DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-10-51-61

Кудрявцев М.В., Попов Д.С., Инюшина К.П.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
**E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АРМАТУРЫ НА СЦЕПЛЕНИЕ С БЕТОНОМ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема снижения сцепления арматуры с бетоном, вызванного коррозионными повреждениями арматурных стержней. Актуальность темы обусловлена широким распространением железобетонных конструкций и необходимостью оценки их технического состояния при воздействии агрессивных сред. Коррозия арматуры приводит к изменению механизма совместной работы с бетоном. Для изучения данного явления авторами проведены экспериментальные исследования. Коррозионные повреждения моделировались ускоренным методом. В ходе испытаний оценивались параметры сцепления, характер проскальзывания арматурных стержней относительно бетона и особенности диаграмм деформирования. Численное моделирование выполнялось с использованием метода конечных элементов. Контактное взаимодействие арматуры с бетоном моделировалось с применением нелинейных пружинных элементов, жесткость которых задавалась на основе обработанных и аппроксимированных экспериментальных данных. Для описания работы бетона использовалась модель материала, учитывающая пластические свойства тяжелого бетона и позволяющая корректно передавать усилия между бетоном и арматурой. Результаты работы показали, что наличие коррозионных повреждений арматуры существенно изменяет характер сцепления с бетоном: снижается сцепление между арматурой и бетоном, изменяется распределение усилий по длине анкеровки, а диаграммы проскальзывания приобретают иной вид по сравнению с неповрежденными образцами. Предложенная численная модель позволяет описывать процессы деформирования и разрушения контакта арматуры с бетоном с учетом коррозионных повреждений. Полученные результаты исследования могут быть применены при оценке напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, подвергшихся воздействию агрессивной окружающей среды, приведшему к коррозии арматуры с последующей потерей сцепления с бетоном.*

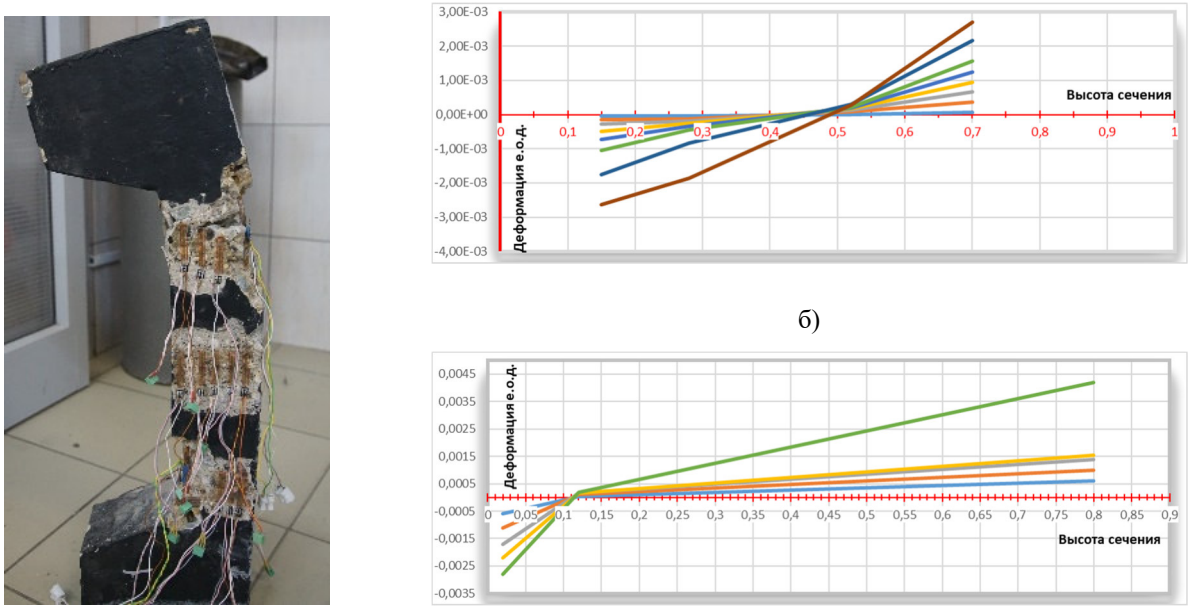
Ключевые слова: *сцепление, железобетон, коррозия, вырыв арматуры, анкеровка, моделирование коррозии.*

Введение. Железобетонные конструкции являются одними из самых индустриальных в гражданском и промышленном строительстве. Как известно применение стальной арматуры в качестве армирующего материала для железобетона обусловлено такими факторами как: нейтральное влияние щелочной среды бетона (pH=12) к стали, близкие коэффициенты линейного температурного расширения, обеспечение единства деформаций.

При расчете железобетонных конструкций принято считать, что деформации в нормальном сечении распределяются линейно на основании гипотезы плоских сечений. Однако, как показывают результаты исследований при коррозионных повреждениях бетона или арматуры происходит нарушение гипотезы плоских сечений (рис. 1), что усложняет проведение расчетов железобетонных конструкций по нормативным методам расчета [1, 2].

Деградация железобетонных элементов при коррозионных повреждениях рабочей стальной арматуры чаще всего снижает физико-механические характеристики арматуры, приводит к изменению расчётной схемы и влияет на перераспределение внутренних усилий в конструкции. Дополнительно фиксируется изменение зоны контакта «бетон – стальная арматура», что влечёт за собой ухудшение интегральных эксплуатационных параметров [3]. Критическим последствием протекания коррозионных процессов в арматуре является снижение фактической локальной или общей несущей способности конструкции, потерей работоспособности, а также приводит к несоответствию критериям конструкционной безопасности и выполнению условий по предельным состояниям при действии проектных нагрузок [4–6].

Коррозионное повреждение арматуры ведёт к снижению механического зацепления стержня в системе «бетон — стальная арматура», что изменяет характер совместного деформирования и механизм передачи усилий в сечении [7–9].



