

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, С.А. ДАНКОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В работе рассмотрен экспериментальный метод оценки деградации физико-механических свойств стальных элементов, подверженных ускоренной коррозии.

Исследование основывается на испытаниях образцов из стали Ст3пс с тремя выборками по типам профильных сечений (круглое, прямоугольное, уголок). Методика включает два этапа: электрохимическую коррозию в 5% растворе NaCl с фиксацией потери массы и толщины стенок образцов, а также механические испытания на растяжение эталонных полос, полученных, в соответствии с ГОСТ 7564-73. Для проверки изменения физико-механических свойств металла от действия коррозии и конкретно его охрупчивания экспериментально проверялась зависимость коррозионной стойкости стальных элементов от формы их поперечного сечения и геометрических параметров.

Ключевые слова: стальной элемент, физико-механические свойства, модуль упругости, предел текучести, электрохимическая коррозия, охрупчивание.

Т.А. MATSEEVICH¹, S.A. DANKOV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

INFLUENCE OF CORROSION ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELEMENTS OF TRUSS STRUCTURES

Abstract. The paper considers an experimental method for assessing the degradation of physical and mechanical properties of steel elements subjected to accelerated corrosion.

The study is based on tests of St3ps steel specimens with three samples by types of profile sections (round, rectangular, angle) The methodology includes two stages: electrochemical corrosion in 5% NaCl solution with fixation of mass loss and wall thickness of samples, as well as mechanical tensile tests of reference strips obtained in accordance with GOST 7564-73. To check the change of physical and mechanical properties of the metal from the action of corrosion and specifically its embrittlement, the dependence of corrosion resistance of steel elements on the shape of their cross-section and geometric parameters was experimentally tested.

Keywords: steel element, physical and mechanical properties, elastic modulus, yield strength, electrochemical corrosion, embrittlement.

Введение

Металлические ферменные конструкции, благодаря своей экономической эффективности, находят широкое применение в области промышленного и гражданского строительства. Однако под воздействием коррозии их срок службы значительно сокращается, особенно в условиях интенсивной эксплуатации в агрессивных промышленных средах или в прибрежных районах [1, 2]. Коррозионные процессы уменьшают сечение конструктивных элементов, что негативно сказывается на надежности целой конструкции [3, 4]. Несмотря на успешные достижения в проектировании, опирающемся на методы повышения надежности (RBDO — Risk-Based Design and Optimization), многие современные стандарты и исследования игнорируют случайную природу коррозионных процессов, придерживаясь детерминированных подходов [5-8].

Это оставляет значительный пробел в прогнозировании остаточного ресурса конструкций, что подтверждается увеличением количества аварий в стареющей инфраструктуре. Данная проблема создала надобность в работах, опирающихся на стохастические методы [9, 10].

Основные усилия исследователей сосредоточены на моделировании коррозии бетона [13-16], в то время как особенности стальных ферм, включая влияние формы сечения на уровень деградации, а также изменение физико-механических свойств, а конкретно охрупчивание металла, остаются недостаточно изученными. Работы, проведенные Stewart и Deng (2015) [12], а также Melchers (2008) [11,18], подчеркивают зависимость скорости коррозии от факторов окружающей среды, но не рассматривают влияние на механические свойства стали. Вероятностные методы успешно используются для анализа деградации бетона [17], но их применение для стальных ферм требует дополнительных исследований. Экспериментальные данные о взаимосвязи формы сечения с коррозионной устойчивостью, затрагивались в работах Wang, Bai et al. (2020) [19, 20] и Guo et al. (2019) [21].

Настоящее исследование нацелено на оценку охрупчивания стальных элементов, подверженных коррозией различной степени. Для достижения данной цели ставятся следующие задачи:

1. Провести экспериментальную оценку деградации стали СтЗпс при электрохимической коррозии, включая анализ потерь массы, изменения толщины стенок и степень охрупчивания.
2. Исследовать влияние формы профильного поперечного сечения (круглое, прямоугольное, уголок) на скорость коррозии и остаточную прочность.

В отличие от предшествующих исследований, таких как Zhang et al. (2017) [22] и Chen & Alani (2013) [23], предложенная в этих работах модель интегрирует данные механических испытаний с параметризованными уравнениями предельных состояний, что улучшает точность прогнозирования. Практическое значение данной работы заключается в создании инструмента для оптимизации проектирования ферм, эксплуатирующихся в агрессивных условиях, соответствующего современным стандартам, таким как Eurocode 3 [24].

Актуальность исследования подтверждается необходимостью использования методов оценки остаточного ресурса стареющей инфраструктуры [25].

Метод

Методика определения влияния электрохимической ускоренной коррозии на физико-механические свойства элементов ферменных конструкций.

