматуры в пролете балки.

Коррозионные повреждения бетона и арматуры приводят не только к снижению несущей способности, увеличению прогибов, но и к перераспределению внутренних усилий [15]. На основании выполненных численных расчетов исследуемых железобетонных балок на различных этапах нагружения, представлены возникающие растягивающие усилия в арматурных стержнях пролетной и опорной части балок (Рис.18-20).

На рисунках 18-20 по вертикали показаны растягивающие усилия, по горизонтали области балки, а именно: 0 – левая опора; 1 – первый пролет; 2 – промежуточная опора; 3 – второй пролет; 4 – правая опора.

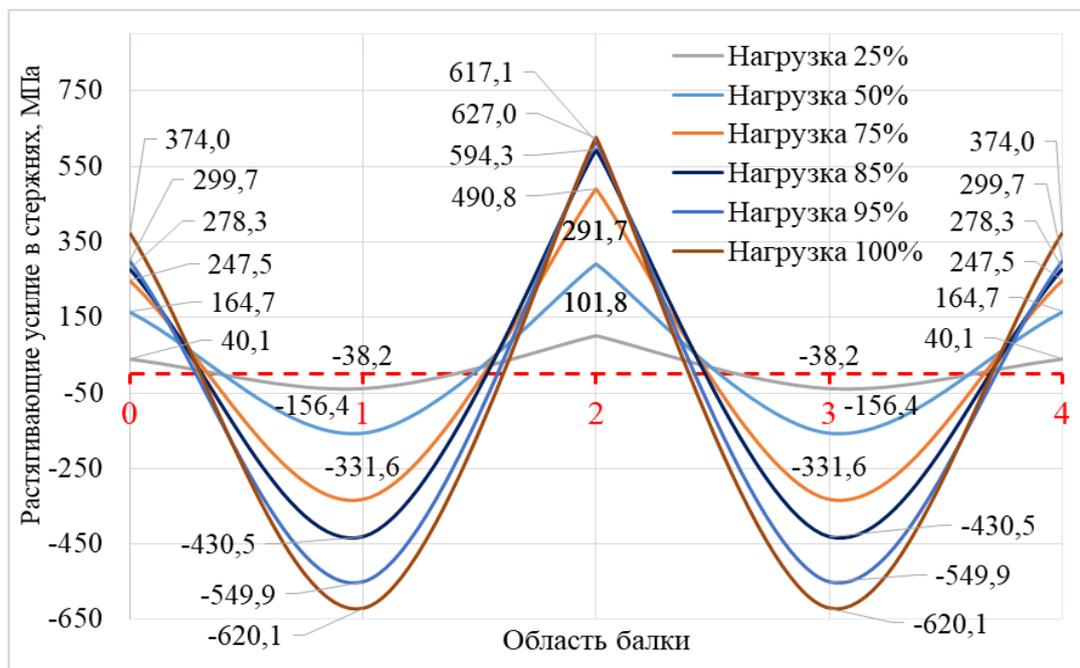


Рис. 18. – Растягивающие усилия в арматуре неповрежденной балки.