а) б) в)

Рис. 1. Исследования автора [1] по влиянию коррозии на прочность колонн:
а) Образец колонны с коррозией арматуры; б) эпюра деформаций в нормальном сечении при отсутствии коррозии арматуры; в) эпюра деформаций в нормальном сечении при коррозии арматуры

На основе экспериментальных данных разными авторами получены аналитические зависимости, описывающие прочность сцепления арматуры с бетоном [10, 11, 12]. Холмянский М.М. предложил «нормальный закон» [13] по результатам многочисленных испытаний:

$$\tau = B\frac{\ln(l+as)}{l+as}, \quad (1)$$

$$B = e\tau_{max}, \quad (2)$$

$$a = \frac{e-l}{S_{max}}, \quad (3)$$

где B, a – интегральные коэффициенты закона сцепления, зависящие от значения кубиковой прочности бетона, от вида поперечного сечения и диаметра арматуры; τ – касательное напряжение сцепления; s – смещение арматуры относи тельно бетона

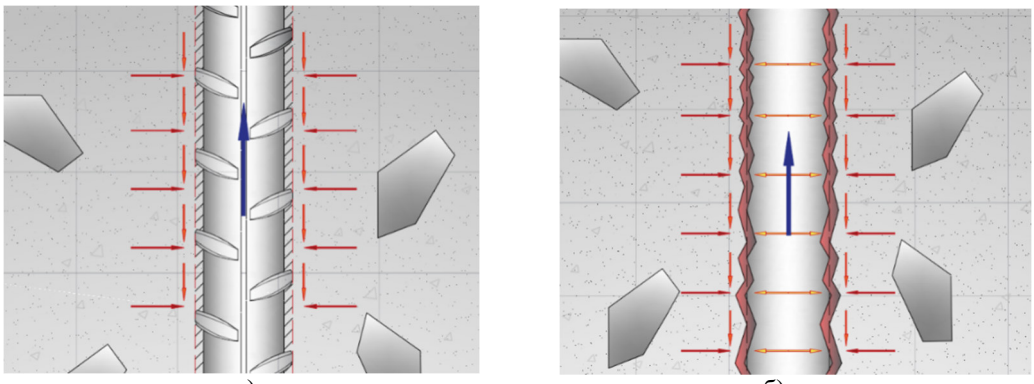
Предельного значения τ достигает при величине смещения стержня равного:

$$s = \frac{e-l}{\alpha}. \quad (4)$$

Максимальные касательные напряжения будут иметь вид:

$$\tau_{max} = \frac{B}{e}. \quad (5)$$

Закон, предложенный Холмянским М.М. имеет ряд преимуществ по сравнению с другими предложенными методиками. Однако коррозионное повреждение арматурного стержня меняет механизм сцепления его с бетоном (рис. 2). Отслоившиеся продукты коррозии арматуры снижают механическое зацепление периодического профиля за бетон, выдергивание стержня из тела бетона происходит по контакту между арматурным стержнем и отслоившимися продуктами коррозии [14].



а) б)

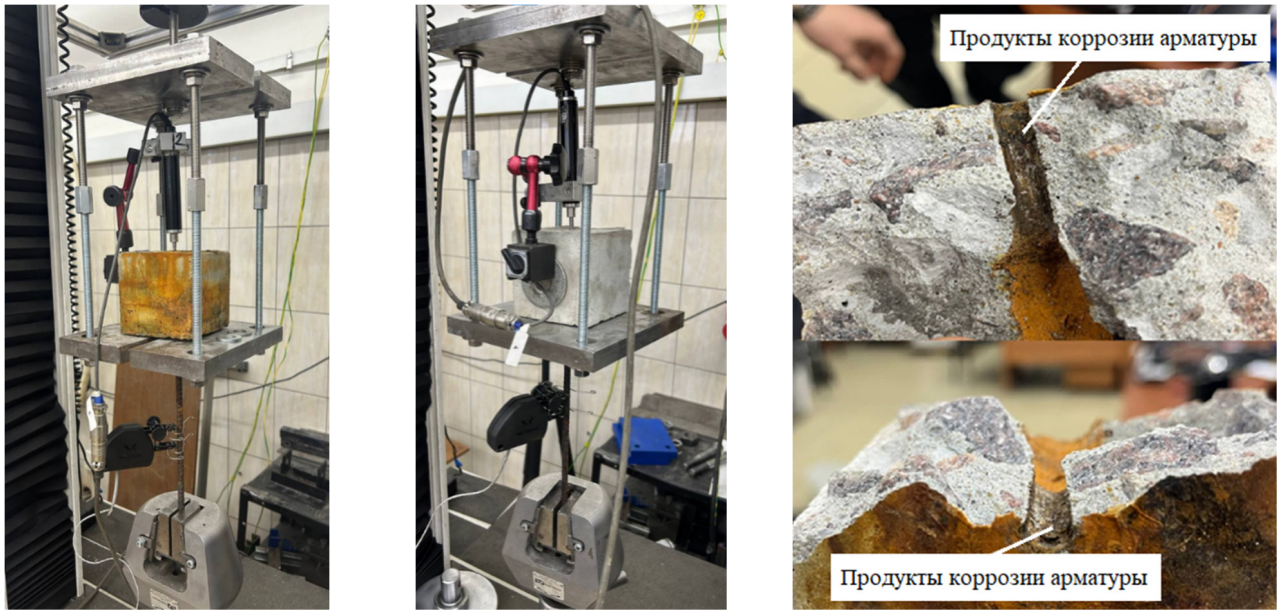
Рис. 2. Механизм сцепления арматуры с бетоном [14]:
а) без коррозии арматуры; б) с коррозией арматуры

Для определения НДС конструкции и верификации экспериментальных данных важным фактором является учёт коррозии арматуры при КЭ моделировании. Моделирование контактных задач является наукоёмкой процедурой, разными авторами были предложены индивидуальные методы решения при моделировании контакта стальной арматуры с бетоном. Простым способом учета коррозии является уменьшения диаметра арматурного стержня без учета контакта с бетоном до решения сложных задач контактного взаимодействия в тяжелых программных комплексах таких как ANSYS, Abaqus и другие [15, 11, 12]. На сегодняшний день не сложилось конкретного и четкого понимания моделирования контакта арматуры с бетоном с учетом верификации экспериментальных данных, что значительно может влиять на расчет железобетонных конструкций с коррозионными повреждениями арматуры.

