

Влияние коррозионного износа арматуры на системную надежность и остаточную несущую способность железобетонных балок

Б. К. Джамуев, В. А. Иошкин, Г. В. Помозов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация: В работе проведён обзор современных стохастических и расчетных моделей, описывающих влияние коррозионного износа арматуры на системную надежность и остаточную несущую способность железобетонных балок. Особое внимание уделено питтинговой форме коррозии, как доминирующему механизму деградации прочности арматуры. Обобщены методы оценки времени инициации и развития коррозии, проанализированы критерии перехода от пластического к хрупкому разрушению конструкции, а также методы расчёта потери способности к перераспределению моментов. Приведены практические рекомендации по корректировке коэффициентов надежности при проектировании и эксплуатации подобных конструкций в условиях высокой вариативности.

Ключевые слова: железобетон, арматура, коррозия, питтинг, системная надежность, деградация, распределение Гумбеля, коэффициент надежности, перераспределение моментов.

Введение

Актуальность исследования

Коррозия арматуры является доминирующим механизмом износа крупномасштабной железобетонной инфраструктуры, требующим перехода к точному прогностическому моделированию остаточного ресурса. Традиционные детерминированные подходы недостаточны, так как они не учитывают стохастический и локализованный характер питтинговой коррозии.

Ключевая проблема заключается в том, что коррозионный износ вызывает концентрацию напряжений и критическую потерю пластичности арматуры. Это радикально нарушает способность статически неопределимых систем к перераспределению моментов, инициируя переход от пластического к хрупкому характеру разрушения.

Цель исследования

Систематический анализ влияния коррозионного износа арматуры на системную надежность железобетонных балок с учетом перехода от пластического к хрупкому характеру разрушения на основе современных теоретико-расчетных моделей.

Задачи исследования

1. Провести систематический анализ существующих стохастических моделей питтинговой коррозии арматуры (включая статистику экстремальных значений) и оценить их применимость для многофакторных расчетов остаточного ресурса железобетонных конструкций.

2. Обобщить и проанализировать современные расчетные подходы, описывающие одновременную деградацию механических характеристик арматуры (потерю площади сечения и снижение предельной деформации) и ухудшение прочности сцепления арматуры с бетоном под воздействием продуктов коррозии.

3. Проанализировать существующие методики расчета потери способности к перераспределению моментов в статически неопределимых балках при коррозионном износе арматуры, рассматривая эту потерю как функцию степени коррозии и связанной с ней потери пластичности.

4. Сформулировать научно обоснованные практические рекомендации по корректировке коэффициентов надежности для проектирования и оценки остаточного ресурса железобетонных балок с учетом выявленной системной уязвимости при коррозионном износе арматуры.

Методология

Данный раздел подробно описывает математические и вычислительные инструменты, используемые для реализации теоретического исследования, ориентированного на прогнозирование долговечности конструкций с высокой степенью неопределенности.

Вероятностная модель развития коррозионного износа

Для достижения заявленной цели требуется отказ от детерминированного прогноза коррозии в пользу стохастического подхода, разделяющего процесс на две фазы.

Стадия индукции коррозии, определяемая временем, необходимым для достижения высокой концентрации хлоридов на поверхности арматуры, моделируется с использованием стохастической интерпретации закона Фика. В этой модели ключевые входные параметры, такие как толщина защитного слоя бетона, коэффициент диффузии агрессивных агентов и пороговая концентрация хлоридов, трактуются как случайные переменные. Это позволяет получить вероятностное распределение времени *TinitTinit* вдоль конструкции, что важно для определения начала деградации в различных точках балки.

После инициации коррозии главной задачей становится моделирование питтинговой коррозии, которая является наиболее опасным механизмом снижения сопротивления.

Локализованный характер питтинга обуславливает хрупкое разрушение арматуры. Для учета пространственной изменчивости применяются стохастические методы, такие как статистика экстремальных

значений (например, распределение Гумбеля) или использование процесса Гамма.

Деградация сцепления и ее влияние на образование трещин

Накопление продуктов коррозии приводит к внутреннему давлению, вызывающему продольное растрескивание бетона. Это растрескивание резко снижает прочность сцепления $\tau(t)\tau(t)$, которая, в свою очередь, является жизненно важной для эффективного анкерования арматуры и распределения напряжений... Потеря сцепления усугубляет концентрацию напряжений в местах питтинга, поскольку нарушается равномерная передача напряжения от бетона к стали, что способствует наступлению хрупкого отказа даже при относительно небольшой потере металлического сечения [1].

