

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568

Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках

Ашот Георгиевич Тамразян, Йехия Ахмед Котп Сайед

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается актуальный вопрос перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках, подвергающихся коррозии. Статически неопределимые железобетонные балки широко используются в различных строительных приложениях, и понимание того, как коррозия влияет на перераспределение моментов в таких балках, является важным для оценки их несущей способности и безопасности. Применяются экспериментальные и аналитические методы для изучения влияния коррозии на перераспределение моментов в железобетонных балках.

Материалы и методы. Использована новая техника для ускорения и контроля присутствующей коррозии, применяемой в соответствии с экспериментальной программой. Испытаны четыре двухпролетных железобетонные балки с коррозией и без при изгибающем моменте.

Результаты. Экспериментальные результаты сравнили между собой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что коррозия оказывает существенное влияние на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Перераспределение моментов увеличивается с ростом процента коррозии. Предлагаемая модель позволяет в значительной степени определить коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

Выводы. Исследование подчеркивает существенное влияние коррозии на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Полученные результаты показывают, что с увеличением процента коррозии происходит соответствующее увеличение перераспределения моментов. Полученные результаты могут стать основой для разработки будущих стратегий по снижению влияния коррозии на статически неопределимые железобетонные балки, что будет способствовать улучшению проектирования конструкций и практики их эксплуатации в строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: статически неопределимые железобетонные балки, перераспределение моментов, коррозия, метод ускоренной коррозии, пластический шарнир, надежность, прочность конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 557–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568

Автор, ответственный за переписку: Йехия Ахмед Котп Сайед, engyehia250@gmail.com.

Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion

Ashot G. Tamrazyan, Yehia Ahmed Kotp Sayed

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The actual question of redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete (RC) beams subjected to corrosion is considered. Statically indeterminate RC beams are widely used in various construction applications, and understanding how corrosion affects the redistribution of moments in such beams is important for assessing their load-bearing capacity and safety. Experimental and analytical methods are applied to study the effect of corrosion on the redistribution of moments in RC beams.

Materials and methods. To carry out this investigation, a new technique was implemented to accelerate and control the corrosion process, applied according to the experimental programme. Four two-span reinforced concrete beams, both with and without induced corrosion, were subjected to bending moments in the experimental setup. The methods involved careful application of corrosion, and the experimental programme aimed to simulate real-world conditions.

Results. The experimental results were compared for the beams with and without corrosion. The analysis revealed significant effects of corrosion on the redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete beams. Furthermore, the de-

gree of corrosion was found to be directly proportional to the increased redistribution of moments. Moreover, the proposed model can significantly determine the redistribution coefficient of moments in statically indeterminate RC beams.

Conclusions. This study highlights the significant influence of corrosion on the redistribution of moments in statically indeterminate reinforced concrete beams. The results obtained show that as the corrosion percentage increases, there is a corresponding increase in the redistribution of moments. The results obtained can provide a basis for the development of future strategies to reduce the effects of corrosion on statically indeterminate reinforced concrete beams, thereby improving structural design and construction practices.

KEYWORDS: statically indeterminate RC beams, moments redistribution, corrosion, accelerated corrosion method, plastic hinge, reliability, structural strength

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Sayed Ye.A.K. Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):557-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568 (rus.).

Corresponding author: Yehia Ahmed Kotp Sayed, engyehia250@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия — распространенная проблема в железобетонных конструкциях, влияющая на их прочность и структурную целостность, со временем может привести к дорогостоящим ремонтам или в худшем случае к катастрофическим отказам [1–5]. Среди конструктивных элементов статически неопределимых железобетонных балок имеют большое значение для несущей способности и безопасности [6, 7]. Рассмотрен актуальный вопрос перераспределения моментов в железобетонных балках, подвергающихся коррозии. Перераспределение моментов в статически неопределимых балках хорошо изучено в строительной инженерии [8, 9], влияние коррозии на этот феномен менее исследовано. По мере развития коррозии внутри бетона она изменяет свойства материала, что может привести к неожиданному структурному поведению [5, 10].

Имеются многочисленные работы, в которых рассматривается влияние коррозии на элементы из бетона [11, 12]. Исследователи определили химические и электрохимические процессы, вызывающие и прогрессирующие коррозию в железобетонных конструкциях, уделив особое внимание негативному воздействию на прочность и структурную целостность [13, 14]. Раскрашивание, отслоение и потеря сцепления между арматурой и бетоном — широко известные проявления коррозии [15]. Они приводят к преждевременному разрушению и ухудшению эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций [16].

Перераспределение моментов — важный аспект поведения конструкций в статически неопределимых балках [17]. Понимание того, как в этих балках распределяются моменты и адаптируются к изменениям условий нагружения, является фундаментальным для обеспечения их структурной безопасности [18].

Накопленный опыт изучения перераспределения моментов в статически неопределимых балках [6–9] привел к разработке методологий и руководств проектирования, которые позволяют инженерам точно предсказывать и контролировать перераспределение моментов [17, 18]. Однако влияние коррозии на перераспределение моментов в таких балках

остается относительно неисследованной областью. Взаимодействие коррозии и перераспределения моментов представляет собой уникальное и сложное поле для изучения. В то время как коррозия, вызванная деградацией материала, достаточно хорошо рассмотрена, ее специфические эффекты на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках менее понятны. В настоящее время ограниченное количество публикаций прямо затрагивали взаимодействие коррозии и перераспределения моментов в железобетонных балках [19, 20], что подчеркивает необходимость всестороннего изучения для заполнения имеющихся пробелов в знаниях в этой области. Более того, нормативные документы не рассматривали вопрос перераспределения моментов при наличии коррозии и ее различные эффекты на работоспособность статически неопределимых железобетонных балок.

Цель данной статьи — изучение влияния коррозии на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках путем сочетания экспериментального исследования и аналитических методов. Понимая, как коррозия воздействует на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках, инженеры и исследователи могут создавать более точные прогностические модели, оценивать безопасность существующих конструкций и разрабатывать эффективные стратегии борьбы с коррозией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По экспериментальной программе четыре железобетонные балки с двумя пролетами, размерами $120 \times 150 \times 2150$ мм, были доведены до разрушения. Бетон, используемый в экспериментальной программе, класса В20. Конфигурация балок, детали армирования, а также нагрузочная и опорная схемы показаны на рис. 1. Балки были симметрично армированы двумя стержнями диаметром 12 мм сверху и снизу, а также замкнутыми стержнями диаметром 6 мм, расположенными через 75 и 150 мм.