Были изготовлены физические образцы из конструкционной углеродистой стали марки СтЗпс, соответствующей по характеристикам широко применяемой в строительных металлических конструкциях стали. Все образцы имели одинаковую длину — 452,5 мм, но различались формой и размерами поперечного сечения. Расчетная длина принималась из условия того, что ферма раскреплена в другой плоскости, по верху и по середине высоты. Всего было 3 выборки по сечениям, имеющие схожую устойчивость и несущую способность: 6 образцов сечения \bigcirc 20x2,5мм, 6 образцов из равнополочного уголка L 25x25x4мм и 6 образцов сечения \square 20x20x1,5мм. В каждой выборке было по 2 эталонных образца, которые не подвергались коррозии. К остальным образцам были прикреплены контакты из медных проводов (см. рис. 1).

Этап ускоренной электрохимической коррозии проводился в лабораторных условиях с использованием 5%-ного водного раствора поваренной соли (NaCl), что соответствует типичным агрессивным средам, что соответствует прибрежным и промышленным районам, в условиях которых работают стальные конструкции. Электрохимическое воздействие обеспечивалось за счёт подключения постоянного тока, подаваемого через трансформатор MAISHENG.



Рисунок 1 – Испытательные образцы по сериям

Напряжение на электродах составляло около 2 В, сила тока 4 А. Образцы служили анодами в замкнутой цепи, в которой происходила постепенная потеря массы металла вследствие растворения (см. рис. 2). Процент коррозии рассчитывался с использованием закона Фарадея, который позволяет количественно определить массу растворившегося металла по формуле:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (1)$$

где m — масса растворённого металла (в граммах), M — молярная масса металла (г/моль), I — сила тока (А), t — время (с), n — число электронов, участвующих в реакции (валентность металла), F — постоянная Фарадея (96485,33 Кл/моль).

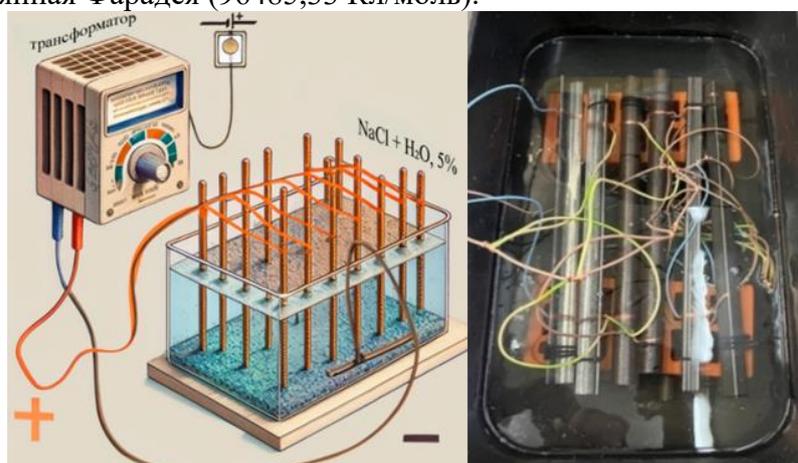


Рисунок 2 – Схема эксперимента, состоящая из трансформатора MAISHENG, резервуара с образцами (анодом) и куском металла (катодом) в соляном растворе (NaCl, 5%)

Использование данного подхода позволило контролировать уровень деградации материала и достигать различных степеней повреждения в зависимости от времени воздействия, все образцы корродировали одинаковое время, схема была включена 47 дней, из них 21 день схема была под напряжением. Также, периодически схема обесточивалась, образцы извлекались, очищались от продуктов коррозии и взвешивались, а также измерялась толщина стенки. Обрато образцы помещались уже в новые позиции.

После завершения стадии коррозии образцы были высушены и подготовлены к механическим испытаниям, зачищены и измерены. Для проверки влияния гальванической коррозии на свойства металла, из стоек уголка L 25x25x4 были сделаны эталонные полосы, из 2, 3 и 5 образцов. На них проводились испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 7564–73. Полосы были подготовлены с рассчитанными длинами рабочих зон в соответствии с ГОСТ 1497-84 по формуле (2):

$$L_0 = k \cdot \sqrt{b_0 \cdot h_0} \quad (2)$$

где b_0 — начальная ширина, h_0 — начальная толщина, $k = 5,65$ или $11,3$ в зависимости от длины образца (см. рис. 3).

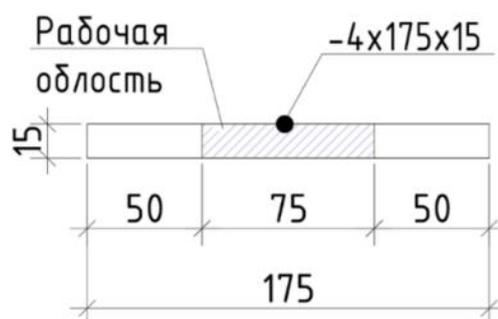


Рисунок 3 – Эталонная полоса для испытания на растяжение

Второй образец – контрольный, без коррозии, 5-ый образец имеет 8,9% коррозии, а 3-ий прокорродировал на 19%. Полоски из данных образцов были промаркированы соответственно 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 5-1 и 5-2. Были выбраны данные образцы потому, что между ними получился хороший шаг, по степени деградации стали. Испытания осуществлялись на универсальной гидравлической машине, оснащённой тензодатчиками и системой цифровой записи данных, на базе НИУ МГСУ. Образцы фиксировались в зажимах испытательной машины и нагружались в продольном направлении с постоянной скоростью деформации 1–5 мм/мин, что соответствует требованиям нормативной документации. Типы образцов и определяемые параметры приведены в таблице 2.

