

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, Д.В. ТЯГУР²¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

Аннотация. Исследовано влияние пространственной неравномерности коррозионных повреждений арматуры на работоспособность изгибаемых железобетонных элементов. Экспериментально изучено распределение фактических площадей поперечных сечений арматурных стержней после коррозионного воздействия. Обработка результатов выполнена на основе трёхмерного сканирования с последующим статистическим анализом. Для количественной оценки локального ослабления сечения предложены коэффициент пространственной неоднородности коррозии и вероятностная модель его распределения, позволяющая определять расчётное минимальное сечение корродированной арматуры. Показано, что использование средней степени коррозионного повреждения приводит к завышению несущей способности изгибаемых железобетонных элементов. Учет локального характера коррозии изменяет траекторию деградации работоспособности и приводит к снижению живучести элемента. Предложенный подход позволяет перейти от оценки остаточной прочности в отдельный момент времени к интегральной оценке живучести, характеризующей степень сохранения работоспособности конструкции в процессе накопления повреждений.

Ключевые слова: изгибаемые железобетонные элементы, неравномерная коррозия, изгибная прочность, работоспособность, живучесть.

A.G. TAMRAZYAN¹, D.V. TYAGUR²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF SURVIVABILITY OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER NON-UNIFORM REINFORCEMENT CORROSION

Abstract. The influence of spatially non-uniform reinforcement corrosion on the performance and survivability of flexural reinforced concrete elements is investigated. The distribution of the actual cross-sectional areas of reinforcing bars after corrosion exposure is studied experimentally. The data are obtained using three-dimensional scanning followed by statistical analysis. To quantify local section weakening, a coefficient of corrosion non-uniformity is introduced, and a probabilistic distribution model is proposed, allowing the design minimum cross-section of corroded reinforcement to be determined. It is shown that using the average corrosion level leads to an overestimation of the load-bearing capacity of flexural reinforced concrete elements. Accounting for the localized nature of corrosion changes the degradation path of structural performance and leads to a reduction in survivability. The obtained relationships make it possible to move from evaluating residual strength at a single point in time to an integral assessment of survivability, reflecting the degree to which the structure retains its performance during damage accumulation.

Keywords: flexural reinforced concrete elements, non-uniform corrosion, flexural strength, load-bearing capacity, structural performance, survivability.

1. Введение

Длительная эксплуатация железобетонных конструкций в условиях воздействия агрессивной окружающей среды неизбежно сопровождается коррозионным повреждением арматуры. Для изгибаемых железобетонных элементов данный процесс является одним из основных факторов деградации их эксплуатационных характеристик, поскольку приводит к снижению эффективной площади поперечного сечения арматурных стержней [1,2].

Влияние коррозии, как правило, учитывается через снижение площади арматуры и соответствующее уменьшение изгибной прочности элемента. Такой подход удовлетворительно описывает поведение конструкции при равномерном износе арматурных стержней [3,4]. Однако экспериментальные исследования показывают, что фактический характер коррозионного повреждения, как правило, является локальным и сопровождается образованием участков резкого ослабления сечения [5–7]. В ряде случаев это вызывает изменение механизма разрушения изгибаемых железобетонных элементов. Вместо формирования пластического шарнира наблюдается внезапное хрупкое разрушение при уровнях коррозии, при которых несущая способность по нормальным сечениям с учетом равномерного снижения площади арматуры еще не исчерпана [8,9]. Таким образом, потеря работоспособности конструкции определяется не только снижением несущей способности, но и характером ее деградации. Для описания поведения конструкций при наличии повреждений все чаще предлагается концепция живучести, характеризующая способность элемента сохранять работоспособность при возникновении и накоплении дефектов [10,11]. В существующих исследованиях данное свойство преимущественно рассматривается применительно к аварийным воздействиям разового характера – взрывам, пожарам и локальным отказам элементов [12–14].

В целом следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе терминология, связанная с понятием живучести, не является полностью однозначной. При переводе на русский язык термином «живучесть» могут описываться как *robustness*, так и *survivability*, но их смысловые акценты не совпадают. Понятие *robustness* обычно связывается со способностью конструктивной системы противостоять локальным повреждениям без развития непропорционального разрушения. Термин *survivability*, напротив, акцентирует внимание на способности объекта функционировать в поврежденном состоянии и при накоплении повреждений, однако применительно к строительным конструкциям используется существенно реже, чем *robustness*.