Прочность полученного бетона определена через одноосное сжатие на кубках размером $100 \times 100 \times 100$ мм. Во время заливки балок подготовлено

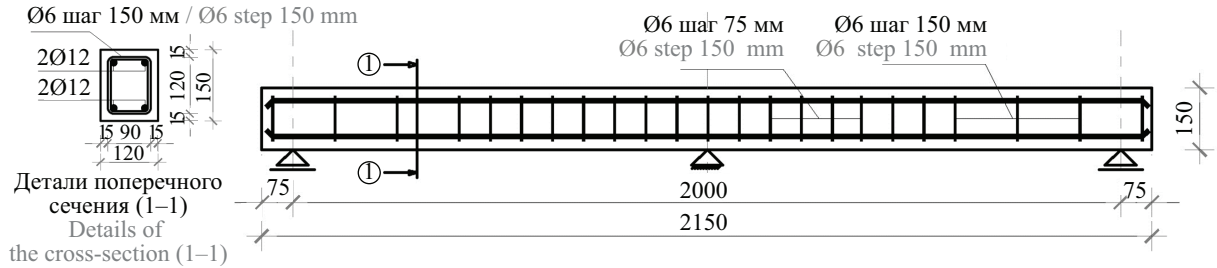


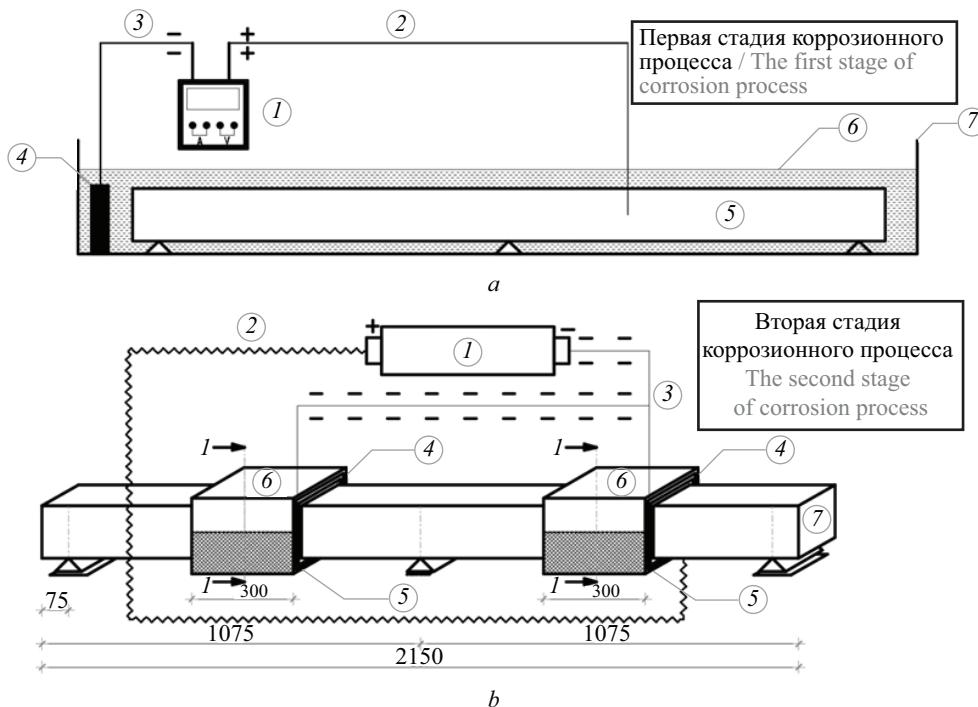
Рис. 1. Детали экспериментальной балки

Fig. 1. Details of the experimental RC beam

и выдержано вместе с балками шесть образцов кубов бетона и три призмы. Средняя прочность испытанных кубов бетона через 28 дней F_{cu} составила 24,6 МПа. Кроме того, проведено одноосное нагружение бетонных призм размером $100 \times 100 \times 400$ мм. Для измерения вертикальных и горизонтальных деформаций во время испытаний на сжатие на каждую грань образцов призм установили два электрических деформационных датчика. Средняя прочность испытанного бетона R_b оказалась равной 18,5 МПа, с предельными деформациями ε_u 0,0024, модулем упругости бетона E_c 20 887 МПа и коэффициентом Пуассона 0,16. Предполагаемое отношение между прочностью цилиндра f'_c и прочностью призмы определено как $f'_c = 1,067 R_b$, что дало среднюю прочность цилиндра на сжатие $f'_c = 19,75$ МПа. Предел текучести стал $R_{sy} = 551$ МПа, максимальная прочность при растяжении — $R_{su} = 646$ МПа. Модуль упругости E_s для стержней диаметром 12 мм составлял 201 ГПа, с пределом текучести 379 МПа и максимальной прочностью при растяжении 511 МПа. Модуль упругости для замкнутых стержней диаметром 6 мм определен как 200 ГПа.

Использован ускоренный метод коррозии, аналогичный работам J. Xia и соавт. (2011) и J. Shen и соавт. (2019) [21, 22], который разделен на две фазы: электромиграцию и циклическое сухое и влажное воздействие. Этот подход позволил точно контролировать рассматриваемую область и процент коррозии. Коррозия была нацелена на зоны растяжения в серединах пролетов балок с процентами коррозии соответственно 20 и 30 %.