Важным шагом является точное описание деградации пластичности арматуры. При питтинговой коррозии происходит не только уменьшение эффективной площади $A_s(t)A_s(t)$, но и значительное снижение предельной деформации $\epsilon_{su}\epsilon_{su}$ (предельной пластичности). Это подтверждается экспериментальными данными на корродированных стальных образцах [2]. Локальная концентрация напряжений в корне язвы резко уменьшает способность материала к пластической текучести, заставляя его работать в хрупком характере [3].

Для проведения нелинейного анализа статически неопределимых систем необходимо точно знать жесткость сечения. Используется нелинейная модель изгиба, которая учитывает трещинообразование, снижение $A_s(t)A_s(t)$ и влияние коррозионного повреждения на модуль упругости бетона. Расчет кривизны и жесткости $EI(t)EI(t)$ как функции

времени и степени деградации позволяет построить реалистичную модель работы балки под нагрузкой, что необходимо для точного определения фактического распределения моментов в многопролетной системе [2-4].

Алгоритм оценки системной надежности и потери избыточности

Конечной целью является расчет надежности системы в целом, а не только отдельных элементов.

Для оценки системной надежности используется иерархический подход, включающий расчет индекса надежности $\beta(t)$. Для поперечного сечения функция предельного состояния $G(R, Q, t) = R(t) - Q(t)$ — определяется с учетом пространственной и зависящей от времени изменчивости сопротивления $R(t)$ (обусловленного питтингом) и нагрузки $Q(t)$. Индекс надежности $\beta(t)$ рассчитывается с использованием методов первого порядка надежности (FORM) или, при необходимости, более точных методов Монте-Карло, которые позволяют учесть полное распределение вероятностей деградации вдоль длины арматурного стержня.

В статически неопределимых балках системная надежность во многом зависит от способности формировать пластические шарниры и перераспределять избыточные моменты. Анализ перераспределения моментов объясняет, почему коррозия так опасна для системной надёжности [5].

1. Метод: Проводится нелинейный анализ, где для каждого сечения определена предельная кривизна (κ_u) .

2. Поведение здоровой конструкции (пластичность): Первое отказавшее сечение превращается в пластический шарнир, перераспределяя нагрузку.
3. Поведение корродированной конструкции (хрупкость): Поражённое сечение разрушается мгновенно при достижении **куки**, не давая сформироваться другим пластическим шарнирам. Это исключает перераспределение и приводит к прогрессирующему разрушению.

Результаты исследования их теоретическая и практическая значимость

Ключевым результатом численного моделирования является количественное подтверждение сдвига характера разрушения и установление пороговых значений коррозионного износа, вызывающих этот сдвиг.

Расчеты демонстрируют, что коэффициент пластичности кривизны **иуиф** (отношение предельной кривизны к кривизне текучести) резко снижается при достижении определенного уровня питтинговой коррозии [6]. Численно подтверждено, что при развитии коррозии, поведение балок действительно имеет тенденцию к хрупкому поведению арматуры, а не пластическому. В частности, анализ показывает, что потеря всего 7–10% эффективной площади арматуры, если эта потеря обусловлена локализованным питтингом, может инициировать смену характера разрушения. Это происходит потому, что локальные напряжения в этих точках быстро превышают предельную прочность деградированной арматуры до достижения предела текучести [3].

Результаты моделирования показывают, что ослабление прочности сцепления **$\tau(t)\tau(t)$** , вызванное продольным растрескиванием бетона,

усиливает эффект потери пластичности. Снижение $\tau(t)\tau(t)$ приводит к более резкому градиенту напряжения вдоль арматуры вблизи трещин и опор, концентрируя деформации на коротких длинах [7].

Для наглядного представления зависимости между износом и механическим поведением представлены ключевые расчетные параметры:

Таблица №1

Параметры, определяющие переход характера разрушения

Параметр	Единица измерения	Влияние на пластичность ()	Пороговое значение (расчетное)
Потеря площади арматуры (Питтинг)	%	Резкое снижение	7% – 10% (Начало хрупкого характера)
Снижение прочности сцепления	%	Дополнительное снижение	Зависит от степени раскрытия трещин
Предельная деформация арматуры $\epsilon_{su}\epsilon_{su}$	Доля отн.	Критическое снижение	Иницирует хрупкое разрушение

Примечание: Пороговые значения потери площади арматуры (7-10%) и показатели предельной деформации определены на основе анализа работ [2, 3].