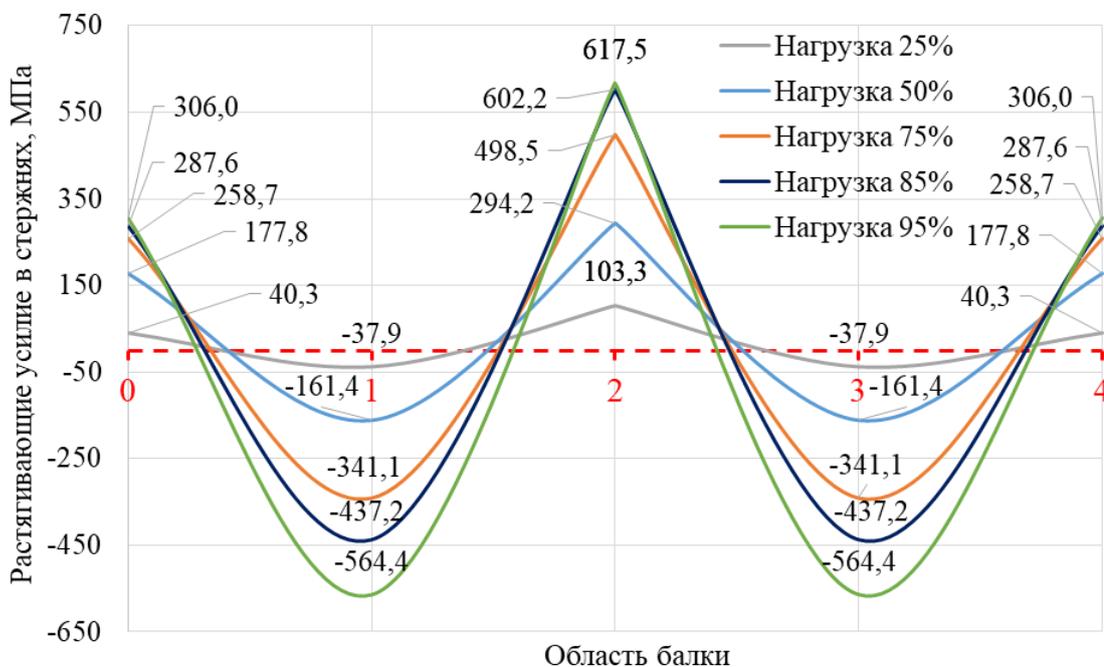


Рис. 19. – Растягивающие усилия в арматуре коррозионно-поврежденной балки (1% повреждений).

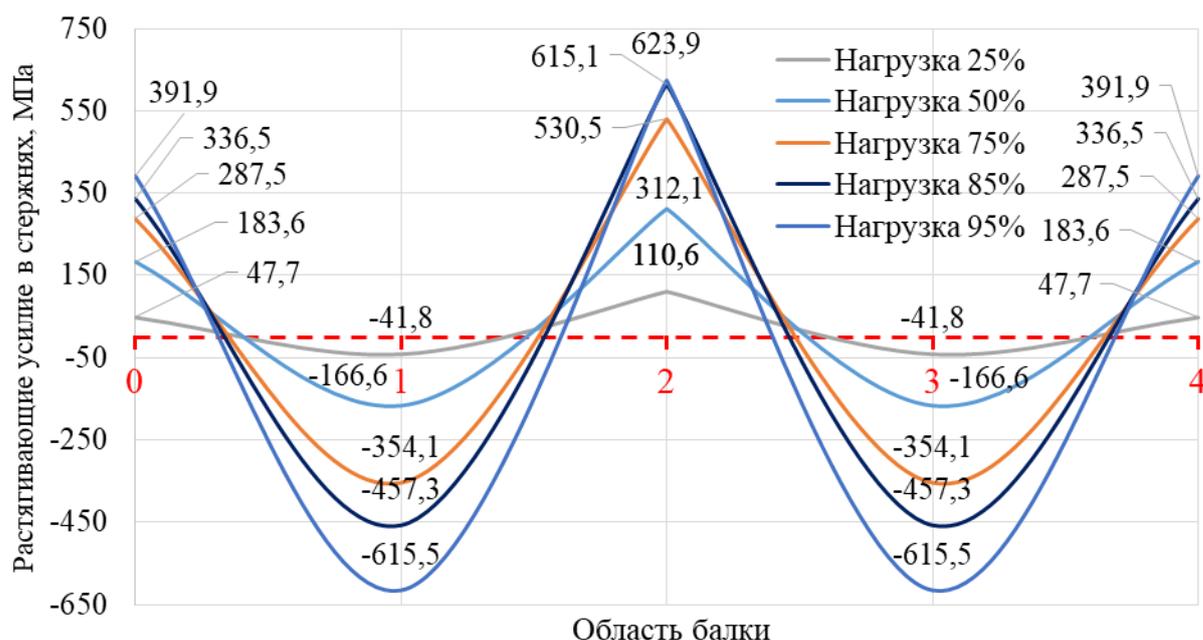


Рис. 20. – Растягивающие усилия в арматуре коррозионно-поврежденной балки (50% повреждений).