Описание процесса ускоренной коррозии следующее. Ионы хлорида электромигрировали в защитный слой бетона с помощью электрохимического метода во время электромиграции. Каждая железобетонная балка погружалась в 5%-ный раствор NaCl на 1,25 дня. Затем направление тока скорректировано таким образом, что внешний стержень из нержавеющей стали стал катодом, а встроенные листы из нержавеющей стали — анодом. Непрерывное напряжение 30 В было подано в течение четырех дней между внешним стержнем из нержавеющей стали и вложенными в него листами из нержавеющей стали с применением источника постоянного тока. После процесса электромиграции



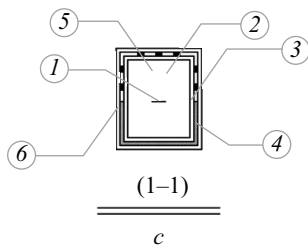


Рис. 2. Детали метода ускоренной коррозии: *a*: 1 — источник питания; 2 — электрический провод, несущий положительный заряд; 3 — электрический провод, несущий отрицательный заряд; 4 — отрицательным электродом служит стержень из нержавеющей стали; 5 — железобетонная неразрезная балка; 6 — вода с 5%-ным NaCl; 7 — резервуар для воды; *b*: 1 — источник питания; 2 — электрический провод, несущий положительный заряд; 3 — электрический провод, несущий отрицательный заряд; 4 — поролон для сохранения соленой воды; 5 — сетка из нержавеющей стали; 6 — пластиковый бакет для экономии воды; 7 — железобетонная неразрезная балка; *c*: 1 — отрицательным электродом служит стержень из нержавеющей стали; 2 — железобетонная неразрезная балка; 3 — поролон для сохранения соленой воды; 4 — сетка из нержавеющей стали; 5 — наполнитель; 6 — пластиковый бакет для экономии воды

Fig. 2. Details of the accelerated corrosion method: *a*: 1 — power supply; 2 — electrical wire carrying positive charges; 3 — electrical wire carrying negative charges; 4 — a stainless steel rod serves as the negative electrode; 5 — the RC continuous beam; 6 — water with 5 % NaCl; 7 — water tank; *b*: 1 — power supply; 2 — electrical wire carrying positive charges connecting to the reinforcing steel; 3 — electrical wire carrying negative charges; 4 — sponge to save salty water; 5 — stainless steel mesh; 6 — plastic bag to save water; 7 — the RC continuous beam; *c*: 1 — stainless steel rod serves as negative electrode; 2 — the RC continuous beam; 3 — sponge to save salty water; 4 — stainless steel mesh; 5 — filler; 6 — plastic bag to save water

проведена фаза циклического сухого и влажного воздействия. Циклы сушки и влажности состояли из трех дней сушки, за которыми следовали четыре дня увлажнения. Во время увлажнения на губку наносился 5%-ный раствор NaCl для поддержания влажности в бетоне. Источник постоянного тока использовался для подачи постоянной плотности тока 300 mA/cm^2 на протяжении всего процесса увлажнения. Этот ток пропусклся через продольную арматуру в середине пролетов (действуя как анод) и сетку из нержавеющей стали (действуя как катод). Целью было достичь 20 и 30%-ной коррозии стали соответственно через 66 и 101 день (рис. 2). Балки разместили на испытательной машине в соответствии с необходимыми параметрами для проведения испытаний (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментальной установке статически неопределимые железобетонные балки подвергались сосредоточенным нагрузкам, которые действовали в середине каждого пролета. Это позволило собрать ценные данные, включая наблюдения за режимами разрушения, зависимость прогиба от нагрузки, деформации от нагрузки и перераспределения моментов. В контрольных статически неопределимых железобетонных балках отмечались типичные изгибные разрушения (рис. 4). Однако при исследовании корродированных статически неопределимых железобетонных балок наблюдалась другая тенденция. Эти балки испытывали комбинированные изгибные разрушения при сдвиге, при этом степень разрушения при сдвиге была более выражен-



a

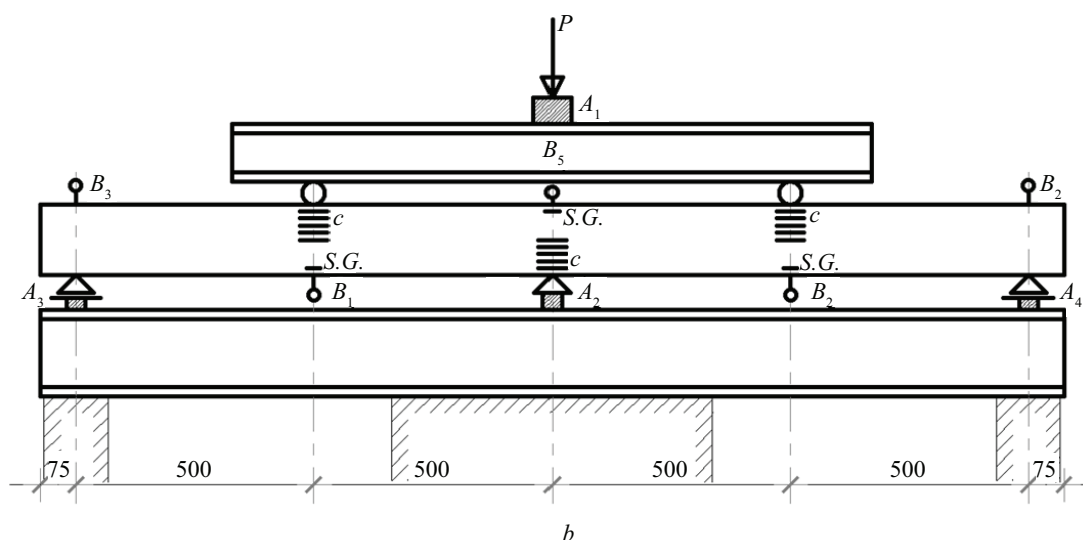


Рис. 3. Испытательная машина (а) и схема испытания железобетонной балки (b): А — силв измерения тензодатчиком; В — дифференциальные трансформаторы для определения линейного перемещения; S.G. — тензометрический датчик на продольном стержне арматуры; С — тензометрические датчики на бетоне

Fig. 3. Test machine (a) and test diagram of the RC beam (b): A — strain gauge measuring force; B — differential transformers for determining linear displacement; S.G. — strain gauge on longitudinal reinforcement bar; C — strain gauges on concrete