Вместе с тем коррозионное повреждение арматуры в изгибаемых железобетонных элементах принципиально отличается от аварийных воздействий, представляя собой длительный процесс, постепенно снижающий работоспособность [15,16]. Следовательно, применительно к такому контексту целесообразно уточнить понятие живучести и рассматривать его как свойство конструкции, характеризующее степень сохранения ее работоспособности в процессе накопления коррозионных повреждений. В таком понимании живучесть отражает не только предельное состояние элемента, но и всю траекторию деградации его работоспособности по мере развития повреждений [10, 17].

Одним из определяющих факторов снижения работоспособности является пространственная неравномерность коррозии по длине арматуры. В настоящей работе приводится оценка влияния неравномерной коррозии арматуры на живучесть изгибаемых железобетонных элементов на основе экспериментальных данных о распределении фактических площадей поперечных сечений арматуры при коррозионных повреждениях.

2. Модели и методы

Для оценки неравномерности коррозии по длине арматурных стержней в рамках проводимого исследования в лаборатории кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» НИУ МГСУ были изготовлены образцы в виде призм 70х70х400 мм из бетона В20 с забетонированными арматурными стержнями длиной 300 мм периодического профиля Ø8 А500С и Ø12 А500С.

Образцы были разделены на 6 групп в зависимости от уровня коррозии и диаметра арматурного стержня. Предусматривалось получение коррозионных повреждений арматуры на уровнях 10, 20 и 30 % методом ускоренной электрохимической коррозии [19]. Образцы размещались в пластиковой емкости, заполненной 5 %-ным водным раствором хлорида натрия (NaCl). К арматурному стержню подключался положительный полюс источника постоянного тока, а отрицательный – к электролиту. Воздействие осуществлялось при постоянной силе тока 0,5 А.

После завершения ускоренного коррозионного воздействия арматурные стержни извлекались из образцов, бетон удалялся вручную без повреждения металла, после чего стержни обрезались по крайевым зонам и подготавливались к измерениям. Геометрия корродированных стержней определялась методом оптического 3D-сканирования на сканере RangeVision PRO, по результатам которого были получены цифровые модели, использованные для последующей обработки фактических площадей поперечного сечения (рис. 1).

Для анализа пространственной неоднородности коррозии трехмерные модели арматурных стержней обрабатывались с помощью специального ПО последовательным определением фактических площадей поперечного сечения A_x вдоль продольной оси с шагом 1 мм, что позволило сформировать массив экспериментальных данных. Оценка локального ослабления арматуры выполнялась по расчетным участкам длиной 50 мм с использованием коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k , определяемого как отношение средней площади поперечного сечения стержня к минимальной площади в пределах соответствующего участка (рис. 2).

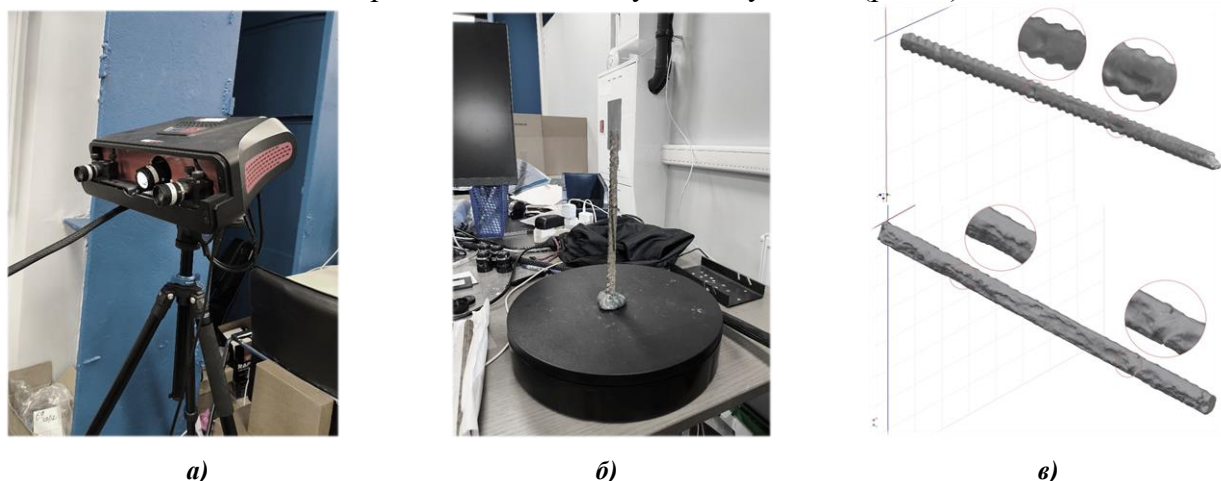


Рисунок 1 – Лазерное 3D - сканирование корродированных арматурных стержней:
 а) общий вид 3D-сканера RangeVision PRO; б) арматурный стержень на поворотном столе;
 в) цифровая 3D - модель корродированного стержня