Для оценки перераспределений усилий в двухпролетных поврежденных балках выполнялся сравнительный анализ возникающих напряжений в растянутых стержнях при 25%(110кН), 50%(220кН), 75%(330кН), 85%(374кН) и 95%(418кН) от разрушающей нагрузки неповрежденной балки.

На рисунках 21,22 отображено процентное соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях первого пролета и над промежуточной опорой балок (имеющих разную степень коррозионных повреждений) относительно возникающих усилий в неповрежденной балки 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 .

Соотношения возникающих усилий при нагружении от 50% до 85% в растянутой арматуре пролетной части балки при коррозионном повреждении до 10% резко возрастают, что объясняется концентрацией возникающих усилий по причине локального повреждения. Далее, при увеличении процента повреждения до 50%, соотношение снижается и достигает 8%, при дальнейшем увеличении коррозионного повреждения, происходит повторное достаточно резкое увеличение возникающих растягивающих усилий в арматурных стержнях на всех этапах нагружения, что обуславливается коррозионными повреждениями дополнительных опорных арматурных стержней (Рис.3) в верхнем сечении балки на 25% (с $2,54\text{см}^2$ до $1,9\text{ см}^2$).

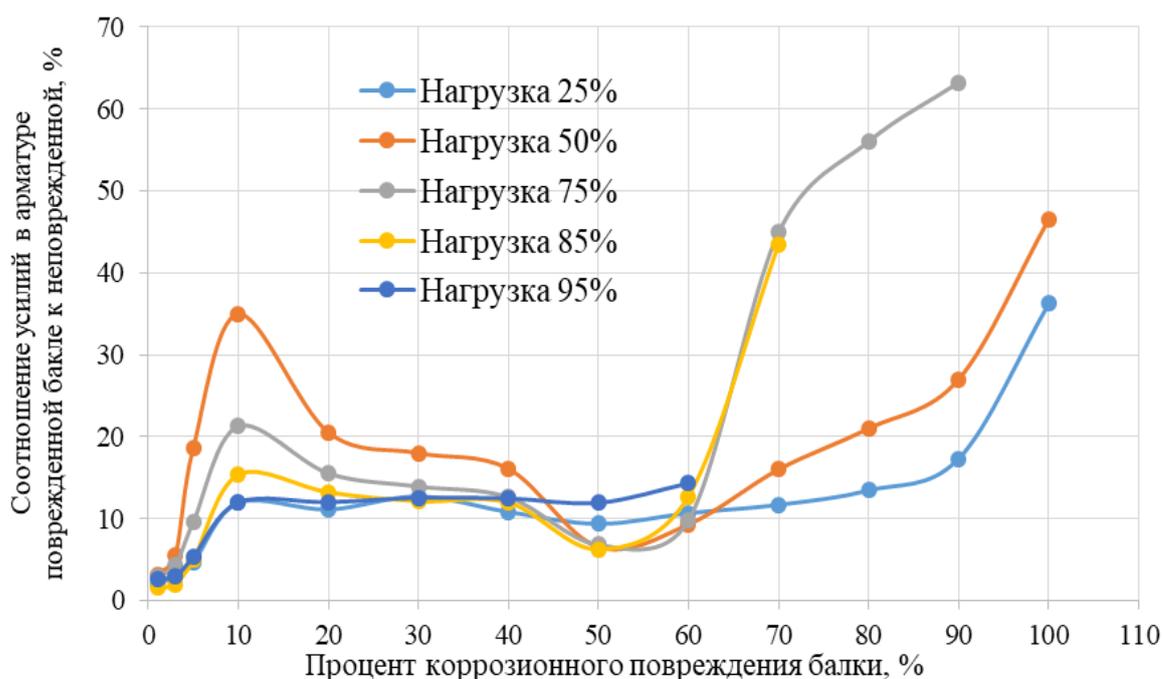


Рис. 21. - Соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях в пролете при различном % коррозионных повреждений балки.