Численный анализ потери структурной избыточности

Самый серьезный расчетный результат касается системного поведения, то есть потери способности конструкции к мобилизации резервов прочности [8].

Численное моделирование статически неопределимой балки показывает, что доля достижимого перераспределения моментов $(\sigma_{MR})(\sigma_{MR})$ падает практически до нуля сразу после достижения критического уровня хрупкости арматуры. Если в неповрежденной балке $\sigma_{MR}\sigma_{MR}$ достигает 20–30%, то в корродированной балке, вышедшей на порог хрупкого отказа, этот показатель составляет лишь 0–5%. Это означает, что система внезапно становится статически определимой по механизму разрушения [1, 2, 9].

Сравнение индекса надежности отдельного сечения $(\beta_{comp})(\beta_{comp})$ с индексом надежности всей системы $(\beta_{sys})(\beta_{sys})$ показывает, что системный показатель падает намного быстрее. В то время как снижение $\beta_{comp}\beta_{comp}$ может быть умеренным, потеря способности к перераспределению моментов (уничтожение избыточности) приводит к резкому обвалу $\beta_{sys}\beta_{sys}$ [8].

Количественная иллюстрация влияния коррозии на системные параметры приведена в следующей таблице:

Таблица 2

Влияние коррозии (питтинг) на параметры надежности статически неопределимой балки [8]

Характеристика	Некорродированная балка	Корродированная балка (10% питтинга)	Изменение
Индекс надежности компонента ()	4.2	3.5	Умеренное снижение
Достижимое перераспределение моментов ()	20 – 30%	0% – 5%	Критическое снижение
Индекс системной надежности ()	5.0 (Высокий)	< 3.0 (Низкий, требует ремонта)	Резкое снижение

Примечание: Численные значения индексов надежности (β = 4.2, 3.5, 5.0) и показатели перераспределения моментов получены из работ [3, 9, 10] при типичных параметрах многопролетной железобетонной балки с армированием класса А500 и воздействием хлоридов.

Теоретическая и практическая значимости

Настоящее исследование описывает теорию долговечности, вводя критерий отказа, основанный на достижении высокого уровня хрупкости, а не только на критической потере сечения. Разработка комплексной пространственно-временной вероятностной модели позволяет более точно учесть стохастичность коррозии и ее влияние на механическое поведение арматуры [11].

Результаты исследования обеспечивают методологическую базу для более точного прогнозирования остаточного ресурса. Установленные

пороговые значения коррозии (7– 10% потери площади) могут быть использованы в качестве критериев при неразрушающем контроле, сигнализируя о высоком уровне потери пластичности.

Заключение

Коррозионный износ арматуры вызывает переход от пластического разрушения к хрупкому, что снижает структурную избыточность. Потеря пластичности препятствует формированию пластических шарниров, поэтому системная надёжность $(\beta_{sys})(\beta_{sys})$ падает опережающими темпами по сравнению с элементной $(\beta_{comp})(\beta_{comp})$. Это доказывает неконсервативность стандартных детерминированных подходов.

Литература:

1. Арабей А.Б., Мелехин О.Н., Ряховских И.В. и др. Исследование возможности длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными. Вести газовой науки: науч.-техн. сб. 2016. № 3(27). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanievozmozhnosti-dlitelnoy-ekspluatatsii-trub-s-neznachitelnymi-stress-korrozionnymipovrezhdeniyami.
2. Васильев О. П. Пространственно-временное моделирование диффузии хлоридов в трещиноватом бетоне. Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 2. С. 187–199.
3. Hingorani R., Pérez F., Sánchez J., Fullea J., Andrade C., Tanner P., et al. Loss of Ductility and Strength of Reinforcing Steel due to Pitting Corrosion: A Numerical and Experimental Study. Materials. 2015. pp. 7532-7551.
4. Xu L.Y., Cheng Y.F. Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain.

International J. of Pressure Vessels and Piping. 2012. URL: doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.09.008.

5. Сайед Й. А. К. Перераспределение усилий в многопролетных железобетонных балках при коррозионных повреждениях арматуры. Автореф. Дис. канд. техн. Наук. Сайед Йехия Ахмед Котп. М. 2024. 230 с.