Для каждого расчетного участка длиной 50 мм определялись значения коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k . На основе полученного массива данных R_k построены гистограммы распределения, анализ которых показал выраженную правостороннюю асимметрию и увеличение разброса значений по мере роста среднего уровня коррозионного повреждения, что свидетельствует об усилении локального характера коррозии.

По виду распределений было выдвинуто предположение о подчинении коэффициента R_k закону экстремальных значений (распределению Гумбеля). Для проверки гипотезы выполнена статистическая верификация графическим методом вероятностных графиков и

количественным методом по критерию согласия Колмогорова–Смирнова, подтвердившая принятую модель распределения [20].

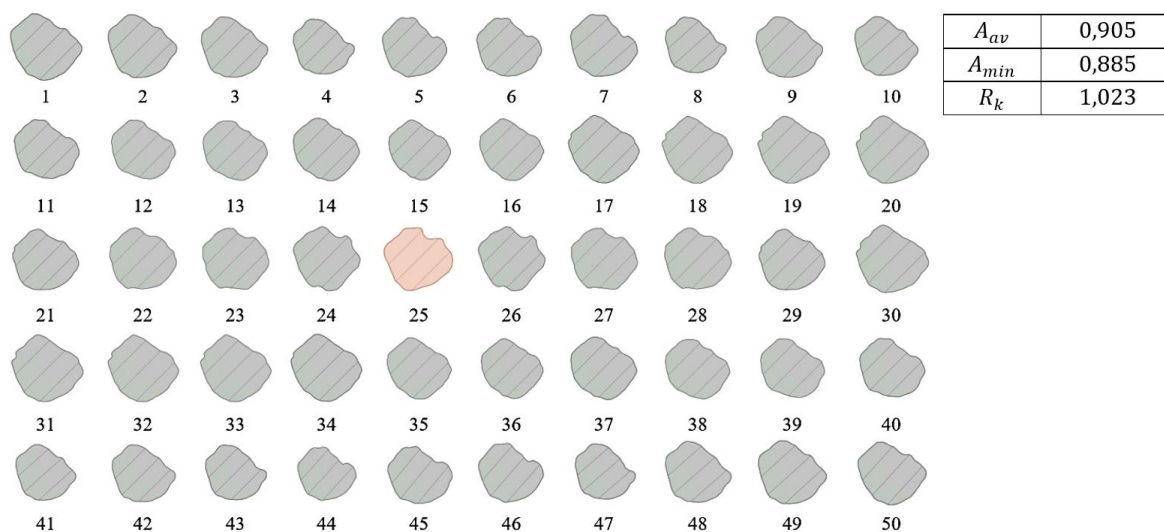


Рисунок 2 – Фактические поперечные сечения корродированных арматурных стержней на примере одного расчетного участка

По экспериментальным данным для коэффициента пространственной неоднородности коррозии R_k установлено, что его распределение соответствует закону экстремальных значений по распределению Гумбеля (рис. 3). Оценка параметров распределения μ и β выполнялась методом максимального правдоподобия [20]. Для выявления влияния степени коррозионного повреждения на статистические характеристики локального ослабления арматуры проведён регрессионный анализ зависимости параметров распределения от средней потери массы X_p . В качестве аппроксимирующей принята линейная зависимость $\mu(X_p)$ и $\beta(X_p)$, по которой определены значения параметров для характерных уровней коррозии 10, 20 и 30 %.