Соотношение возникающих усилий в арматурных стержнях около промежуточной опоры имеет плавно возрастающий характер для каждого этапа нагружения (Рис. 22). Так, для коррозионных повреждений балки до 70%, соотношение возникающих растягивающих усилий в коррозионно-поврежденной арматуре относительно неповрежденной

достигает максимального значения в 10%. Соответственно, дальнейшее увеличение процента повреждений приводит уже к существенной разнице возникающих усилий, что обуславливается значительными коррозионными повреждениями балки.

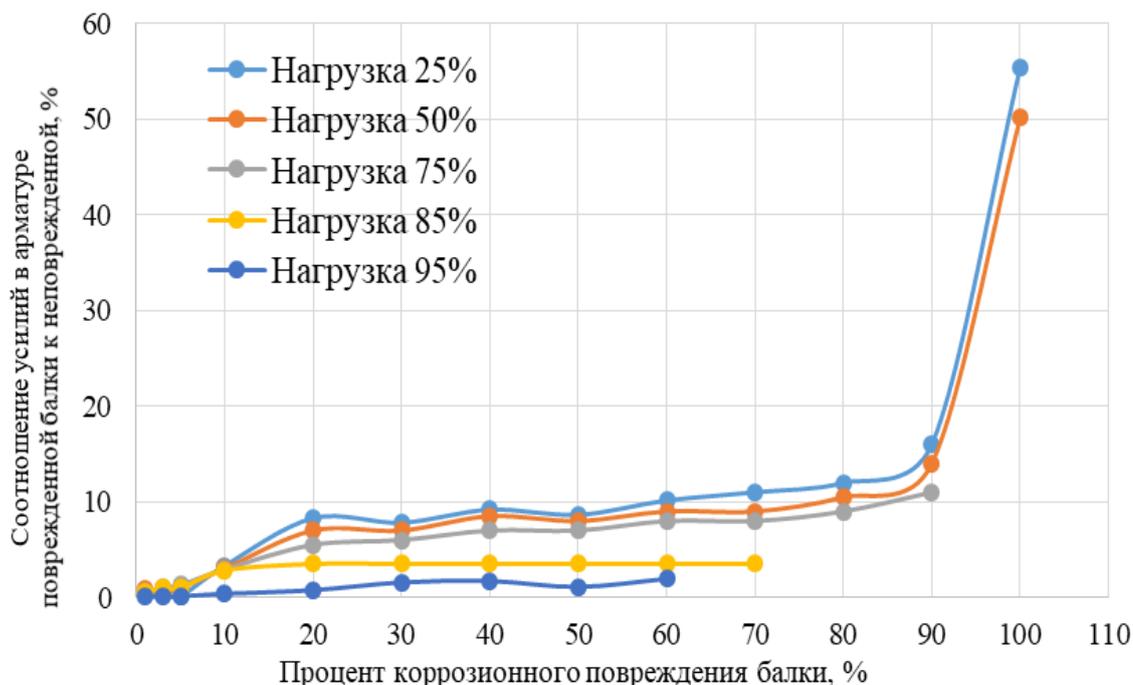


Рис. 22. - Соотношение изменения усилий в растянутых арматурных стержнях над промежуточной опорой при различном % повреждений балки.

Стоит обратить внимание, что в коррозионно-поврежденных балках в предельной стадии перед разрушением (нагрузка 85%,95%), соотношение возникающих усилий незначительное и достигает максимум 4%, что объясняется достижением прочности бетона на сжатие и текучести в растянутой арматуре, как результат на последних стадиях нагружения двухпролетных балок в надпорных зонах перераспределение усилий практически отсутствует.