В процессе испытаний фиксировались такие параметры, как нагрузка, относительное удлинение, диаграмма «нагрузка-деформация». По начальному участку этой диаграммы определялся модуль упругости материала (E), далее — предел текучести σ_T и предел прочности σ_B . Также оценивались изменения хрупкости и характер разрушения после воздействия коррозии.

Результаты и обсуждения

По результатам описанной методики ускоренной электрохимической коррозии были получены результаты, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты корродирования металлических профилей в условиях ускоренной коррозии

<i>№ образца</i> <i>Сечение прямоугольное (□)</i>	1	2	3	4	5	6
m_1 , [Г]	365,42	363,58	385,36	380,24	375,85	376,24
$m_{\text{корр}}$, [Г]			362,2	364,8	287,9	326,4
% коррозии	-	-	6	4	23	13,2
l , [мм]	452,5	450,5	454	453	450	451
d , [мм]	20,28	20,25	20,19	20,24	20,21	20,27
Ср. знач $\square_{\text{корр}}$						11,55
<i>№ образца</i> <i>Сечение уголок (L)</i>	1	2	3	4	5	6
m_1 , [Г]	630,63	637,67	639,96	644,2	633,7	627,99
$m_{\text{корр}}$, [Г]			516,2	596,8	577	515,5
% коррозии	-	-	19	7,3	8,9	17,9
l , [мм]	449,5	454	450	448	450,5	449
d_1 , [мм]	25,09	25,18	25,06	25,04	24,87	24,91
d_2 , [мм]	24,99	25,09	24,87	25,03	24,8	24,8
Ср. знач $L_{\text{корр}}$						13,28
<i>№ образца</i> <i>Сечение круглое (○)</i>	1	2	3	4	5	6
m_1 , [Г]	601,38	643,39	641,4	578,95	613,59	655,61
$m_{\text{корр}}$, [Г]			578,1	572,1	591,8	639,1
% коррозии	-	-	9,82	1,18	3,45	2,51
l , [мм]	453,5	452	449	445	452,5	453,5
d , [мм]	26,94	26,82	26,79	26,72	26,79	26,59
Ср. знач $\bigcirc_{\text{корр}}$						4,24
Ср. знач корр						9,69

Примечание: m_1 — начальная масса образцов, в граммах, $m_{\text{корр}}$ — масса прокорродированных образцов, в граммах, l — расчетная длина образца в мм, d_n — толщина n -ой стенки образца в мм.

Корродированные образцы обрастали продуктами коррозии, которые до взвешивания зачищались, чтобы понимать фактическую оставшуюся массу стержней и толщину стенок (см. рис. 4 и 5).

В таблице 2 приведены данные экспериментальных образцов измеряемые параметры по Instron 3382.

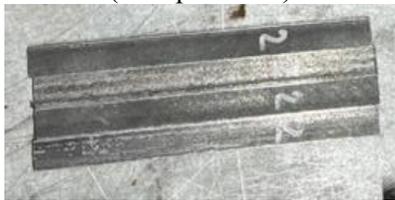


Рисунок 4 – Корродированный образец с продуктами коррозии



Рисунок 5 – Очищенный корродированный образец

Таблица 2 - Типы образцов и определяемые параметры

№ п/п	Тип образца	Схема нагружения	Кол-во, шт.	Определяемые параметры и дополнительные условия проведения испытаний
1	Образцы-полосы -4x172x15 из стали Ст3пс (контрольные) 	Растяжение по ГОСТ 1497-84 Металлы методы испытаний на растяжение	2	— Модуль упругости (по тензорезисторам: 1 шт./обр.), МПа; — Предел текучести (физический или условный), МПа; — Временное сопротивление, МПа; — Относительное удлинение после разрыва, %; — Диаграмма «напряжение - деформация» по тензорезисторам; Instron 3382
2	Образцы-полосы -4x172x15 из стали Ст3пс (после 19% коррозии) 		2	
3	Образцы-полосы -4x172x15 из стали Ст3пс (после 8,9% коррозии) 		2	

В таблице 3, представлены результаты испытаний стальных полос на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 на разрывной машине Instron 3382.