Материалы и методы. Для оценки влияния коррозии арматуры на прочность сцепления с бетоном были проведены экспериментальные исследования пары серий арматурных стержней с коррозионным повреждением и без него (рис. 3).

В качестве исследуемой арматуры использовались стержни диаметром 8 мм класса А500С с периодическим серповидным профилем, которые анкерились в бетонные кубы размером 100×100×100 мм класса по прочности В25 на глубину 5d=40 мм. Свободная часть арматурного стержня была заизолирована от контакта с бетоном при помощи втулки из ПВХ. Скорость нагружения арматурного стержня составляла 2 мм в минуту. Для контроля перемещения арматурного стержня относительно бетонного куба был установлен датчик линейных перемещений тензорезисторного типа CDP-5 на основе показаний которого строилась диаграмма «Нагрузка, кН – проскальзывание, мм».

Корродирование арматуры происходило ускоренным методом в ванне с содержанием 5% пищевой соли под действием постоянного электрического тока силой в 5А. Коррозия арматуры в пересчете на потерю площади поперечного сечения спустя 65 дней составила 23 %. При определении прочностных параметров арматурного стержня было выявлено снижение его предела текучести и предела прочности от 6 % до 11 %, а также заметно снижение пластичности стержня по диаграмме его деформирования. По сравнению с некорродированным стержнем, арматурный стержень с коррозией потерял физическую площадку текучести, разрушение носило хрупкий характер с неявно выраженными пластическими деформациями при образовании шейки. Относительное сужение сечения после разрыва снизилось до 2 раз, а относительное равномерное удлинение снизилось до 70 % по сравнению с контрольным арматурным стержнем без коррозии.



а) б) в)

Рис. 3. Испытание на вырыв арматуры из бетона [16]:
а) образец с коррозией арматуры; б) образец контрольный; в) раскол бетонного куба с после испытаний

По результатам испытаний были проанализированы полученные данные и построены графики проскальзывания арматурного стержня по телу бетона от прикладываемой внешней нагрузки (Рисунок 4). Максимальная нагрузка при выдергивании неповрежденного стержня составляет 16,8

кН, а начало пластических деформаций в бетоне по контакту с арматурным профилем начинается при 9 кН. У корродированого арматурного стержня максимальная нагрузка при выдергивании составляет 14 кН, начало пластических деформаций выявлена при 13,7 кН. Предельная нагрузка у корродированного стержня снизилась на 16,7 %. После раскалывания кубов на контакте с бетоном видны отслоившиеся продукты коррозии корродированного стержня, что доказывает теорию о том, что разрушение произошло по контакту «продукты коррозии – корродированный стержень», при этом серповидный профиль остался адгезионно прикрепленным к бетону и не повредил бетон между серпами.

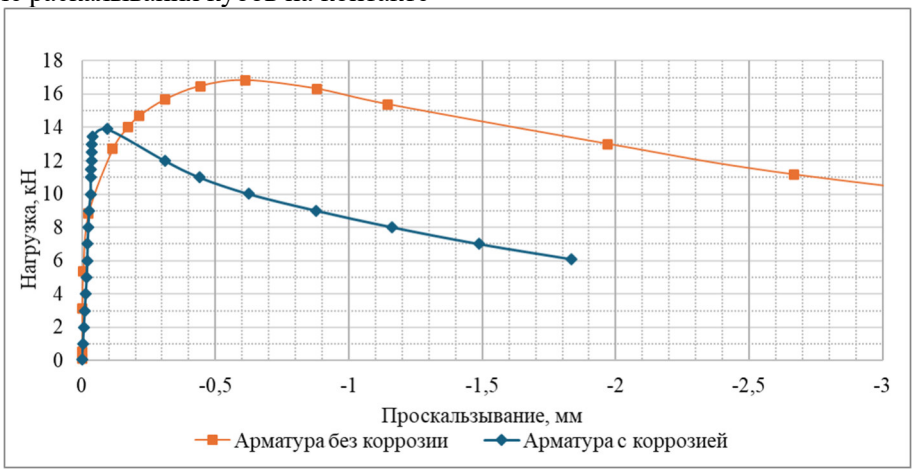
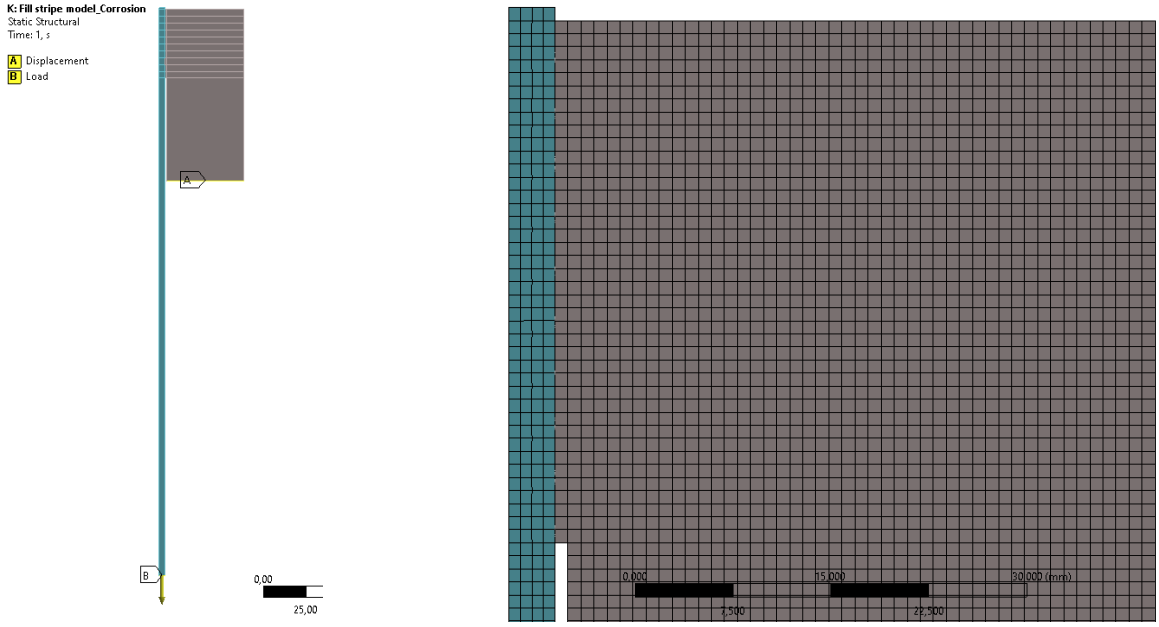