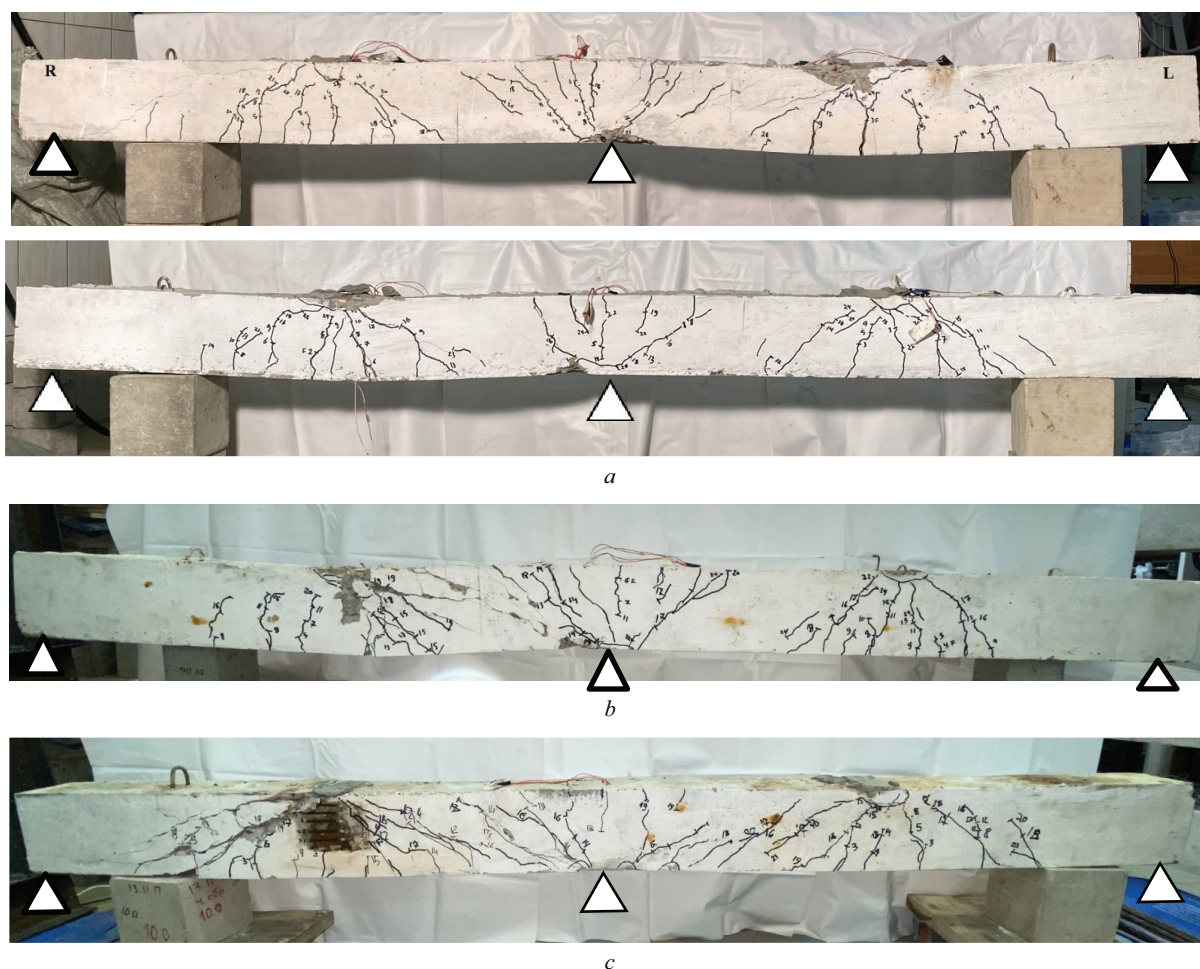


Рис. 4. Схемы разрушения железобетонных балок: а — BC; б — PCMS-20; с — PCMS-30

Fig. 4. Failure schemes of the tested RC beams: a — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30

Основные экспериментальные результаты испытанных железобетонных образцов
Experimental results of tested reinforced concrete specimens

Образец Specimen	BC	PCMS-20	PCMS-30
Степень коррозии, % Corrosion rate, %	—	20	30
Нагрузка трещинообразования, кН First crack load, kN	14,96	16,08	16,04
Нагрузка предела текучести стали в середине опоры, кН Load at the steel yield stress at the middle of the support, kN	134	48,20	86,72
Первая нагрузка предела текучести стали в середине пролета, кН Load at the first steel yield stress at the mid-span, kN	175	96,94	
Вторая нагрузка предела текучести стали в середине пролета, кН Load at the second steel yield stress at the mid-span, kN		155,33	
Предельная нагрузка, кН Ultimate load, kN	185,02	161,58	123,87
Перераспределение моментов на средней опоре β , % Moments redistribution at the middle support β , %	14,6	27,4	46,5

ной в случаях более высоких уровней коррозии, например в балке с коррозией 30 % (PCMS-30). Такое поведение можно объяснить деградацией, вызванной коррозией, которая влияет как на хомуты, так и на бетон. В результате корродированные балки проявляли сниженную сдвиговую прочность по сравнению с некорродированными образцами. Деградационные эффекты также сказывались на предельной несущей способности балок из-

за коррозии. Например, в балке с коррозией 20 % (PCMS-20) предельная нагрузка снизилась до 162 кН, что составляет 12,7 % относительно контрольных образцов. Аналогично в балке с коррозией 30 % (PCMS-30) предельная нагрузка снизилась до 124 кН, что составляет 33 % относительно контрольных балок (табл. и рис. 5).
На рис. 5 показана зависимость нагрузки от прогиба испытанных образцов. Наблюдает-