Таблица 3 - Результаты испытания стальных полос на растяжение

Маркировка	Толщина (мм)	Ширина (мм)	Длина (мм)	НРД (мм)	КРД (мм)	δ_5 , %	F_0 (мм ²)	P_T (кН)	σ_T (МПа)	P_{max} (кН)	σ_B (МПа)	σ_B/σ_T	Модуль упругости E (МПа)
2-1	3,81	15,09	174	40	57	42,5	57,49	17,9	309,4	26,1	453,9	1,46	219192
2-2	3,83	14,81	174	40	57	42,5	56,72	18,4	327,4	26,6	468,5	1,45	206606
Среднее значение:						42,5	-	-	318,4	-	461,2	1,45	212899
3-1	3,56	14,85	174	40	52	30,0	52,87	14,8	279,2	21,6	409,1	1,47	178972
3-2	3,61	15	174	40	52	30,0	54,15	14,6	268,7	21,7	392,5	1,49	195654
Среднее значение:						30,0	-	-	273,9	-	400,8	1,48	187313
5-1	3,78	14,91	174	40	54,9	37,3	56,36	16,4	291,0	24,2	429,4	1,48	204633
5-2	3,73	15	174	40	55	37,5	55,95	16,1	287,8	23,4	435,1	1,45	202747
Среднее значение:						37,4	-	-	289,4	-	432,3	1,46	203690

Примечание: НРД — начальная расчетная длина, КРД — конечная расчетная длина, δ_5 — относительное удлинение при разрыве, выраженное в процентах, измеренное на стандартном образце с расчетной длиной $5 \cdot d_0$, F_0 — начальная площадь сечения рабочей зоны, P_T — значение растягивающей силы, после которого деформация становится необратимой (пластической), σ_T — предел текучести, P_{max} — максимальная прикладываемая сила, σ_B — временное сопротивление разрыву, σ_B/σ_T — коэффициент запаса прочности (показатель относительной пластичности материала), E — модуль упругости.

Для оценки изменения физико-механических свойств стали СтЗпс были построены графики (рисунки 6 – 11). Так как у образцов изменялось поперечное сечение в зависимости от процента коррозии, для качественного сопоставления график 6 представлен в осях напряжения – перемещения. Таким образом, можно сравнивать образцы различного сечения. Также построены диаграммы относительно перемещений захватов машины, это связано с тем, что данные тензодатчиков, наклеенных на образцы, достоверны только в зоне упругой работы, так как при переходе через σ_T , из-за большого удлинения образцов тензодатчик отрывается. Данные для неупругих (пластических) участков работы снимались с экстензометра. На диаграмму нанесены значения σ_T и σ_B в МПа, представленные в таблице 3.

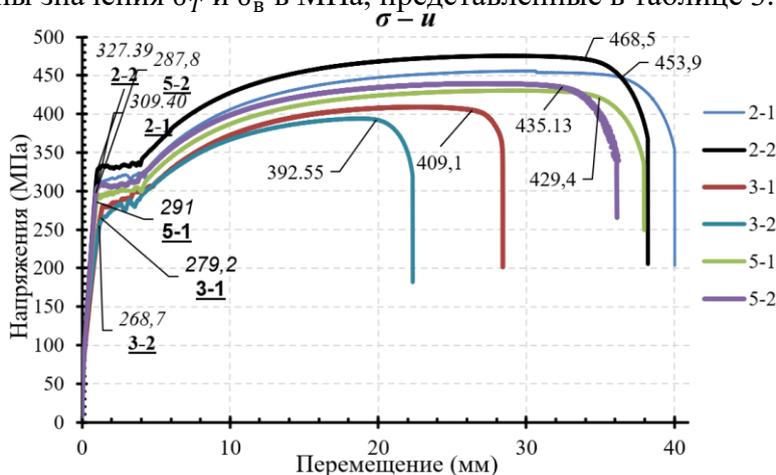


Рисунок 6 – Диаграмма $\sigma - \delta$, полос из стали СтЗпс с разным уровнем коррозии

На диаграмме 7 представлены данные о напряжениях и деформациях стальных полос. Из нее видно, что значения предела текучести у образцов отличаются. Также видно, что площадка текучести у корродируемых образцов меньше. Данная диаграмма строилась по значениям тензодатчика.

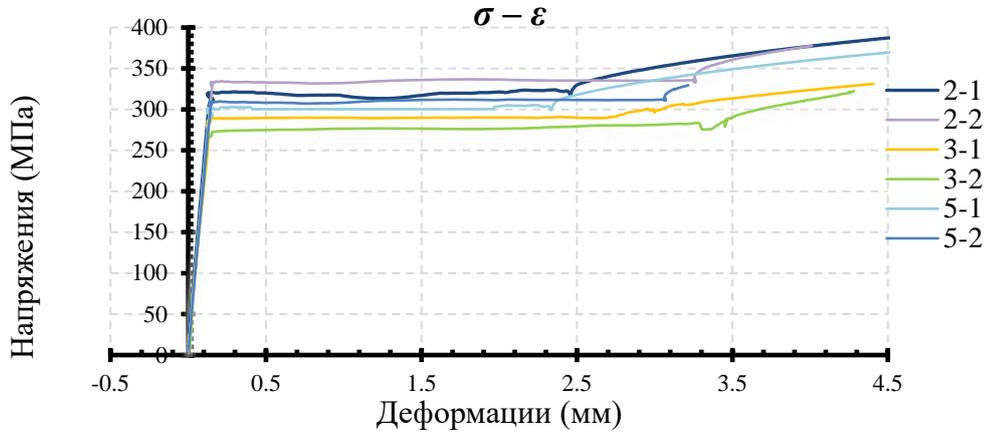


Рисунок 7 – Диаграмма $\sigma - \epsilon$, полос из стали СтЗпс с разным уровнем коррозии

Видно изменение уклона участка пропорциональности, диаграммы $\sigma - \epsilon$, что свидетельствует об изменении модуля упругости E .