Рис.4. Диаграмма проскальзывания арматурного стержня

Основная часть. Численное моделирование, повторяющее натурные испытания, выполнялось в программном комплексе Ansys. Решение выполнялось в осесимметричной постановке. Моделирование бетона и арматуры выполнялось с помощью Plane183 (прямоугольный 8-ми узловой КЭ) с размером конечного элемента 1×1 мм (Рисунок 5).



а) б)

Рис. 5. Объект исследования: а) общий вид модели; б) конечно-элементная модель

Наиболее простым методом в рамках численного моделирования сцепления арматуры с бетоном и последующего анализа процессов деформирования (разрушения) при решении контактных задач о выдергивании арматурного стержня из бетона, являются методы, явно учитывающие несплошность сопряжения бетона с арматурой [15].

Моделирование несплошности, то есть проскальзывание арматуры относительно бетона описывается упрощенным методом, имитирующий реальные процессы совместной работы арматуры с бетоном. Упрощение состоит в моделировании гладкого арматурного стержня, а его сцепление с бетоном в виде нелинейных пружин,

жесткость которых определена на основании экспериментальных данных.

Моделирование нелинейных пружин осуществлялось с помощью элемента COMBIN39. Зона сопряжения арматуры с бетоном разделялась на 10 участков на каждом из которых моделировался пружинный элемент, такое разделение привело к более корректному анализу напряженно-деформированного состояния. Первый конец пружины закреплялся к узлу арматурного стержня, второй конец к поверхности бетона (рис. 6).

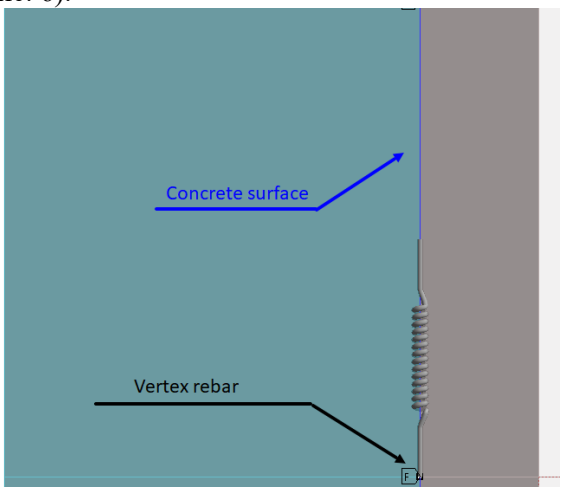


Рис. 6. Моделирование пружины в зоне сопряжения арматуры с бетоном

Поведение бетона было описано с использованием модели Menetrey-Willam [16], использующая в основе теорию пластического течения. Модель Menetrey-Willam обычно более применима для моделирования работы бетона, чем модель Drucker-Prager [17, 18].

В качестве основы данная модель использует теорию пластического течения. Модель бетона состоит из трех основных компонентов:

1. Трехинвариантная предельная поверхность, описываемая уравнением:

$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3}\left[\sqrt{2\xi} + rp\right] + p^2 - \frac{1}{c_3}, \qquad (6)$$

где, c_2 и c_3 параметры уравнения, контролирующие форму меридионального сечения поверхности и определяемые на основании пределов текучести при одноосном растяжении (R_t), сжатии (R_c) и двухосном сжатии (R_b) [17]. Предельная поверхность изображена на рисунке 7.

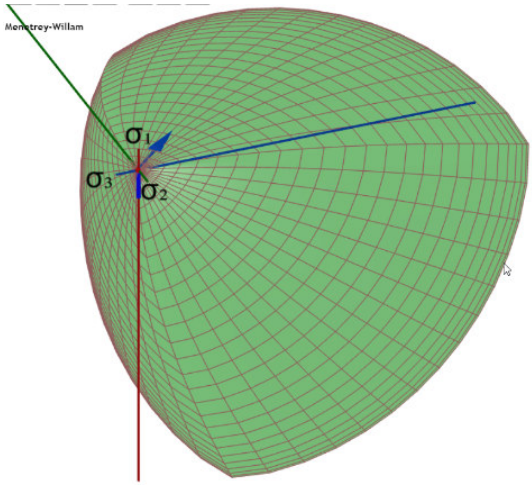


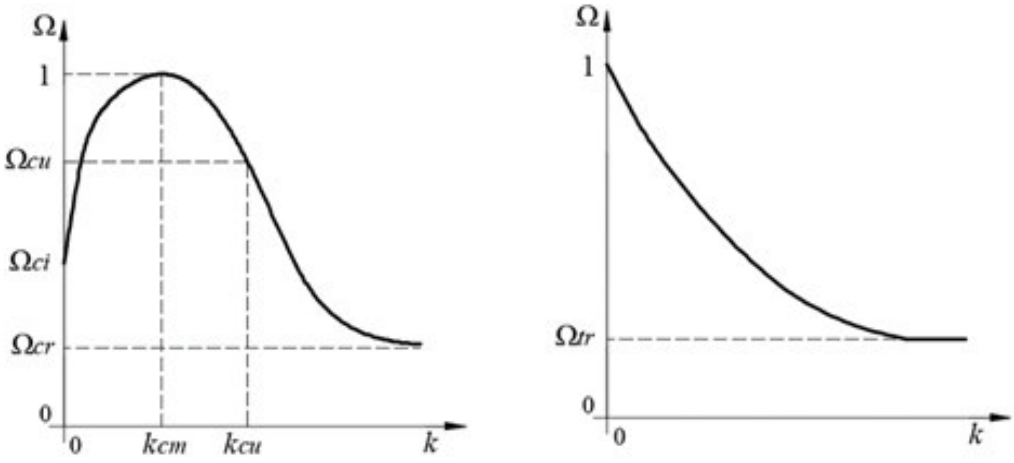
Рис. 7. Предельная поверхность модели Menetrey-Willam.