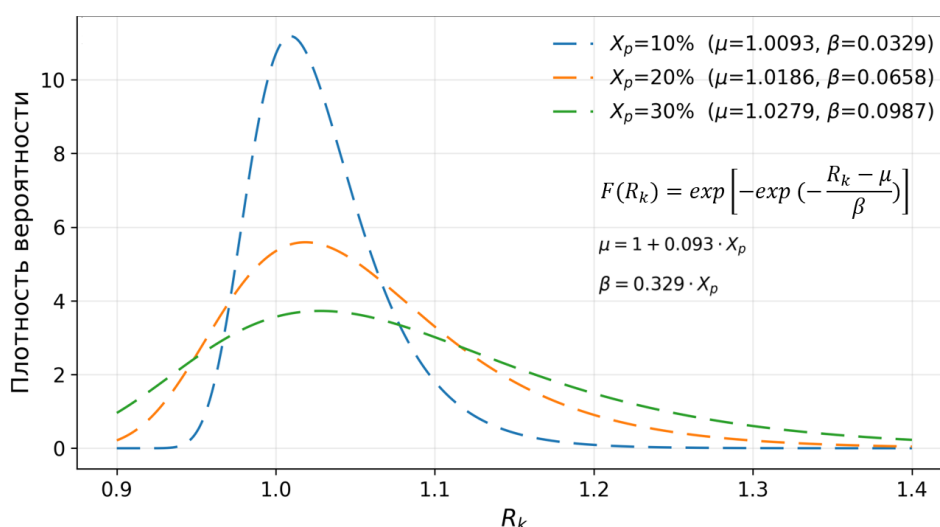


Рисунок 3 – Плотность распределения вероятности R_k для арматуры диаметром 12 мм при различных уровнях коррозионных повреждений

Для анализа снижения относительной несущей способности по диапазону повреждений и перехода от описания деградации прочности в точке к интегральной оценке определения остаточной работоспособности по мере развития коррозии арматуры используется метод оценки живучести, предложенный в работе [22]:

$$R = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T \rho(t) dt = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T \frac{M_{ult}(t)}{M_{ult}(0)} dt \quad (1)$$

где T_0 – время начала активной коррозии, лет ; T – момент времени, до которого выполняется оценка живучести или расчетный срок эксплуатации, лет ; $\rho(t)$ – нормированная функция снижения несущей способности; $M_{ult}(t)$ – функция снижения предельного изгибающего момента при коррозии арматуры во времени; $M_{ult}(0)$ – предельный изгибающий момент в неповрежденном состоянии;

Нормированная функция снижения несущей способности, отражающая, остаточный уровень несущей способности по мере развития коррозии с учетом неравномерности по длине арматуры в данном случае определяется:

$$\rho(t) = \frac{M_{ult}(t)}{M_{ult}(0)} = \frac{R_s \cdot A_{min}(t) \cdot [h_0 - 0,5 \cdot x(t)]}{R_s \cdot A_{s0} \cdot [h_0 - 0,5 \cdot x_0]} \quad (2)$$

Используя математическое ожидание коэффициента пространственной неоднородности коррозии $E[R_k]$, определим расчётное значение минимальной площади поперечного сечения арматуры в пределах расчетного участка при конкретном уровне коррозии:

$$A_{min} = \frac{A_{av}}{E[R_k]}. \quad (3)$$

где $E[R_k] = \mu + \gamma\beta$ – математическое ожидание коэффициента пространственной неоднородности коррозии, $\gamma = 0,5772$ – постоянная Эйлера [20]; μ, β – параметры распределения Гумбеля (рис. 3).

При этом средняя оставшаяся площадь арматуры при коррозионном повреждении определяется через степень коррозии $A_{av} = A_s(1 - X_p)$. Получим выражение для ожидаемой минимальной площади поперечного сечения арматуры в следующем виде:

$$A_{min} = \frac{A_s(1 - X_p)}{\mu + \gamma\beta}. \quad (4)$$

Степень коррозии поперечного сечения, определим через скорость коррозии:

$$X_p(t) = \delta_{\emptyset D} \cdot [t - T_0] \quad (5)$$

где $\delta_{\emptyset D}$ – доля площади арматуры, теряемая за год после момента начала коррозии для диаметра d ; T_0 – время начала активной коррозии; t – текущий момент времени эксплуатации конструкции с момента начала коррозии.