На рисунке 8 видно изменение модуля упругости в зависимости от процента коррозии. Данный график строился по данным от всех образцов. Получился нисходящий линейный тренд.

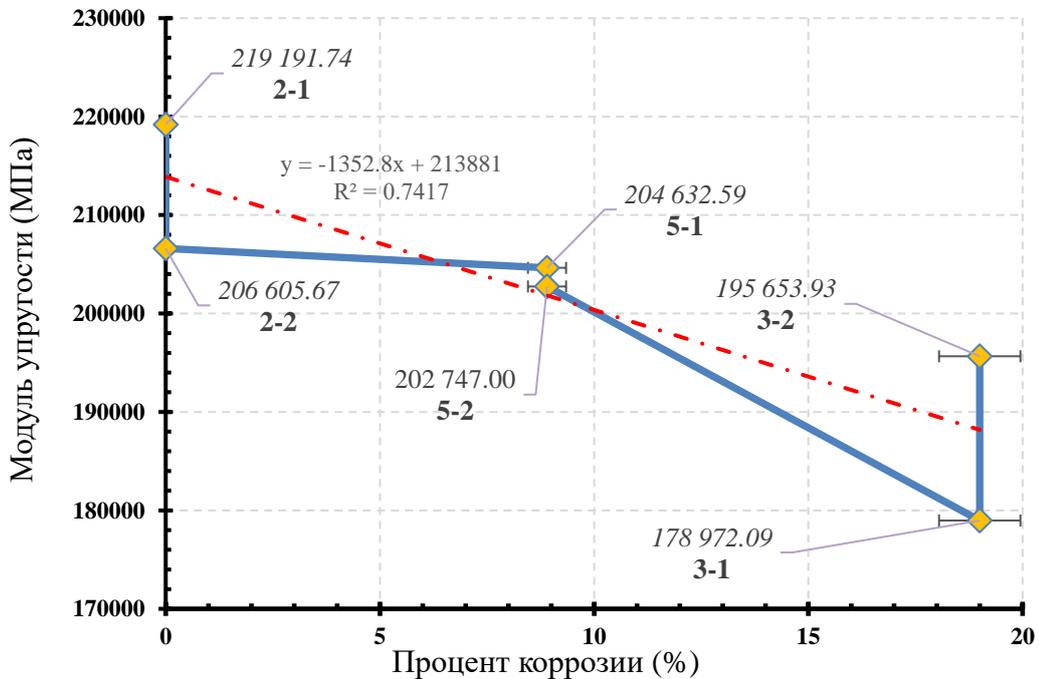


Рисунок 8 – График зависимости модуля упругости E от коррозионной деградации (охрупчивания) полос из стали СтЗпс

На рисунке 9 представлена гистограмма по значениям модулей упругости полос с разным процентом коррозии. Отчетливо прослеживается деградация физико-механических свойств стали в зависимости от степени корродирования.

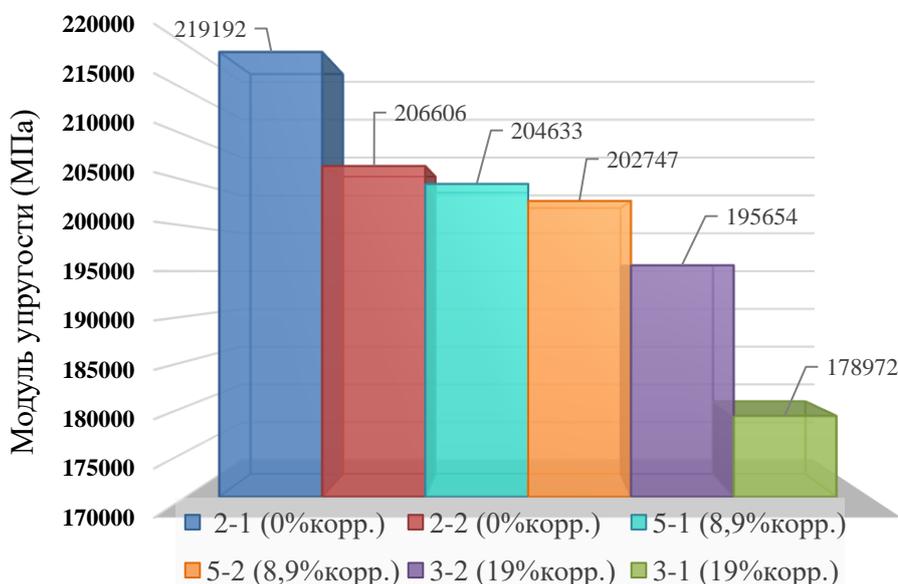


Рисунок 9 – Гистограмма охрупчивания полос из стали СтЗпс

На рисунке 10 также видно изменение модуля упругости, однако уже с усреднением по выборкам, в зависимости от процента коррозии. Можно отметить, что при усреднении коэффициент детерминации R^2 имеет куда большее значение, что говорит о хорошем описании линейной зависимостью.