2. Поверхность пластического потенциала [17], отвечающая за направление вектора пластических деформаций, описывающеюся формулой:

$$Q_{MW} = \rho^2 + B_g p + C_g \xi, \qquad (7)$$

где B_g и C_g параметры, характеризующие пластический потенциал.

3. Законы эволюции предельной поверхности, отвечающие за упрочнение и разупрочнение материала. В модели используемого материала были предусмотрены раздельные законы эволюции для сжатия и растяжения бетона (рис. 8).



а) б)

Рис. 8. Графическая интерпретация законов эволюции предельной поверхности: а) при сжатии; б) при растяжении

Прочностные и деформативные характеристики бетона, используемые в численном расчете определены на основании натурных испытаний, призменная прочность на сжатие составляет 18,5 МПа, что соответствует классу бетона В25, следовательно, прочность на растяжение можно принять 1,55 МПа. Для определения упругих, пластических и полных деформаций и соответствующих им напряжений, необходимых для задания законов эволюции (рис. 7), согласно приложению Г СП 63.13330 определены соответствующие значения:

- Прочность бетона на сжатие – 18,5МПа;
- Ωci=0,65 – 18,5×0,65=12,02 МПа;
- Ωcu=0,85 – 18,5×0,85=15,72 МПа;
- Ωcr=0,175 – 18,5×0,175=3,23 МПа;
- Модуль упругости $E = \frac{\sigma_{0,65}}{\varepsilon_{0,65}} = \frac{12,02}{0,00059} =$ 20381,3 МПа
- Прочность бетона на растяжение – 1,55МПа;
- Ωtr=0,1 – 1,55x0,1=0,155 МПа;

Поведение арматурной стали описано билинейной зависимостью с пределом текучести 515 МПа, принятое на основании проведенных экспериментальных исследований (рис. 9).

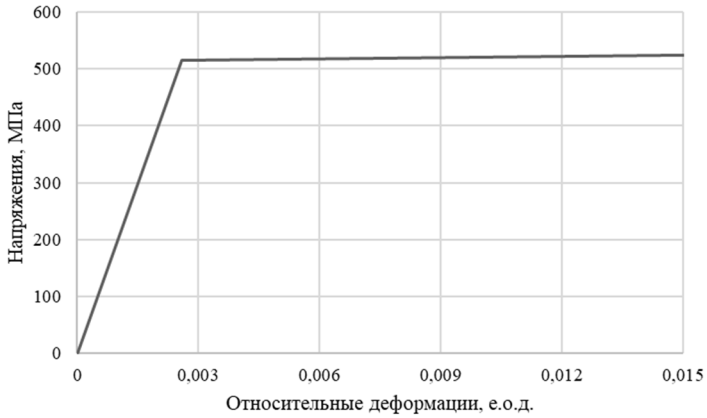


Рис. 9. Билинейная диаграмма деформирования арматуры

Решение задачи выполнялось в нелинейной постановке в условиях статического нагружения с использованием пошагового метода Ньютона-Рафсона. Нагружение модели производилось посредствам задания перемещений нижнего конца арматурного стержня, имитируя экспериментальные испытания. Приложение перемещения разбивалось на 100 равных подшагов.

4. Жесткость нелинейных пружин.

Жесткость пружин в коррозионно-поврежденных и неповрежденных моделях определялась на основании результатов экспериментальных исследований. Жесткость пружин определяется зависимостью действующей выдергивающей нагрузки от перемещения верхнего конца стержня. При предположении равенства пружин на всем участке сцепления арматуры с бетоном, то жесткость каждой можно определить по формуле:

$$D(s) = \frac{F}{n \cdot s}, \quad (8)$$

где F – значение усилия, прикладываемого к стержню; n – количество пружин; s – смещение верхнего конца стержня.

В расчетах параметры пружин задавались экспоненциальной зависимостью, полученной на основании натурных испытаний, показанные на рис. 4.

К нижнему концу стержня задавалось постоянное перемещений равное 1,5 мм. Результаты расчета, соответствующие пиковой нагрузке для коррозионно-поврежденной и неповрежденной модели представлены на рисунке 10, где наблюдается вертикальное перемещение стержня относительно бетонного сечения и характерная картина распределения напряжений вдоль контакта арматуры с бетоном.

На рис. 11 приведено графическое сопоставление зависимости реакции стержня от смещения его верхнего и нижнего торцов. Заметное расхождение этих двух кривых указывает на то, что стержень подвергается деформации растяжения. Даже с учётом того, что модуль упругости арматурной стали значительно выше модуля упругости бетона, игнорировать податливость стержня и считать его жёстким элементом при решении подобных задач некорректно.

Разница в перемещении нижнего и верхнего конца неповрежденного и коррозионно-поврежденного стержня составляет 20 % (0,62 мм и 0,75 мм) и 115 % (0,093 мм и 0,2 мм) соответственно. Отличие перемещений нижнего конца неповрежденного и поврежденного стержня составляет 567 % (0,62 мм и 0,093 мм), верхнего конца 275 % (0,75мм и 0,2 мм). Полученные ре-

зультаты показывают, что наличие коррозионного повреждения приводит к деградации сил сцепления и как результат к снижению деформирования арматурных стержней и возникающих в них растягивающих усилий.