Тогда $x(t)$ – высота сжатой зоны бетона в момент времени t с учетом $A_{min}(t)$ определяется следующим образом:

$$x(t) = \frac{R_s \cdot A_{min}(t)}{R_b \cdot b} = x_0 \cdot \frac{(1 - X_p(t))}{\mu + \gamma\beta} \quad (6)$$

Соответственно, выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$\rho(t) = \frac{1 - X_p(t)}{\mu + \gamma\beta} \cdot \frac{h_0 - 0,5 \cdot x_0 \left[\frac{1 - X_p(t)}{\mu + \gamma\beta} \right]}{h_0 - 0,5 \cdot x_0} \quad (7)$$

Далее представим $\rho(t)$ в виде квадратичной аппроксимации $\rho(\tau)$ с учетом $\tau = t - T_0$, $\eta_s(\tau) = \delta_{\emptyset D} \cdot \tau$:

$$\rho(\tau) \approx 1 + p\tau + q\tau^2 \quad (8)$$

где p, q – коэффициент разложения по времени, $p = -\delta_{\emptyset D}(1 + \alpha + \lambda)$, $p = \delta_{\emptyset D}^2[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)]$, λ характеризует чувствительность изгибающего момента к изменению высоты сжатой зоны $\lambda = \frac{0,5 \cdot x_0}{h_0 - 0,5 \cdot x_0}$, α – коэффициент экстремальности, характеризует степень неравномерности коррозии (для стержней $d_s = 12$ мм $\alpha = 0,6$)

Подставляя выражение (7) в (1), с учетом $\Delta T = T - T_0$ получим:

$$R = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} \rho(\tau) d\tau = \frac{1}{\Delta T} \left[\Delta T + \frac{p}{2} \Delta T^2 + \frac{q}{3} \Delta T^3 \right] = 1 + \frac{p}{2} \Delta T + \frac{q}{3} \Delta T^2 \quad (9)$$

Введем обозначение $K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda)$, $K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)]$.

Окончательное выражение для интегрального показателя живучести с учетом неравномерности коррозии арматуры принимает форму:

$$R = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 \quad (10)$$

Соответственно, для оценки живучести в случае допущения о равномерной коррозии коэффициент экстремальности $\alpha = 0$.

Для количественной оценки влияния неравномерности коррозии арматуры на снижением несущей способности и показатель живучести была рассмотрена балка прямоугольного сечения $120 \times 150 \times 2300$ мм из бетона класса В25, армированная двумя стержнями класса А500С диаметром 12 мм [23]. Из расчета нормального сечения железобетонного изгибаемого элемента с одиночным армированием [21] сниженную несущую способность при коррозии продольной арматуры с учетом неравномерности определим из условия: $M_{ult}(A_{min}) = R_s A_{min} (h_0 - 0,5x)$. И соответственно при допущении равномерной коррозии сниженная несущая способность определяется: $M_{ult}(A_{av}) = R_s A_{av} (h_0 - 0,5x)$.

Коррозионные повреждения рассматривались на растянутой арматуре в диапазоне по степени коррозии от 0 до 0,3 со скоростью 2% в год. Рассматриваемый период с начала коррозии арматуры 15 лет - за это время средняя потеря площади составит 30%. Для сопоставимости результатов был введен относительный уровень коррозии $\bar{X}_p$, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, где единица соответствует 30% потери площади арматуры. На основе выполненных расчётов получены значения относительной несущей способности в поврежденном состоянии для случая допущения о равномерной коррозии $M_{ult}(A_{av})/M_{ult}(0)$ и с учетом неравномерности $M_{ult}(A_{min})/M_{ult}(0)$.

Вычислим значение коэффициентов K_1 и K_2 для случая неравномерной коррозии:

$$K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda) = \frac{1}{2}(1 + 0,6 + 0,153) = 0,876.$$

$$K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)] = \frac{1}{3}[0,6(1 + 0,6) + 0,153(1 + 0,6 + 0,6^2)] = 0,420.$$

Расчёт интегрального показателя живучести при учете неравномерности коррозии арматуры:

$$R_{(1)} = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 = 1 - 0,876 \cdot 0,02 \cdot 15 + 0,420 \cdot (0,02 \cdot 15)^2$$

$$R_{(1)} = 0,775$$

Для сравнения со случаем равномерной коррозии вычислим значения коэффициентов K_1 и K_2 при $\alpha = 0$:

$$K_1 = \frac{1}{2}(1 + \alpha + \lambda) = \frac{1}{2}(1 + 0 + 0,153) = 0,577.$$

$$K_2 = \frac{1}{3}[\alpha(1 + \alpha) + \lambda(1 + \alpha + \alpha^2)] = \frac{0,153}{3} = 0,051$$