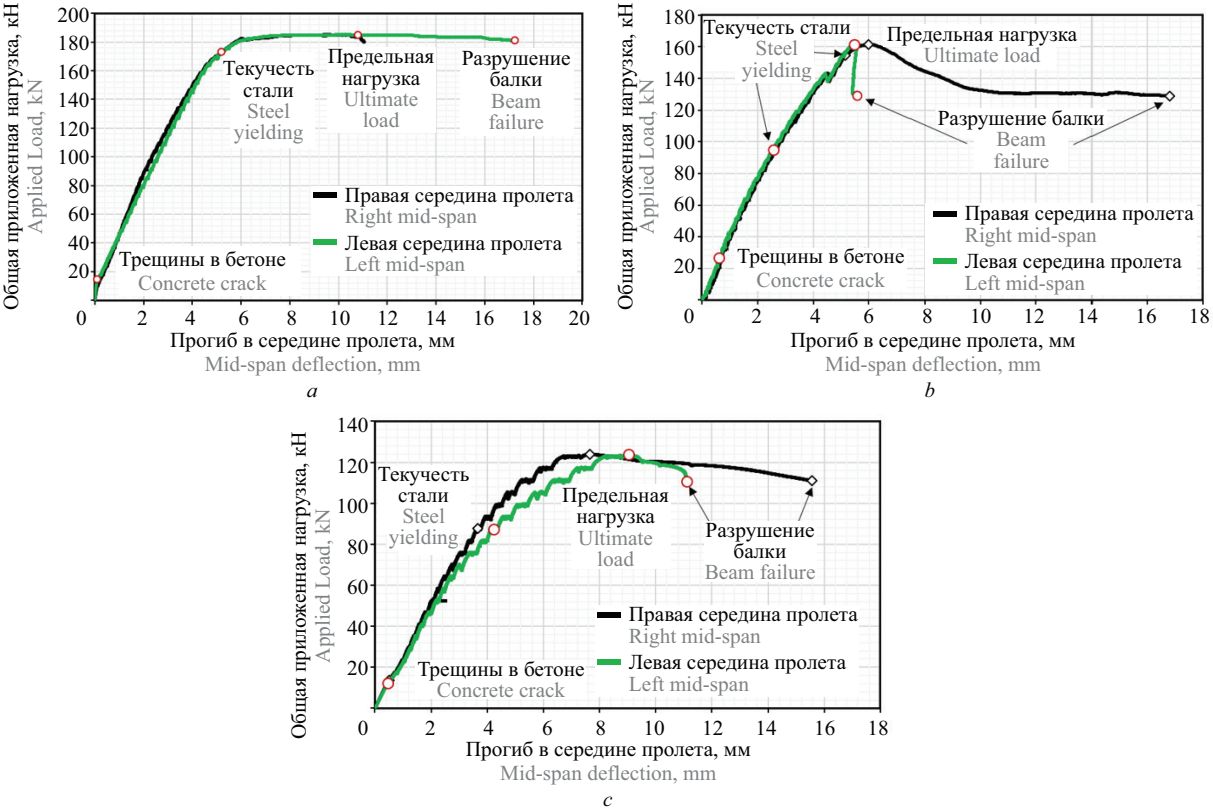


Рис. 5. Реакция балки нагрузка – прогиб: а — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30
Fig. 5. Load-deflection response of the tested RC beam: a — BC; b — PCMS-20; c — PCMS-30

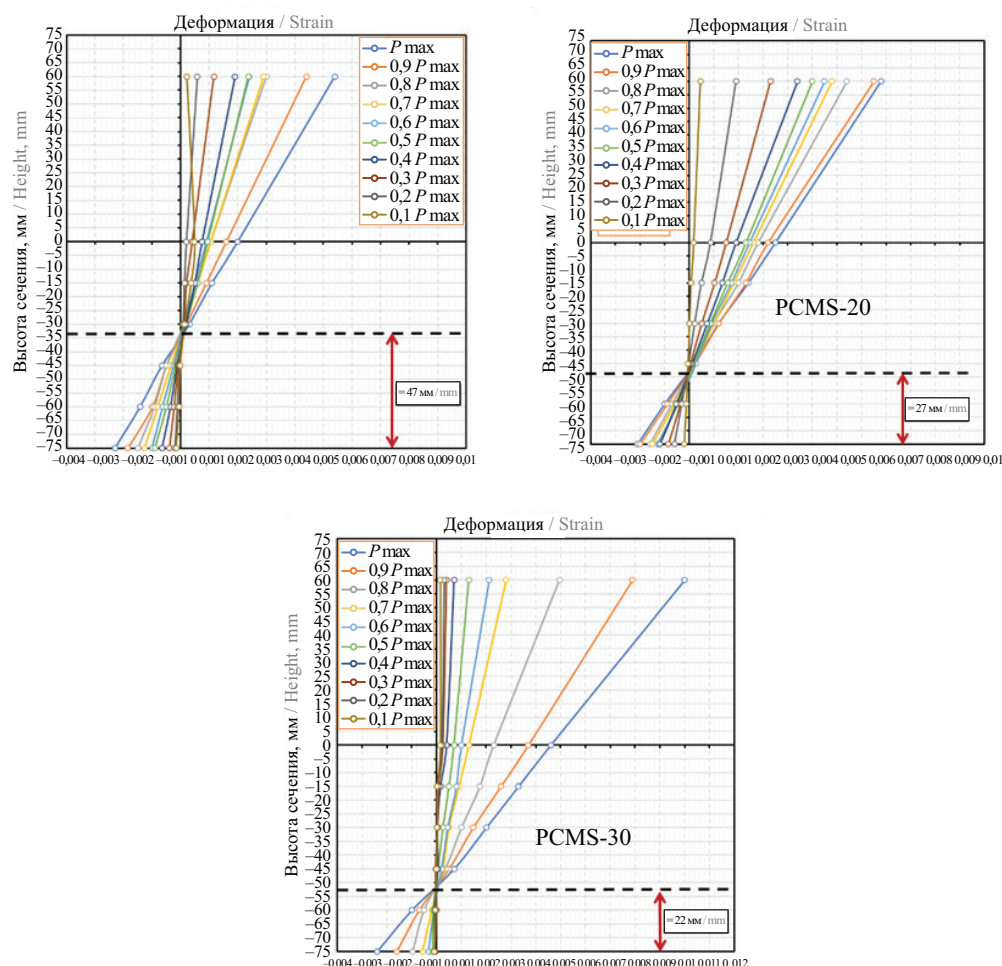


Рис. 6. График зависимости деформации от нагрузки для стали и бетона на средней опоре

Fig. 6. Load vs strain response for RC beam cross-section at the middle support

ся заметное различие между некорродированными или контрольными железобетонными балками и их корродированными аналогами. Контрольные балки проявляют большую пластичность при приложении нагрузки. Эта повышенная пластичность имеет важное значение в строительной инженерии, поскольку она указывает на способность конструкции к значительным деформациям при сохранении несущей способности. В корродированных железобетонных балках, напротив, наблюдалось снижение пластичности, что объясняется, прежде всего, коррозионным разрушением как материала бетона, так и арматурной стали. Уменьшенная пластичность, обнаруженная в корродированных образцах, подчеркивает актуальность стратегий по предотвращению коррозии и сохранению структурной целостности, особенно в условиях, подверженных вызовам коррозии.

Отклик нагрузки — деформации балок, испытанных в средних сечениях опор, показан на рис. 6, предоставляя ценные сведения об их деформационном поведении. Становится очевидным, что коррозия значительно влияет на положение нейтральной

оси изгибаемых железобетонных балок. С увеличением степени коррозии относительная высота сжатой зоны бетона уменьшается, что приводит к более выраженному эффекту перераспределения моментов. Особенно заметно увеличение коэффициента перераспределения моментов, превышающее втрое по сравнению с контрольными образцами при сравнении образца PCMS-30 (с 30%-ной коррозией) (см. табл.).