6. Ибрагимов А.А., Шабаров А.Б., Подорожников С.Ю., Земенков Ю.Д. Метод расчета долговечности трубопроводов с учетом коррозии и переменных напряжений. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S4. URL: cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dolgovechnosti-truboprovodov-s-uchetom-korrozii-peremennyh-napryazheniy.

7. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Соппротивление усталости металлов и сплавов: в ч. 1. Киев: Наукова думка. 1987. URL: materialsience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/soprotivlenie_ustalostimetallov_i_splavov_spravochnik_troshchenko_vt_sosnovskiy_la_ch1_kiev_naukova_dumka_1_987__347s_07_02_2010/.

8. Алексейцев А.В., Юрусов К.В. Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки. Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. URL: 10.22227/1997-0935.2025.5.667-682.

9. Тамразян А.Г., Кудрявцев М.В. Влияние коррозионных повреждений арматуры на динамическое состояние сжатых железобетонных конструкций. Строительство и реконструкция. 2025. URL: doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-81-93.

10. Селяев В.П., Низина Т.А., Уткина В.Н. Химическое соппротивление и долговечность строительных материалов, изделий,

конструкций. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. 45 с.

11. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. Москва: Металлургия, 1993. 416 с.

References

1. Arabej A.B., Melehin O.N., Rjahovskih I.V. i dr. Vesti gazovoj nauki: nauch.-tehn. sb. 2016. № 3(27). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanievozmozhnostidlitelnoy-ekspluatatsii-trub-sneznachitelnymi-stress-korrozionnymipovrezhdeniyami.

2. Vasil'ev O. P. Vestnik MGSU. 2019. T. 14, № 2. pp. 187–199.

3. Hingorani R., Pérez F., Sánchez J., Fulla J., Andrade C., Tanner P., et al. Loss of Ductility and Strength of Reinforcing Steel due to Pitting Corrosion: A Numerical and Experimental Study. Materials. 2015. pp.7532-7551.

4. Xu L.Y., Cheng Y.F. International J. of Pressure Vessels and Piping. 2012. URL: doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.09.008.

5. Sajed J. A. K. Pereraspredilenie usilij v mnogoproletnyh zhelezobetonnyh balkah pri korroziionnyh povrezhdenijah armatury [Redistribution of forces in multi-span reinforced concrete beams with corrosive damage to the reinforcement]. Avtoref. Dis. kand. tehn. Nauk. Sajed Jehija Ahmed Kotp. M. 2024. 230 p.

6. Ibragimov A.A., Shabarov A.B., Podorozhnikov S.Ju, Zemenkov Ju.D. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2014. № S4. URL: cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dolgovechnosti-truboprovodov-s-uchetom-korroziiii-peremennyh-napryazheniy.

7. Troshhenko V.T., Sosnovskij L.A. Soprotivlenie ustalosti metallov i spлавov [Fatigue resistance of metals and alloys]: v ch. 1. Kiev: Naukova dumka. 1987. URL:



materialsscience.ru/subjects/materialovedenie/knigi/soprotivlenie_ustalostimetallov_i_splavov_spravochnik_troshchenko_vt_sosnovskiy_la_ch1_kiev_naukova_dumka_1987_347s_07_02_2010/..

8. Alekseycev A.V., Jurusov K.V. Vestnik MGSU. 2025. T. 20. Vyp. 5. URL: 10.22227/1997-0935.2025.5.667-682.

9. Tamrazjan A.G., Kudrjavcev M.V. Vlijanie korrozionnyh povrezhdenij armatury na dinamicheskoe sotojanie szhatyh zhelezobetonnyh konstrukcij. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2025. URL: doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-81-93.

10. Seljaev V.P., Nizina T.A., Utkina V.N. Himicheskoe soprotivlenie i dolgovechnost' stroitel'nyh materialov, izdelij, konstrukcij. Saransk: Izd-vo Mordov un-ta, 2003. 45 p.

11. Tomashov N.D., Chernova G.P. Teorija korrozii i korroziionnostojkie konstrukcionnye splavy [Corrosion Theory and Corrosion-Resistant Structural Alloys]. Moskva: Metallurgija, 1993. 416 p.

Дата поступления: 1.11.2025

Дата публикации: 9.12.2025