Заключение

На основании выполненных исследований двухпролетных железобетонных балок имеющих различную длину коррозионных повреждений в верхнем сечении, можно сделать следующие выводы:

1. При нагружениях до 85% от разрушающей нагрузки и коррозионных повреждениях балок от 30% до 60%, соотношение прогибов относительно неповрежденной балки постоянны и находятся в диапазоне от 14% до 17% (Рис. 14).

2. В стадии перед разрушением (нагрузка 95%) коррозионные повреждения двухпролетных балок в верхнем сечении приводят к значительным увеличениям прогибов, относительно предшествующих стадий нагружения и достигают 65% (Рис. 14).

3. Усилия в растянутой арматуре пролетной части балки при коррозионных повреждениях до 10% и нагружении от 50% до 85% резко возрастают относительно неповрежденной балки, что объясняется концентрацией возникающих усилий по причине локального повреждения. Увеличение коррозионных повреждений более 60% приводит к резкому увеличению соотношений растягивающих усилий в арматуре и находится в диапазоне от 10% до 60% (Рис. 21).

4. Соотношения усилий в неповрежденной надопорной арматуре и балок, имеющих коррозионные повреждения до 70% достигает максимального значения в 10%. Последующие увеличение процента повреждений приводит к существенной разнице в возникающих усилиях и достигает 55% (Рис. 22).

5. При предельных стадиях нагружения (85%,95%), соотношение усилий в растянутой арматуре над промежуточной опорой коррозионно-поврежденных балок относительно неповрежденной незначительное, и достигает максимум 4% (Рис. 22).

Литература

1. 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.
2. Савин С.Ю., Колчунов В.В., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 46–54.
3. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. №6. С.14-21.
4. 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.
5. Кальницкий А.А. Расчёт статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. Москва. 1970. 168 с.
6. Байков В.Н. Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. Учебник для вузов. - 6-е издание. Москва: ООО «БАСТЕТ». 2009. 768 с.
7. 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.
8. Meet S., Choudhury T., Kwatra N. Investigating the nonlinear performance of corroded reinforced concrete beams // Journal of building engineering. 2021. 44. pp. 102-108.
9. Ansys Documentation: Ansys User's Guide. 1192 p.

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

11. 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.

12. 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.

13. Alekhin V, Budarin A, Pletnev M, Avdonina L. Investigation of longitudinal reinforcement contribution in shear punching of reinforced concrete flat slabs without transverse reinforcement // MATEC Web of Conferences. 2019. 279 (02):02005. DOI: 10.1051/mateconf/201927902005

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

15. Попов Д.С. Перераспределение усилий в коррозионно-поврежденных статически неопределимых двухпролетных железобетонных балках / Д. С. Попов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 7(91). – С. 393-410. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7799

References

1. Tamrazjan A. G., Mineev M.S. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. 2021. № 3(393). pp. 159-165.

2. Savin S.Yu., Kolchunov V.V., Fedorova N.V. Reinforced concrete structures. 2023. Vol. 1. No. 1. pp. 46-54.

3. Tamrazjan A.G., Rashidov B.T. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2018. №6. pp.14-21.
 4. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2022. pp. 1-9.
 5. 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.
 6. 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.
 7. Nikoljukin A.N., Jarcev V.P., Kolomnikova I.I. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2019. №5. pp. 56-65.
 8. Meet S., Choudhury T., Kwatra N. Journal of building engineering. 2021. 44. pp. 102-108.
 9. Ansys Documentation: Ansys User's Guide. p. 1192.
 10. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures, PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne. 1994. p. 179.
 11. Dmitriev A., Novozhilov, Y., Mikhalyuk D., Lalin V. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Volume 88. Article No 8804. pp. 84-91.
 12. Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Ju., Nedorezov A.V. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2021. № 5(97). pp. 16-30.
 13. Alekhin V, Budarin A, Pletnev M, Avdonina L. MATEC Web of Conferences. 2019. 279 (02):02005. DOI: 10.1051/matecconf/201927902005
 14. Popov D. S. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2022. № 2(100). pp. 55-64.
 15. Popov, D. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 7(91). pp. 393-410.
-