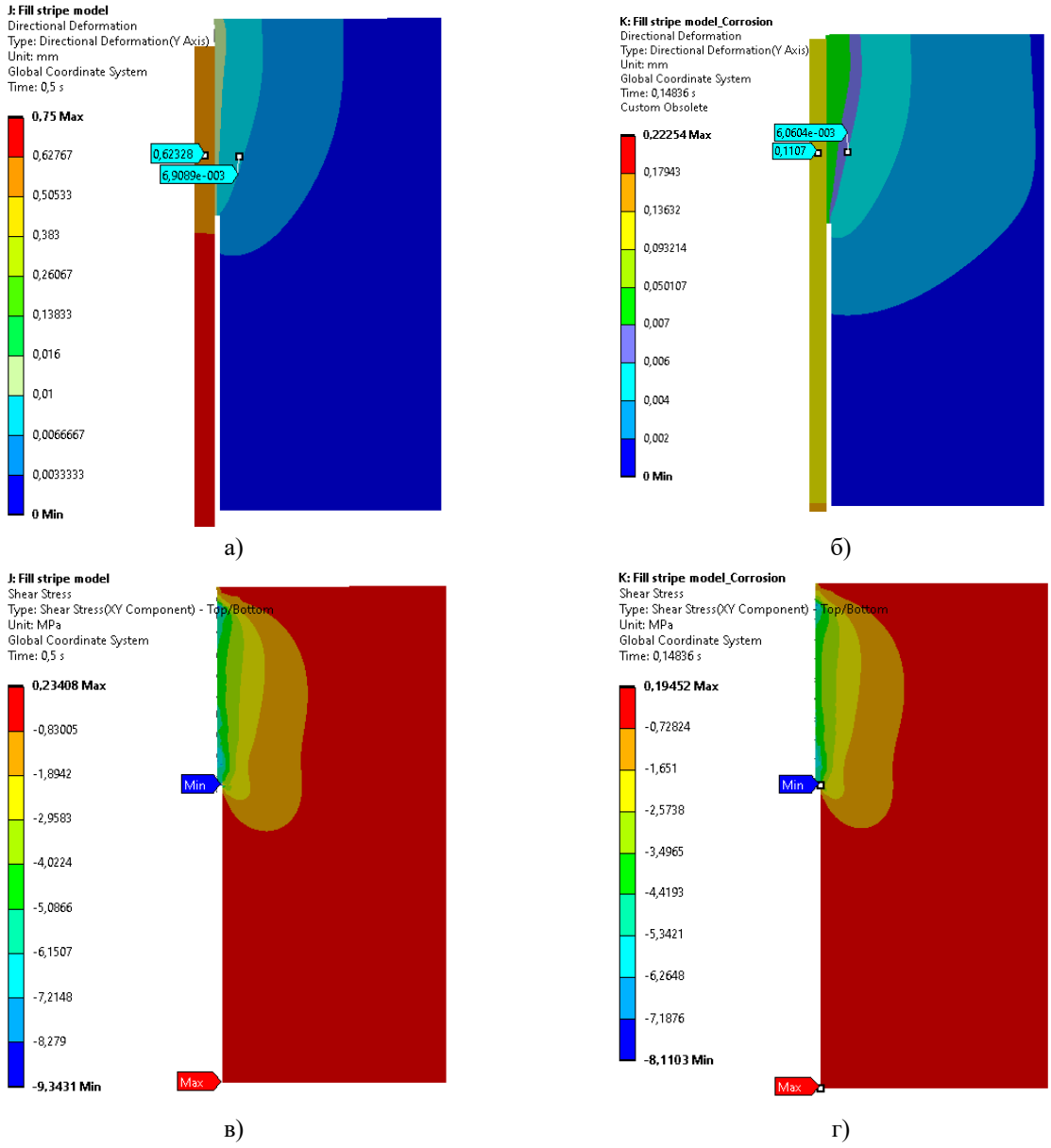


Рис. 10. Изополя вертикальных перемещений и касательных напряжений в бетоне:
а), в) неповрежденной арматуры; б), г) коррозионно-повреждённой арматуры

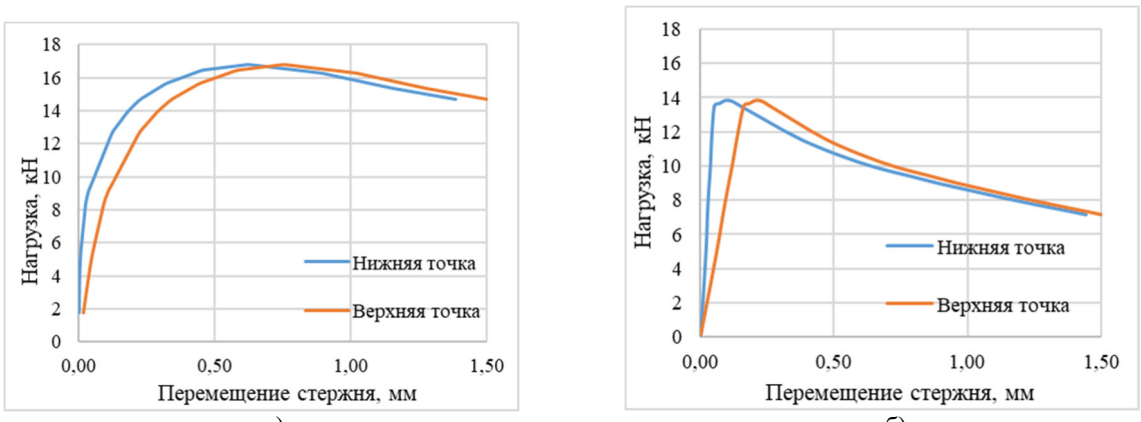


Рис. 11. Сравнение результатов выдергивающей силы от перемещения нижнего и верхнего конца:
а) коррозионно-поврежденного стержня; б) не поврежденного стержня

По анализу изополей поперечного среза при численном моделировании выдергивания арматуры из бетона заметно видна разница в касательных напряжениях в бетоне на контакте с арматурным стержнем. Влияние коррозии арматуры снижает напряжения с 9,34 МПа для неповрежденного коррозией стержня, до 8,11 МПа для поврежденного коррозией стержня, что при сравнении составляет разницу в 13 % относительно неповрежденного стержня.

Значения предельной выдергивающей силы при 23 % коррозионном повреждении арматурного стержня снижается на 17 %. Наличие коррозионного повреждения арматурных стержней приводит не только к известным и до некоторой степени изученным негативным последствиям, таким как разрушение защитного слоя бетона, снижения несущей способности, но и к скрытым отрицательным последствиям, одним из которых является необеспечение требуемой длины анкеровки, что не гарантирует совместную работу бетона с арматурой и может привести к проскальзыванию арматуры в теле. Данный эффект приводит к трансформации характера работы конструкции, перераспределению внутренних усилий и изменению напряженно-деформированного состояния запроектированной конструкции.