$$R_{(2)} = 1 - K_1 \cdot \delta_{\phi D} \Delta T + K_2 \cdot \delta_{\phi D}^2 \Delta T^2 = 1 - 0,577 \cdot 0,02 \cdot 15 + 0,051 \cdot (0,02 \cdot 15)^2$$

$$R_{(2)} = 0,832$$

Данный подход отличается от оценки остаточной несущей способности в одной точке при фиксированном значении коррозии, поскольку учитывает всю траекторию деградации, т.е. то, как быстро снижается работоспособность по мере развития коррозии. Полученные значения относительной несущей способности и живучести для двух вариантов коррозии приведены на диаграмме (рис. 4).

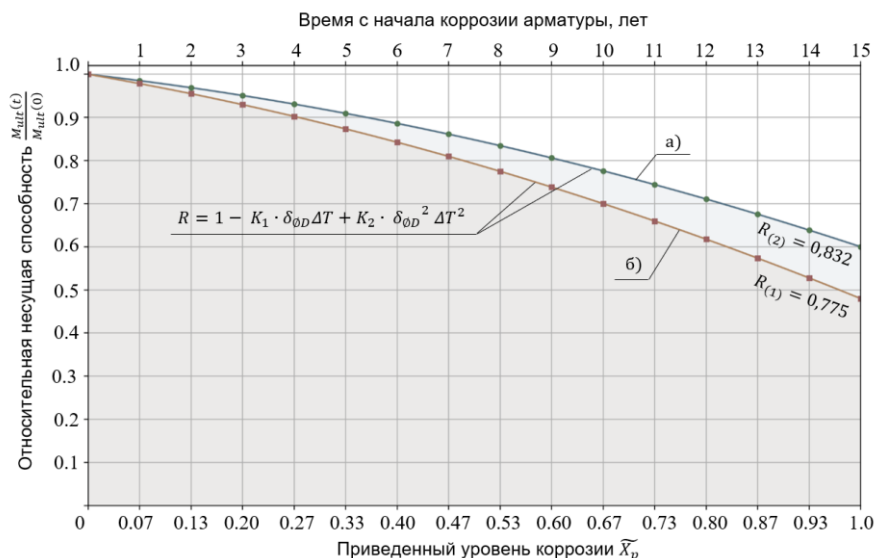


Рисунок 4 – Диаграмма снижения относительной несущей способности от приведенного уровня коррозии арматуры с учётом: а) равномерной коррозии; б) неравномерной коррозии;

3. Результаты исследования и их анализ

Проведённые экспериментальные исследования позволили количественно оценить влияние неравномерности коррозионных повреждений арматуры на несущую способность и живучесть изгибаемых железобетонных элементов. Введённый коэффициент пространственной неоднородности коррозии R_k количественно характеризует локальное повреждение стержня. Установлено, что его распределение подчиняется закону экстремальных значений (распределению Гумбеля), что указывает на факт того, что действительное состояние арматуры определяется не средней потерей площади, а вероятностью появления поврежденного сечения с минимальной остаточной площадью на ограниченном участке длины. Использование средней остаточной площади сечения приводит к систематическому завышению несущей способности нормального сечения. Таким образом, ошибка носит не случайный, а закономерный характер и возрастает по мере развития коррозионных повреждений.

Интегральная оценка живучести подтверждает данный эффект. Учёт неравномерности коррозии приводит к снижению показателя живучести с 0,832 до 0,775 ($\approx 7\%$). Несмотря на относительно небольшую величину расхождения, его физический смысл существенно важнее абсолютного значения: меняется не только остаточная несущая способность в отдельный момент времени, а вся траектория деградации работоспособности конструкции, что означает ускоренную потерю работоспособности при длительной эксплуатации. При запасе прочности около 25–30% от проектной несущей способности разница в 7% по интегральному показателю потерю до 15% от начального запаса несущей способности т.е. элемент может перейти в аварийное состояние на 5–7 лет раньше прогнозируемого срока при равномерной модели коррозии арматуры.

4. Заключение

1. Экспериментально изучен локальный характер коррозионных повреждений арматуры в бетоне. Отношение средней площади сечения к минимальной (R_k) на расчетном участке возрастает с увеличением степени коррозии, достигая при 30 % коррозионном повреждении значений 1,18–1,21 в зависимости от диаметра стержня.