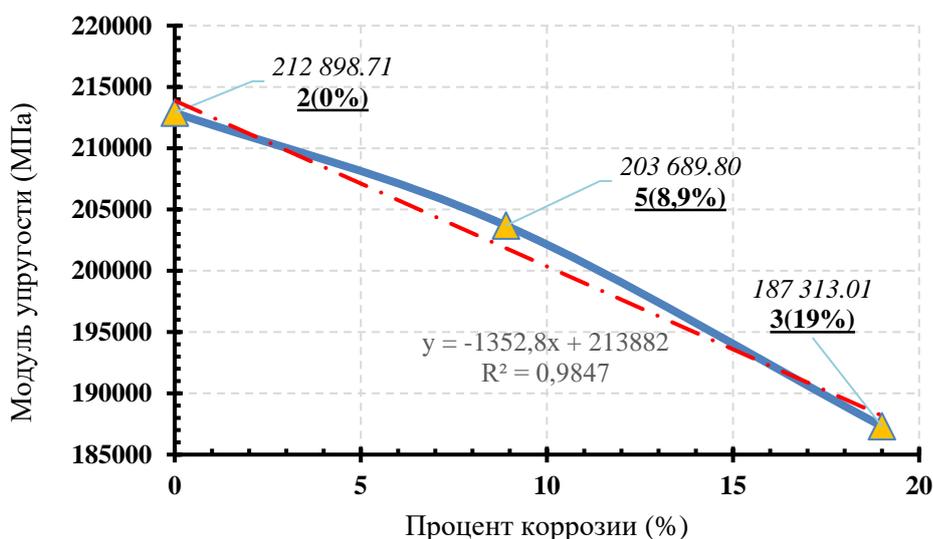


Рисунок 10 – График зависимости модуля упругости E от коррозионной деградации (охрупчивания) полос из стали СтЗпс, с усреднением по сериям

На рисунке 11 представлена гистограмма значений модулей упругости полос из стали Ст3пс с усреднением по сериям с разными процентами коррозии.

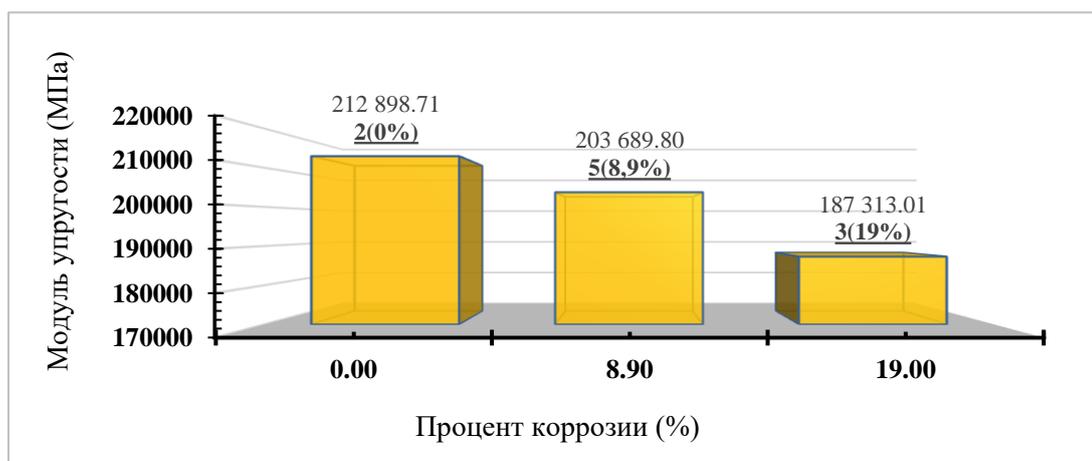


Рисунок 11 – Гистограмма охрупчивания полос из стали Ст3пс, с усреднением по сериям

Заключение

В данном исследовании проверялась зависимость коррозионной стойкости элементов фермы от формы их поперечного сечения и геометрических параметров.

Установлено, что круглое сечение обладает наивысшей коррозионной стойкостью, так среднее значение по выборке \bigcirc 20x2,5мм составило 4,24%, по выборке \square 20x20x1,5мм – 11,55%, а открытый уголок показал самые слабые результаты, так выборка L 25x25x4мм прокорродировала на 13,28%. Это связано с тем, что у круглого сечения нет концентраторов напряжения, к внутренним поверхностям замкнутых контуров гораздо затруднительнее поступать кислороду, а соответственно окисление на них замедленно. Отметим:

1. незначительное изменение соляного баланса влияет на скорость коррозии, в связи с чем, у элементов из одной выборки коррозия развивалась по-разному при одинаковых условиях эксперимента;
2. отдельно можно выделить купирование поверхности образцов продуктами коррозии, в связи с чем, к поверхности нарушается доступ кислорода, даже несмотря на пористость продуктов коррозии.