Выводы.

1. Экспериментальные данные показали, что ухудшение адгезии повреждённого коррозией стержня по сравнению с целым образцом составило 6 %, при этом площадь поперечного сечения арматуры была поражена на 23 %.

2. Диаграммы деформирования свидетельствуют о том, что присутствие коррозионных продуктов на арматуре изменяет работу стержня внутри бетонной матрицы. В случае корродированной арматуры её удержание обеспечивается силами трения между стержнем и продуктами коррозии, при этом зависимость «нагрузка – смещение» становится линейной. Для неповреждённого стержня, напротив, фиксируются зоны пластического смятия бетона в зоне контакта с арматурным профилем при выдёргивании.

3. Применение численной модели, в которой сцепление описывается набором нелинейных пружинных элементов, позволяет адекватно выполнить анализ и математически описать взаимосвязь между касательными напряжениями и величиной относительного смещения для корродированной арматуры.

4. При численном моделировании выдергивания стержня из бетона удалось выявить влияние коррозии арматуры на касательные напряжения в бетоне. При выбранном способе моделирования касательные напряжения в бетоне снижаются до 13 % в сравнении с неповрежденным арматурным стержнем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Д.С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2022. № 2. С. 55–64. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-55-64

2. Тамразян А.Г., Сайед Й. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределимых железобетонных балках // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 4. С. 557–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568

3. Меркулов С.И. Прогрессирующее разрушение конструктивных систем зданий с учетом силовых и коррозионных повреждений // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6, № 2. С. 3–11. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.2.3-11

4. 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. Т. 1, № 1. С. 46–54.

5. Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2014. № 2. С. 22–24.

6. Смоляго Г.А., Фролов Н.В., Дронов А.В. Анализ коррозионных повреждений эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715

7. Chenxia W., Shengxian X., Yangsheng Z., Fazhan Z. Experimental study on bond-slip behavior of carbonation-modified recycled concrete and corroded steel bars under combined salt corrosion // Construction and Building Materials. 2026. Vol. 513. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145463.

8. Xinyu L., Haotian L., Lin Y., Ying L., Haitang Z., Guojian L., Danying G. Corrosion behavior of steel bars embedded in steel fiber reinforced concrete (SFRC) under the condition of electro-accelerated chloride attack // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 106. 112701. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112701.

9. Xinyu L., Haotian L., Lin Y., Ying L., Haitang Z., Guojian L. Experimental study on the bonding between corrosion-damaged stainless steel bars and concrete // Proceedings of the Institution of Civil

Engineers – Structures and Buildings. 2025. Vol. 178. Iss. 12. Pp. 1087–1110. DOI: 10.1680/jstbu.25.00082.

10.Минеев М. С. Исследование параметров сцепления арматуры в бетоне для его оценки при коррозии // ИВД. 2024. № 2 (110). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-stsepleniya-armatury-v-betone-dlya-ego-otsenki-pri-korrozii (дата обращения: 03.03.2026).

11.Попов А.М., Самошкин А.С., Тихомиров В. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 1. Экспериментальные и аналитические методы // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2. С. 53–60. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_53

12.Попов А.М., Самошкин А.С., Тихомиров В.М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном. Часть 2. Численное моделирование // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1. С. 109–118. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_109

13.Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. Москва : Стройиздат, 1981. 184 с.

14.Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Влияние коррозионных повреждений арматуры на динамическое состояние сжатых железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2025. № 2. С. 81–93. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-81-93

15.Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // Magazine of Civil Engineering. 2013. № 5 (40). С. 86-99. DOI: 10.5862/MCE.40.10

16.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. Vol. 88. Article No. 8804. Pp. 84–91. DOI: 10.18720/CUBS.88.4

17.Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete. 2013. 434 p.

18.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. С. 16–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30

Информация об авторах

Попов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: popovds89@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Кудрявцев Максим Владимирович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Инюшина Ксения Петровна, студент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства. E-mail: Ksusainusina28052003@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила 27.03.2026 г.

© Кудрявцев М.В., Попов Д.С., Инюшина К.П., 2026

Kudryavtsev M.V., Popov D.S., Inyushina K.P.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru*

EFFECT OF CORROSION DAMAGE OF REINFORCEMENT ON BOND WITH CONCRETE

Abstract. *The article addresses the problem of reduced bond between reinforcement and concrete caused by corrosion damage to reinforcing bars. The relevance of the topic is due to the widespread use of reinforced concrete structures in construction and the need to assess their technical condition under long-term operation, especially when exposed to aggressive environments. Reinforcement corrosion leads not only to a reduction in its cross-sectional area but also to a change in the mechanism of interaction with concrete, which affects the load-bearing capacity, deformability, and overall reliability of structures. To study this phenomenon, the authors conducted experimental investigations, including tests on specimens with corroded and undamaged reinforcement. Corrosion damage was simulated using an accelerated method that replicates real operating*

conditions. During the tests, bond parameters, the nature of reinforcement slip relative to concrete, and the characteristics of deformation diagrams were evaluated. Numerical modeling was performed using the finite element method. The contact interaction between reinforcement and concrete was modeled using nonlinear spring elements, the stiffness of which was determined based on experimental data. A material model accounting for plastic properties was used to describe the behavior of concrete, allowing for accurate representation of the stress-strain state under various loading conditions. The results showed that corrosion damage to reinforcement significantly alters the nature of bond with concrete: the intensity of interaction between reinforcement and concrete decreases, the distribution of forces along the anchorage length changes, and the slip diagrams exhibit a different pattern compared to undamaged specimens. The proposed numerical model makes it possible to describe with sufficient accuracy the processes of deformation and failure of the reinforcement–concrete interface, taking into account corrosion damage. The obtained results can be used in assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures exposed to aggressive environments that have led to reinforcement corrosion.