2. Получены зависимости параметров распределения μ и β от среднего уровня коррозии X_p , позволяющие прогнозировать статистические характеристики локальных ослаблений для арматуры различного диаметра.

3. Для определения расчётной минимальной площади сечения корродированной арматуры предложено использование математического ожидания $E[R_k]$, что даёт возможность количественно учитывать неравномерность коррозии при расчёте несущей способности нормальных сечений и оценке живучести.

4. Установлено, что допущение о равномерной коррозии приводит к систематическому завышению несущей способности.

5. Показано, что живучесть элемента при учёте неравномерности повреждений снижается по сравнению со случаем равномерной коррозии, что отражает более интенсивную деградацию работоспособности при локальном характере износа арматуры.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект по теме «Оценка технического состояния зданий на основе параметров живучести и риска», номер темы FSWG 2024-0003 (госзадание НИУ МГСУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоляго Г. А., Фролов Н. В., Дронов А. В. Анализ коррозионных повреждений эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 52–57
2. Бондаренко В.М. Специфика силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных конструкций и новые факторы разрушения // Строительство и реконструкция – 2009. №4. С.28-33.
3. Методические рекомендации «Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений» Москва, 2018. 50 с
4. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой. Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
5. Тамразян, А. Г. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках / А. Г. Тамразян, Й. А. К. Сайед // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 557–568.
6. Дронов, А. В. Особенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов / А. В. Дронов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 32-36.
7. Rodriguez, J., Ortega, LM and Casal, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and Building Materials, 11(4):239–248, 1997.
8. Тамразян А.Г., Попов Д.С. К влиянию армирования сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента на кинетику развития коррозионных повреждений // Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова. 2017. - С. 153-157
9. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий. Железобетонные конструкции. 2023;1(1):46-54.
10. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений. Железобетонные конструкции. 2023;3(3):62-74.
11. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 22–28.
12. Колчунов В.И., Савин С.Ю. Устойчивость железобетонных каркасов зданий к начальному локальному разрушению // Известия вузов. Строительство. 2024. No 10. С. 50–64.
13. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с
14. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047
15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures. 2004. Vol. 37. Pp. 623–633.
16. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Wiley, 2013. 434 p.
17. Cavaco, Eduardo S, Casas, Joan R, Neves, Luis AC and Huespe, Alfredo E. Robustness of corroded reinforced concrete structures—a structural performance approach. Structure and Infrastructure Engineering, 9(1):42–58, 2013.

18. Bontempi F, Giuliani L, Gkoumas K. Handling the exceptions: Robustness assessment of a complex structural system. Proceedings of the 3rd international conference on structural engineering, mechanics and computation (SEMC 2007). Rotterdam: Millpress; 2007. p. 1747–52
19. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. Моногрф. / В.Н. Мигунов, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 362 с.
20. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Сб. статей. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
21. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
22. Тамразян, А. Г. Методика определения живучести изгибаемых железобетонных элементов при коррозии арматуры / А. Г. Тамразян, Д. В. Тягур // Экономика строительства. – 2025. – № 11. – С. 714-718.
23. Rodriguez, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement / J. Rodriguez, L. M. Ortega, J. Casal // Construction and Building Materials. – 1997. – Vol. 11, no. 4. – Pp. 239–248.