Из испытания стальных полос на растяжение можно заключить, что степень коррозионного износа влияет на физико-механические свойства материала. Так, у некорродированных образцов усредненный модуль упругости составил 212 898 МПа, что близко к справочному значению. У образцов с процентом коррозии 8,9% модуль упругости снизился на 5,7% и составил 203 689 МПа. А у серии образцов с процентом коррозии 19%, модуль упругости снизился на 13,1%, его значение составило 187 313 МПа. Влияние имеет нисходящий линейный тренд. Это связано со структурным изменением поверхностного слоя стали.

Таким образом, результаты, полученные от исследования влияния корродированных элементов создают основу для дальнейшего совершенствования нормативных расчетов и проектных подходов. Результаты эксперимента будут заложены, как эмпирическая константа в модель материала, для дальнейшего численного моделирования материала с учетом изменения физико-механических свойств с течением времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bastidas-Arteaga, E., Chateaufneuf, A., Sánchez-Silva, M., Bressolette, P., & Schoefs, F. (2013). Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach. *Structural Safety*, Vol. 40, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.strusafe.2012.08.004.
2. Biondini, F., & Frangopol, D.M. (2016). Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: Review. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 9, Art. F4016001. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001544.
3. Kim, S., & Surendran, S. (2014). Residual strength assessment of corroded steel plates using nonlinear finite element analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No. 9, Art. 04014056. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000968.
4. Val, D.V., & Trapper, P.A. (2008). Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 4, pp. 589–596. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.11.007.
5. Ellingwood, B.R. (2005). Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: State of practice and research issues. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–18. DOI: 10.1080/15732470412331289314
6. Saassouh, B., & Lounis, Z. (2012). Reliability Engineering & System Safety. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 107, pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.ress.2012.02.003.
7. Тамразян А.Г. (2024). Усталостное поведение изгибаемых железобетонных балок при коррозии, Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 22-34.
8. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой, Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
9. Мацеевич Т.А., Данков С.А. К оценке надежности коррозионно-поврежденных стержневых конструкций с использованием цепей маркова на примере металлических ферм, в сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2023. Сборник докладов IV Национальной научной конференции. Москва, 2024. С. 630-634.
10. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Развитие математических моделей, описывающих процессы коррозии в бетонных и железобетонных конструкциях, Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3. С. 85-93.
11. Melchers, R.E. (2008). Deterioration of steel structures due to atmospheric corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 43, No. 3, pp. 178–185. DOI: 10.1179/174327808X325236.
12. Stewart, M.G., & Deng, X. (2015). Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Engineering Structures*, Vol. 87, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.013.
13. Li, C.Q., Yang, S., & Saassouh, B. (2016). Моделирование распространения коррозии в железобетонных конструкциях. Исследования цемента и бетона, том 89, стр. 1-12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.07.015.
14. Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона // *Magazine of Civil Engineering*. – 2014. – № 1. – С. 41-52.
15. Колчунов В.И. Развитие методов анализа надежности усиливаемых конструкций при техногенных воздействиях. – М.: РААСН, 2004. – 210 с.
16. Лебедев, В. А., и др. (2017). Коррозия и защита строительных конструкций. Стройиздат, 2017. ISBN 978-5-274-06024-5.
17. Vu, K.A.T., & Stewart, M.G. (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*, Vol. 22, No. 4, pp. 313–333. DOI: 10.1016/S0167-4730(00)00018-7.
18. Melchers, R.E. (2008). Marine corrosion of structural steel. *Marine Structures*, Vol. 21, No. 2-3, pp. 72–88. DOI: 10.1016/j.marstruc.2008.03.004.
19. Wang, Y., Li, S., & Zhang, L. (2020). Corrosion behavior of steel with different cross-sectional shapes in chloride environments. *Construction and Building Materials*, Vol. 262, Art. 120801. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120801.
20. Bai, Y., Wang, Q., & Li, Y. (2020). Деградация механических свойств конструкционной стали под действием коррозии: Экспериментальное и численное исследование. *Строительство и строительные материалы*, том 252, ст. 119061. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119061.
21. Guo, A., Li, H., & Zhao, Y. (2019). Experimental study on the influence of geometric parameters on corrosion resistance of steel sections. *Thin-Walled Structures*, Vol. 145, Art. 106414. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106414.
22. Zhang, W., Li, Y., & Zheng, J. (2017). Probabilistic modeling of pitting corrosion in steel structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 48, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.probengmech.2017.03.002.