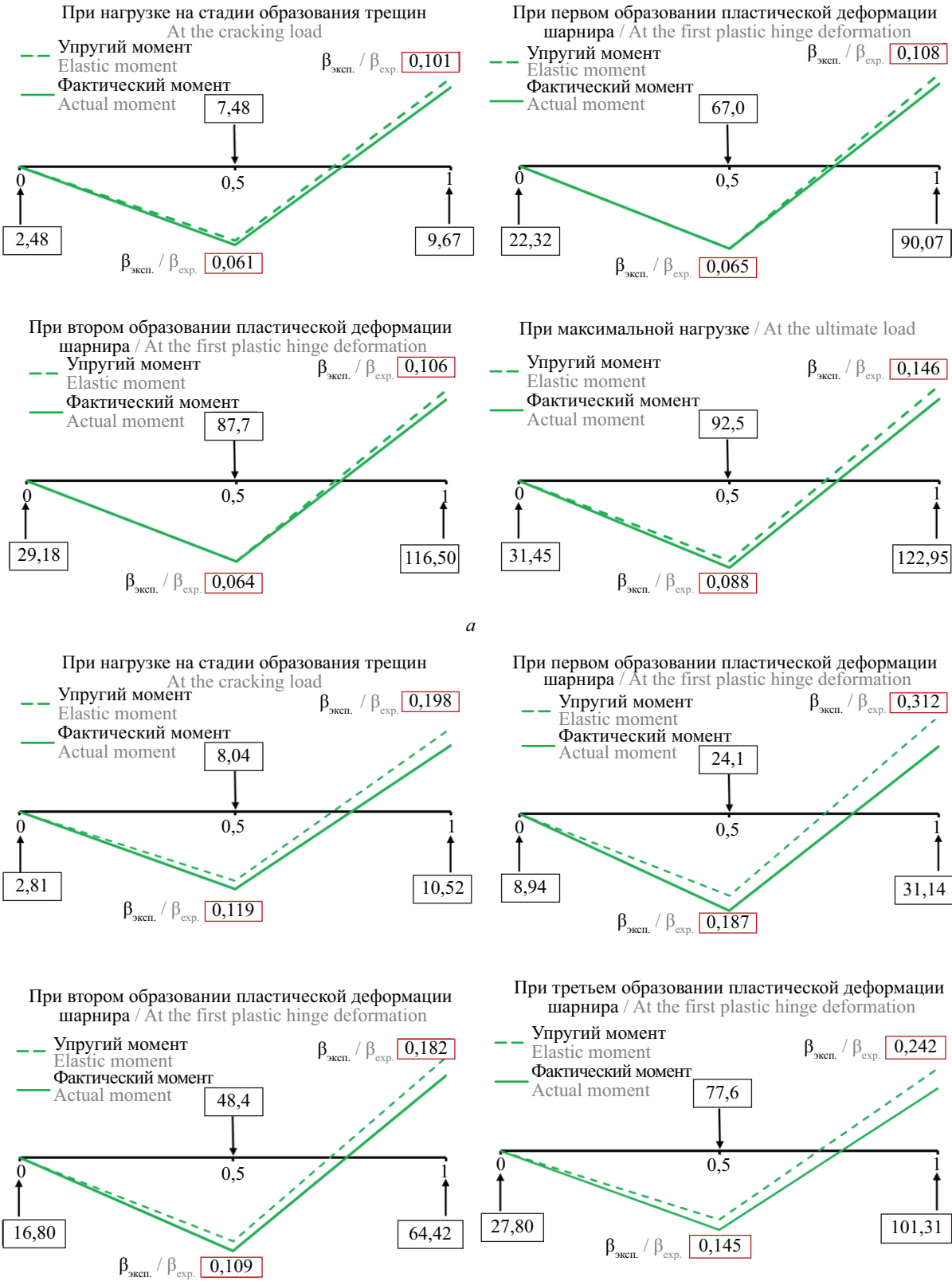
Феномен перераспределения моментов под критическими нагрузками показан на рис. 7. В случае контрольных балок коэффициент фактического перераспределения моментов составляет 0,146 для средней опоры и 0,088 для среднего пролета. В свою очередь, для образца PCMS-20 при предельных нагрузках коэффициент перераспределения моментов возрастает до 0,274 на средней опоре и 0,165 на среднем пролете. Более того, в случае образца PCMS-30 при предельных условиях нагрузки коэффициент перераспределения моментов заметно повышается до 0,465 на средней опоре и 0,274 на среднем пролете.

Экспериментальные данные, приведенные в настоящей статье, послужат основой для предложения модификации модели, изначально представленной авторами в 2022 г. [15]. Указанная модифицированная модель направлена на повышение точности прогнозирования перераспределения мо-

ментов в корродированных статически неопределимых железобетонных балках.

Модифицированная модель

Среди существующих моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения мо-