Keywords: *adhesion, reinforced concrete, corrosion, reinforcement failure, bonding, corrosion modeling.*

REFERENCES

1. Popov D.S. Experimental studies of dynamic properties of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements [Eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskikh svoystv korrozionno-povrezhdennykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov]. Building and Reconstruction. 2022. No. 2. Pp. 55–64. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-55-64 (rus)

2. Tamrazyan A.G., Sayed Ye. Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion [Sravnenie pereraspredeleniya momentov v korrozirovannykh i nekorrozirovannykh staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh]. Vestnik MGSU. 2024. Vol. 19, No. 4. Pp. 557–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.557-568 (rus)

3. Merkulov S.I. Progressive Collapse of Structural Systems Considering Force and Corrosion Damage [Progressiruyushchee razrushenie konstruktivnykh sistem zdaniy s uchetom silovykh i korrozionnykh povrezhdeniy]. Reinforced Concrete Structures. 2024. Vol. 6, No. 2. Pp. 3–11. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.2.3-11 (rus)

4. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Ductility of Eccentrically Compressed Elements of RC Frame Damaged by Corrosion under Accidental Impacts [Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnykh vnetsentrenno szhatykh elementov karkasov zdaniy pri korrozionnykh povrezhdeniyakh v usloviyakh osobykh vozdeystviy]. Reinforced Concrete Structures. 2023. Vol. 1, No. 1. Pp. 46–54. (rus)

5. Smolyago G.A., Kryuchkov A.A., Drokkin S.V., Dronov A.V. Research of Aspects of Chloride Corrosion of Reinforced Concrete Structures [Issledovanie aspektov khloridnoy korrozii zhelezobetonnykh konstruktsiy]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2014. No. 2. Pp. 22–24. (rus)

6. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analysis of Corrosion Damage in Operated Flexural Reinforced Concrete Structures of Buildings and Structures [Analiz korrozionnykh povrezhdeniy ekspluatiruemykh izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715 (rus)

7. Chenxia W., Shengxian X., Yangsheng Z., Fazhan Z. Experimental study on bond-slip behavior of carbonation-modified recycled concrete and corroded steel bars under combined salt corrosion. Construction and Building Materials. 2026. Vol. 513. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.145463.

8. Xinyu L., Haotian L., Lin Y., Ying L., Haitang Z., Guojian L., Danying G. Corrosion behavior of steel bars embedded in steel fiber reinforced concrete (SFRC) under the condition of electro-accelerated chloride attack. Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 106. 112701. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112701.

9. Xinyu L., Haotian L., Lin Y., Ying L., Haitang Z., Guojian L. Experimental study on the bonding between corrosion-damaged stainless-steel bars and concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings. 2025. Vol. 178, Iss. 12. Pp. 1087–1110. DOI: 10.1680/jstbu.25.00082.

10.Mineev M.S. Research of the parameters of reinforcement adhesion in concrete for its assessment during corrosion [Issledovanie parametrov stsepleniya armatury v betone dlya ego otsenki pri korrozii]. IVD. 2024. No. 2 (110). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-paramet rov-stsepleniya-armatury-v-betone-dlya-ego-otsenki-pri-korrozii (rus)

11.Popov A.M., Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Research methods of reinforcement with concrete interaction. Part 1. Experimental and analytical methods [Metody issledovaniya vzaimodeystviya armatury s betonom. Chast 1. Eksperimental'nye i analiticheskie metody]. The

Siberian Transport University Bulletin. 2021. No. 2. Pp. 53–60. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_53 (rus)

12.Popov A M., Samoshkin A.S., Tikhomirov V.M. Research methods of interaction of reinforcement with concrete. Part 2. Numerical models [Metody issledovaniya vzaimodeystviya armatury s betonom. Chast 2. Chislennoe modelirovanie]. Bulletin of Siberian State University of Transport. 2023. No. 1. Pp. 109–118. DOI: 10.52170/1815-9265_2023_64_109 (rus)

13.Kholmyansky M.M. Contact of Reinforcement with Concrete [Kontakt armatury s betonom]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 184 p. (rus)

14.Tamrazyan A.G., Kudryavtsev M.V. Effect of Reinforcement Corrosion Damage on Dynamic Behavior of Compressed Reinforced Concrete Structures [Vliyanie korrozionnykh povrezhdeniy armatury na dinamicheskoe sostoyanie szhatykh zhelezobetonnykh konstruktsiy]. Building and Reconstruction. 2025. No. 2. Pp. 81–93. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-118-2-81-93 (rus)

15.Benin A.V., Semyonov A.S., Semyonov S.G., Melnikov B.E. Mathematical modeling of the process of fracture of bonding of reinforcement with concrete. Part 1. Models taking into account non-continuity of the connection [Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast 1. Modeli s uchetom nesploshnosti soedineniya]. Magazine of Civil Engineering. 2013. No. 5 (40). Pp. 86–99. DOI: 10.5862/MCE.40.10 (rus)

16.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. Vol. 88. Article No. 8804. Pp. 84–91. DOI: 10.18720/CUBS.88.4

17.Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete. 2013. 434 p.

18.Korsun V.I., Karpenko S.N., Makarenko S.Yu., Nedoresov A.V. Modern strength criteria for concrete under triaxial stress states [Sovremennye kriterii prochnosti dlya betonov pri ob"emnykh napryazhennykh sostoyaniyakh]. Building and Reconstruction. 2021. No. 5. Pp. 16–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30 (rus)

Information about the author

Popov, Dmitry S. PhD. E-mail: popovds89@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Kudryavtsev, Maxim V. PhD. E-mail: k.m.v.29.12.96@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Inyushina, Ksenia P. Student. E-mail: Ksusainusina28052003@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia.

Received 27.03.2026

Для цитирования:

Кудрявцев М.В., Попов Д.С., Инюшина К.П. Влияние коррозионных повреждений арматуры на сцепление с бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 10. С. 51–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-10-51-61

For citation:

Kudryavtsev M.V., Popov D.S., Inyushina K.P. Effect of corrosion damage of reinforcement on bond with concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 10. Pp. 51–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-10-51-61