23. Chen, H., & Alani, A.M. (2013). Reliability-based assessment of corroded steel structures using advanced fracture mechanics. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, pp. 216–227. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.016.
24. European Committee for Standardization (CEN). (2005). Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-1. Brussels, Belgium.
25. International Organization for Standardization (ISO). (2012). Corrosion of metals and alloys — Classification of environmental conditions. ISO 9223. Geneva, Switzerland.

REFERENCES

1. Bastidas-Arteaga, E., Chateaufneuf, A., Sánchez-Silva, M., Bressolette, P., & Schoefs, F. (2013). Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach. *Structural Safety*, Vol. 40, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.strusafe.2012.08.004.
2. Biondini, F., & Frangopol, D.M. (2016). Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: Review. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 9, Art. F4016001. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001544.
3. Kim, S., & Surendran, S. (2014). Residual strength assessment of corroded steel plates using nonlinear finite element analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No. 9, Art. 04014056. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000968.
4. Val, D.V., & Trapper, P.A. (2008). Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 4, pp. 589–596. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.11.007.
5. Ellingwood, B.R. (2005). Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: State of practice and research issues. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–18. DOI: 10.1080/15732470412331289314
6. Saassouh, B., & Lounis, Z. (2012). Reliability Engineering & System Safety. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 107, pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.res.2012.02.003.
7. Tamrazyan A.G. (2024). Fatigue behavior of bendable reinforced concrete beams under corrosion, *Reinforced Concrete Structures*. 2024. T. 6. № 2. С. 22-34.
8. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. ANALYSIS OF RELIABILITY OF REINFORCED Concrete Slabs with Corroded Armature, *Construction and Reconstruction*. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
9. Matseevich T.A., Dankov S.A. Towards the Reliability Assessment of Corrosion-Damaged Sturgeon Structures with the Use of Markov Chains as an Example of Metal Ferms, in *Collection: Actual Problems of Construction Industry and Education - 2023*. Collection of reports of the IV National Scientific Conference. Moscow, 2024. С. 630-634.
10. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Development of MATHEMATICAL MODELS DESCRIBING CORROSION PROCESSES IN BETON AND REINFORCED Concrete Structures, *Bulletin of Volga Region State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2020. № 3. С. 85-93.
11. Melchers, R.E. (2008). Deterioration of steel structures due to atmospheric corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 43, No. 3, pp. 178–185. DOI: 10.1179/174327808X325236.
12. Stewart, M.G., & Deng, X. (2015). Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Engineering Structures*, Vol. 87, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.01.013.
13. Li, C.Q., Yang, S., & Saassouh, B. (2016). Modeling corrosion propagation in reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, Vol. 89, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.07.015.
14. Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Yudina O.A. (2014). Forecasting the durability of reinforced concrete structures considering sulfate corrosion of concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 1, 41-52.
15. Kolchunov V.I. Development of methods for analyzing the reliability of reinforced structures under technogenic influences. - M.: RAASN, 2004. - 210 c.
16. Lebedev, V. A., et al. (2017). Corrosion and protection of building structures. Stroyizdat, 2017. ISBN 978-5-274-06024-5.
17. Vu, K.A.T., & Stewart, M.G. (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*, Vol. 22, No. 4, pp. 313–333. DOI: 10.1016/S0167-4730(00)00018-7.
18. Melchers, R.E. (2008). Marine corrosion of structural steel. *Marine Structures*, Vol. 21, No. 2-3, pp. 72–88. DOI: 10.1016/j.marstruc.2008.03.004.
19. Wang, Y., Li, S., & Zhang, L. (2020). Corrosion behavior of steel with different cross-sectional shapes in chloride environments. *Construction and Building Materials*, Vol. 262, Art. 120801. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120801.
20. Bai, Y., Wang, Q., & Li, Y. (2020). Corrosion-induced degradation of mechanical properties in structural steel: Experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, Vol. 252, Art. 119061. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119061.
21. Guo, A., Li, H., & Zhao, Y. (2019). Experimental study on the influence of geometric parameters on corrosion resistance of steel sections. *Thin-Walled Structures*, Vol. 145, Art. 106414. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106414.
22. Zhang, W., Li, Y., & Zheng, J. (2017). Probabilistic modeling of pitting corrosion in steel structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 48, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.probengmech.2017.03.002.

23. Chen, H., & Alani, A.M. (2013). Reliability-based assessment of corroded steel structures using advanced fracture mechanics. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, pp. 216–227. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.02.016.
24. European Committee for Standardization (CEN). (2005). Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-1. Brussels, Belgium.
25. International Organization for Standardization (ISO). (2012). Corrosion of metals and alloys — Classification of environmental conditions. ISO 9223. Geneva, Switzerland.

Информация об авторах:

Мацевич Татьяна Анатольевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
д.ф-м. н, профессор, E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Данков Савелий Андреевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Information about authors:

Matseevich Tatiana A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor Of Physical And Mathematical Sciences, Professor,
E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Dankov Saveliy A.^{book}

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.04.2025
Одобрена после рецензирования 07.06.2025
Принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted 30.04.2025
Approved after reviewing 07.06.2025
Accepted for publication 11.06.2025