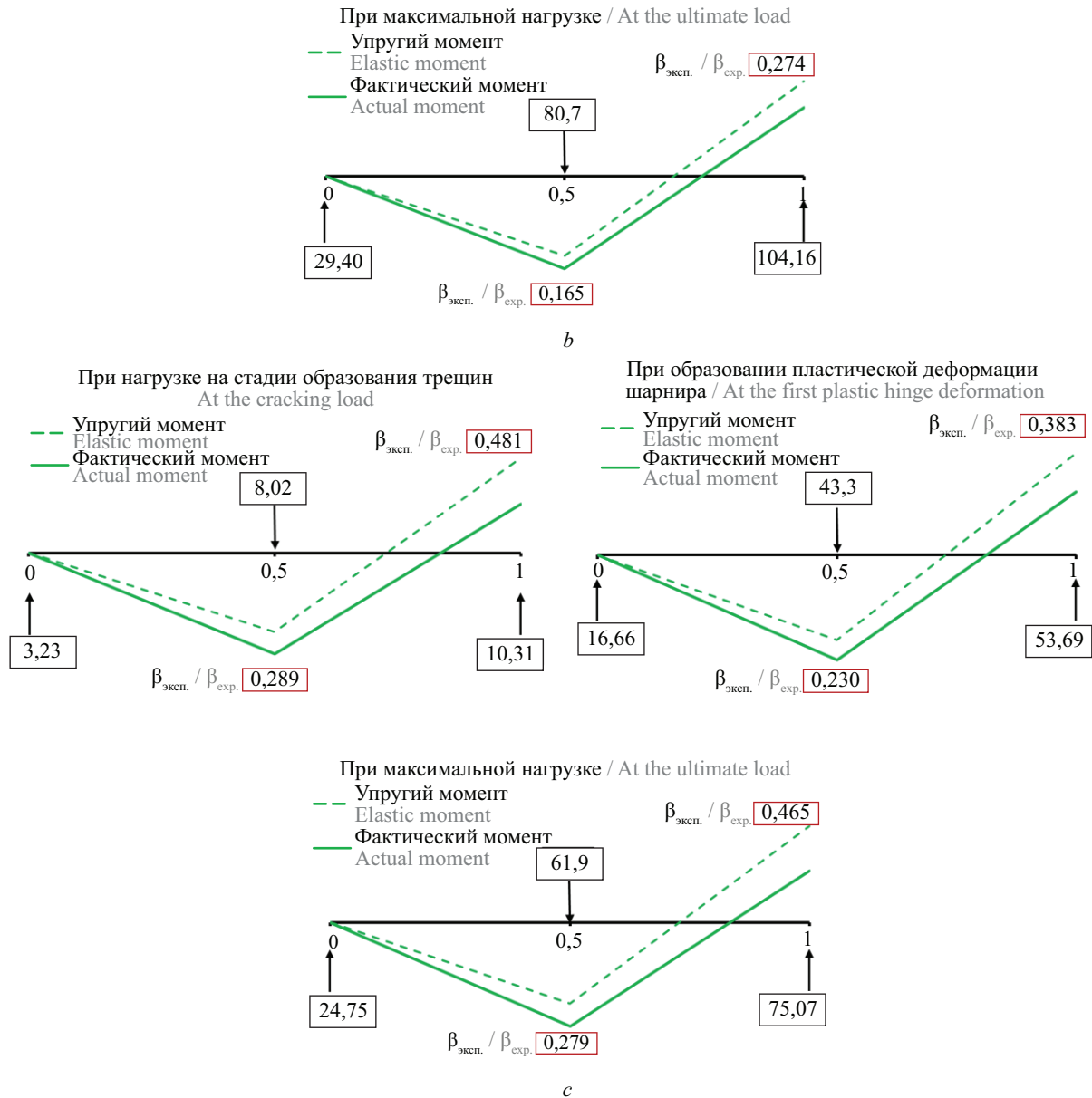


Рис. 7. Экспериментальный и упругий изгибающий момент испытуемой балки: *a* — ВС на разных стадиях нагрузки; *b* — PCMS-20 на разных стадиях нагрузки; *c* — PCMS-30 на разных стадиях нагрузки

Fig. 7. Experimental and elastic bending moment of the tested beam: *a* — BC beam at different critical load; *b* — PCMS-20 beam at different critical load; *c* — PCMS-30 beam at different critical load

ментов в железобетонных балках работа авторов (2022) [18] выделяется своей высокой точностью прогнозирования. Предложенная модель может быть выражена следующим образом:

$$\beta_{\text{рас}} = \left(0,001 \frac{R_{sy}}{(1,067 R_b)} + 0,05 (\mu_w, \%) + 0,0035 \frac{L}{h} \right) - \left(0,74 \frac{x}{h_0} + 0,13 \cdot \rho_{s1} / \rho_{s2} \right) + 0,4612, \quad (1)$$

где параметры для данной экспериментальной программы равны: R_{sy} — предел текучести арматуры = 551 МПа; R_b — прочность бетона на сжатие = 18,5 МПа; $\mu_w, \%$ — коэффициент армирования хомутов в средней опорной зоне = 0,31; L/h — гибкость балки = 6,67; $\xi = x/h_0$ — относительная высота сжатой зоны бетона = 0,35; ρ_{s1}/ρ_{s2} — отношение коэффициентов армирования на средней опоре к среднему пролету = 1,00.

Предлагаемая модифицированная модель, учитывающая эффект коррозии, представлена следующим образом:

$$\beta_{\text{рас}} = \left(0,0008 \frac{R_{sy}}{(1,067 R_b)} + 0,05 (\mu_{\text{и}, \%}) + \right. \\ \left. + 0,0035 \frac{L}{h} \right) - \\ - \left(0,6 \frac{x}{h_o} + 0,08 \cdot \rho_{s1} / \rho_{s2} \right) + 0,025 C, \quad (2)$$

где C представляет собой процент коррозии, возникающей в арматурной стали, и определяемый потерей площади поперечного сечения арматуры. Модифицированная модель продемонстрировала высокий уровень точности: среднее значение составляет 1,06; стандартное отклонение — 0,093; абсолютная ошибка — 0,066.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование коэффициента перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках при изгибном нагружении как с коррозией, так и без нее. В ходе исследования получено несколько значимых результатов:

1. Применяемый ускоренный метод коррозии оказался эффективным, контролирующим изменение значений коэффициента перераспределения мо-

ментов путем воздействия на различные зоны и уровни коррозии внутри балок.

2. С увеличением уровня коррозии коэффициент перераспределения моментов также увеличивался. Особенно заметно, что в случае 30%-ной коррозии, затрагивающей арматуру в области среднего пролета, коэффициент перераспределения моментов достигал своего максимального значения 46 %, что является значительным увеличением по сравнению с 14%-ной у некорродированных балок. Это подчеркивает глубокое влияние коррозии на поведение перераспределения моментов в железобетонных балках.

3. Новая модифицированная модель, учитывающая влияние коррозии, продемонстрировала способность точно предсказывать экспериментальные результаты. Она достигла средней абсолютной ошибки 0,066, что подчеркивает ее эффективность в улавливании сложного взаимодействия между коррозией и перераспределением моментов в железобетонных балках.