REFERENCES

1. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analiz korrozionnyh povrezhdenij jekspluatiruemyh izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij zdaniy i sooruzhen [Analysis of corrosion damages of reinforced concrete structures in operation]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2019, no. 1, pp. 52–57. (rus)
2. Bondarenko V.M. Specifika silovogo soprotivleniya povrezhdennyh korroziej zhelezobetonnyh konstrukcij i novye faktory razrusheniya [Specific features of load-bearing resistance of corrosion-damaged reinforced concrete structures and new failure factors]. Stroitel'stvo i rekonstrukcija [Construction and Reconstruction], 2009, no. 4, pp. 28–33. (rus)
3. Metodicheskie rekomendacii “Metodika ocenki ostatochnogo resursa nesushhih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij” [Guidelines “Methodology for assessing the residual service life of load-bearing structures of buildings and structures”]. Moscow, 2018, 50 p. (rus)
4. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slab with corroded reinforcement. Construction and reconstruction. 2022. No. 1 (99). P. 89-98
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Svrnenie pereraspredeleniya momentov v korrodirovannyh i nekorrodirovannyh staticheski neopredelimyyh zhelezobetonnyh balkah [Comparison of moment redistribution in corroded and non-corroded statically indeterminate reinforced concrete beams]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2024, vol. 19, no. 4, pp. 557–568. (rus)
6. Dronov A.V. Osobennosti razvitiya pittingovoy korrozii stal'noj armatury zhelezobetonnyh izgibaemyh jelementov [Features of pitting corrosion development of steel reinforcement in flexural reinforced concrete elements]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2017, no. 3, pp. 32–36. (rus)
7. Rodriguez, J., Ortega, LM and Casal, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. Construction and Building Materials, 11(4):239–248, 1997.
8. Tamrazyan A.G., Popov D.S. K vliyaniju armirovaniya szhatoy zony izgibaemogo zhelezobetonного jelementa na kinetiku razvitiya korrozionnyh povrezhdenij [On the influence of compression zone reinforcement of a flexural reinforced concrete element on the kinetics of corrosion damage development]. In: Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Nauka i innovacii v stroitel'stve” [International Scientific and Practical Conference “Science and Innovations in Construction”], Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2017, pp. 153–157. (rus)
9. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts. Reinforced concrete structures. 2023;1(1):46-54.
10. Tamrazyan A.G. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. Reinforced concrete structures. 2023;3(3):62-74.
11. Tamrazyan A.G. Zhivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstrukcij pri povrezhdenii [Survivability as the degree of operability of structures in case of damage]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2023, no. 7, pp. 22-28. (rus).
12. Kolchunov V.I., Savin S.YU. Ustojchivost' zhelezobetonnyh karkasov zdaniy k nachal'nomu lokal'nomu razrusheniyu [Stability of reinforced concrete building frames to initial localized failure] // Izvestiya vuzov. Construction. 2024. No 10. Pp. 50–64. (rus).
13. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnyyh vozdeystviyah. [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow: ACB, 2014. 208 p. (rus).
14. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // MATEC Web of Conferences / ed. Volkov A., Pustovgar A., Adamtsevich A. 2018. Vol. 251. P. 02047

15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // *Materials and Structures*. 2004. Vol. 37. Pp. 623–633.
16. Bertolini L., Elsener B., Pedersen P., Redaelli E., Polder R.B. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley, 2013. 434 p.
17. Cavaco, Eduardo S, Casas, Joan R, Neves, Luis AC and Huespe, Alfredo E. Robustness of corroded reinforced concrete structures—a structural performance approach. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(1):42–58, 2013.
18. Bontempi F, Giuliani L, Gkoumas K. Handling the exceptions: Robustness assessment of a complex structural system. *Proceedings of the 3rd international conference on structural engineering, mechanics and computation (SEMC 2007)*. Rotterdam: Millpress; 2007. p. 1747–52
19. Migunov V.N., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. Jeksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstrukcij v uslovijah korrozii [Experimental-theoretical modeling of reinforced structures under corrosion conditions]. Penza, PGUAS, 2014, 362 p. (rus)
20. Kolmogorov A.N. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika: Sbornik statej* [Theory of Probability and Mathematical Statistics: Collected Papers]. Moscow, Nauka, 1986, 535 p. (rus)
21. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. SNiP 52-01-2003 (with Amendment No. 1) Code of Regulations from 19.12.2018
22. Tamrazyan A.G., Tyagur D.V. Metodika opredeleniya zhivuchesti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri korrozii armatury [Methodology for determining the survivability of bent reinforced concrete elements under reinforcement corrosion]. *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of Construction]. 2025, no. 11, pp. 714-718. (rus.).
23. Rodriguez, J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement / J. Rodriguez, L. M. Ortega, J. Casal // *Construction and Building Materials*. – 1997. – Vol. 11, no. 4. – Pp. 239–248.

Информация об авторах

Тамразян Ашот Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия
Д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Тягур Дмитрий Владимирович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия.
Аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: d_tyagur@mail.ru

Information about authors

Tamrazyan Ashot G.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia.
Doctor in tech. sc., Prof, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Tyagur Dmitry VI.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), Moscow, Russia.
Postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures,
E-mail: d_tyagur@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.01.2025
Одобрена после рецензирования 12.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 10.01.2025
Approved after reviewing 12.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026