Эти результаты свидетельствуют о важности учета влияния коррозии при оценке поведения изгибаемых железобетонных конструкций. Полученные результаты вносят ценный вклад в область строительной инженерии, способствуя разработке более точных прогностических моделей и стратегий для решения проблем, связанных с коррозией в железобетонных балках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г., Орлова М.А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 6 (53). С. 98–105. EDN VAVKYX.
2. Истомин А.Д., Кудрявцев А.В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 51–55. EDN WHKJVP.
3. Дудина И.В., Тамразян А.Г. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления // Жилищное строительство. 2001. № 3. С. 8–10. EDN UIZQDH.
4. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 715–720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231
5. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Влияние коррозии на поведение железобетонных балок // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междуна. академических чтений. 2021. С. 241–249. EDN ZFMGQV.
6. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. Vol. 57. Issue 1. Pp. 9–20. DOI: 10.1680/macr.57.1.9.57870
7. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 14–21. EDN YSXCPB.
8. Кальницкий А.А. Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий. М. : Стройиздат, 1970. 168 с.
9. Черняева Р.П.К. определению границ перераспределения усилий при расчете статически неопределимых железобетонных балок по методу предельного равновесия // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 41–45. EDN SQMATT.
10. Zhu W., François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 51. Pp. 461–472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.015
11. Huang R., Yang C.C. Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion // Cement and Concrete Composites. 1997. Vol. 19. Issue 2. Pp. 131–137. DOI: 10.1016/S0958-9465(96)00050-9

12. Dang V.H., François R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 48. Pp. 558–568. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.021

13. Du Y., Clark L.A., Chan A.H.C. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams // *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. Issue 3. DOI: 10.14359/18618

14. Zhang W., Zhang H., Gu X., Liu W. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams under sustained loading // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 675–683. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.145

15. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 226. P. 111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392

16. Zhang R., Castel A., François R. Serviceability limit state criteria based on steel–concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment // *Materials and structures*. 2009. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1407–1421. DOI: 10.1617/s11527-008-9460-0

17. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Параметры, влияющие на перераспределение моментов в статически не-

определимых железобетонных балках // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 6. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.04-11. EDN GQJOZL.

18. 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*. 2023. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1503–1511. DOI: 10.1080/19648189.2022.2086179

19. Fernandez I., Herrador M.F., Marí A.R., Bairán J.M. Ultimate capacity of corroded statically indeterminate reinforced concrete members // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-018-0297-9

20. Feng R., Liu Y., Zhu J.H., Xing F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams // *Composite Structures*. 2020. Vol. 245. P. 112200. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112200

21. Xia J., Jin W., Li L. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. Issue 5. Pp. 1794–1805. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.01.058

22. Shen J., Gao X., Li B., Du K., Jin R., Chen W. et al. Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load // *Materials*. 2019. Vol. 12. Issue 4. P. 627. DOI: 10.3390/ma12040627

Поступила в редакцию 12 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 19 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazyan@mail.ru;

Йехия Ахмед Котп Сайед — аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1103250, Scopus: 58170730800, ResearcherID: HTR-8755-2023, ORCID: 0000-0003-3969-8111; engyehia250@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Stress-strain state of concrete bending elements with cracks. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 6(53):98-105. EDN VAVKYX. (rus.).

2. Istomin A.D., Kudryavtsev A.V. Behavior of statically indeterminate reinforced concrete members under negative temperatures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:51-55. EDN WHKJVP. (rus.).

3. Dudina I.V., Tamrazyan A.G. Providing the quality of prefabricated ferroconcrete structures on the production stage. *Housing Construction*. 2001; 3:8-10. EDN UIZQDH. (rus.).

4. Tamrazyan A.G. The assessment of reliability of punching reinforced concrete beamless slabs under the influence of a concentrated force at high temperatures. *Procedia Engineering*. 2016; 153:715-720. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.231

5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Influence of corrosion on the behavior of reinforced concrete beams. Safety of the Construction Fund of Russia. *Problems and Solutions : materials of the International Academic Readings*. 2021; 241-249. EDN ZFMGQV. (rus.).

6. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams. *Magazine of Concrete Research*. 2005;

57(1):9-20. DOI: 10.1680/mac.57.1.9.57870

7. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. To the level of redistribution of moments in statically uncertain reinforced concrete beams. *Building and Reconstruction*. 2018; 6(80):14-21. EDN YSXCPB. (rus.).

8. Kal'nitskiy A.A. *Calculation of statically indefinable reinforced concrete structures, taking into account the redistribution of forces*. Moscow, 1970; 168. (rus.).

9. Chernyaeva R. To delimitation of redistribution of efforts at calculation of statically indefinable ferroconcrete beams on a method of limit balance. *Building and Reconstruction*. 2014; 1(51):41-45. EDN SQMATT. (rus.).

10. Zhu W., François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam. *Construction and Building Materials*. 2014; 51:461-472. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.015

11. Huang R., Yang C.C. Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites*. 1997; 19(2):131-137. DOI: 10.1016/s0958-9465(96)00050-9

12. Dang V.H., François R. Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam. *Engineering Structures*. 2013; 48:558-568. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.021

13. Du Y., Clark L.A., Chan A.H.C. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2007; 104(3). DOI: 10.14359/18618

14. Zhang W., Zhang H., Gu X., Liu W. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams under sustained loading. *Construction and Building Materials*. 2018; 174:675-683. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.145

15. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in

concrete. *Engineering Structures*. 2021; 226:111392. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111392

16. Zhang R., Castel A., François R. Serviceability limit state criteria based on steel-concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment. *Materials and Structures*. 2009; 42(10):1407-1421. DOI: 10.1617/s11527-008-9460-0

17. Tamrazyan A.G., Sayed Ye.A.K. Parameters affected the moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 6:4-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.06.04-11. EDN GQJOZL. (rus.).

18. 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*. 2023; 27(4):1503-1511. DOI: 10.1080/19648189.2022.2086179

19. Fernandez I., Herrador M.F., Marí A.R., Bairán J.M. Ultimate capacity of corroded statically indeterminate reinforced concrete members. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018; 12(1). DOI: 10.1186/s40069-018-0297-9

20. Feng R., Liu Y., Zhu J.H., Xing F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams. *Composite Structures*. 2020; 245:112200. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112200

21. Xia J., Jin W., Li L. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment. *Corrosion Science*. 2011; 53(5):1794-1805. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.01.058

22. Shen J., Gao X., Li B., Du K., Jin R., Chen W. et al. Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load. *Materials*. 2019; 12(4):627. DOI: 10.3390/ma12040627

Received November 12, 2023.

Adopted in revised form on November 19, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S: **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Yehia Ahmed Kotp Sayed — postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1103250, Scopus: 58170730800, ResearcherID: HTR-8755-2023, ORCID: 0000-0003-3969-8111; engyehia250@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.