

УДК 624.012.3:519.816

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПЕРЕМЕННЫМИ, ОЦЕНИВАЮЩИМИ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ ОСМОТРЕ

*Ю.С. Дордюк*

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

e-mail: [jul4onka@mail.ru](mailto:jul4onka@mail.ru)

*Опираясь на обобщенные результаты экспериментальных исследований, установлены базовые зависимости, связывающие параметры силового и коррозионного трещинообразования существующих конструкций со степенью коррозионного повреждения арматуры, уровнем деградации прочности сцепления по контакту бетона и корродирующего арматурного стержня, прогибом конструктивных элементов.*

**Ключевые слова:** *зависимость, переменная, техническое состояние, трещинообразование, коррозия, прочность сцепления, прогиб.*

## ESTABLISHING RELATIONSHIPS BETWEEN VARIABLES ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDING STRUCTURES DURING VISUAL INSPECTION

*Y. Dardziuk*

Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

e-mail: [jul4onka@mail.ru](mailto:jul4onka@mail.ru)

*Based on the generalized results of experimental studies, basic dependencies have been established that link the parameters of force and corrosion cracking of existing structures with the degree of corrosion damage to the reinforcement, the level of degradation of the adhesion strength at the contact of concrete and the corroding reinforcement bar, and the deflection of structural elements.*

**Keywords:** *dependence, variable, technical condition, crack formation, corrosion, adhesion strength, deflection.*

**Введение.** Одним из наиболее важных элементов предварительного обследования является разработка системы, позволяющей классифицировать категорию состояния существующей конструкции по зафиксированным в процессе визуального предварительного обследования внешним признакам. Одним из основных условий разработки такой системы является сохранение логических связей между основными базовыми переменными, такими как внешний вид бетона, наличие и ширина раскрытия продольных коррозионных трещин в защитном слое; наличие и ширина раскрытия трещин нормального отрыва; степень коррозионного повреждения арматуры; относительные прогибы.

**Экспериментальная часть.** *Зависимость между степенью коррозионного повреждения арматурного стержня и шириной раскрытия продольной трещины*

При выводе зависимостей, связывающих параметры трещинообразования (ширину раскрытия, расположение, протяженность продольных трещин) со степенью коррозионного повреждения арматуры, была использована общепринятая расчетная модель толстостенного бетонного цилиндра, в который погружен корродирующий стальной стержень. Опираясь на выявленный механизм формирования продольных коррозионных трещин, была предложена комплексная методика, позволяющая связать ширину раскрытия коррозионной продольной трещины со степенью коррозион-

ного повреждения арматурного стержня, выраженной глубиной распространения коррозионного повреждения по сечению или связанной с ней потерей массы.

В рамках предложенного подхода оценивание коррозионного состояния арматурного стержня и связанного с ним трещинообразования выполняли в два этапа.

На *первом этапе* была установлена расчетная модель, позволяющая обоснованно определять критическую глубину распространения коррозионного повреждения в арматурном стержне и связанную с ней потерю массы, при которых инициируется образование продольной коррозионной трещины. При разработке расчетного подхода были рассмотрены и детально проанализированы как аналитические (*M.P. Webster* и *L.A. Clark* [1]), так и эмпирические модели (*M.P. Webster* и *L.A. Clark* [1], *K. Lungren* [2], *J. Rodriguez* и др. [3], *C. Alonso* и др. [4]), описывающие критическую глубину распространения коррозионного повреждения как функцию от следующих базисных переменных: толщины защитного слоя бетона и диаметра стержня либо их отношения; средней прочности бетона на сжатие; средней прочности бетона на растяжение при раскалывании.

Выбор расчетной зависимости для определения критической глубины распространения коррозионного повреждения осуществляли по результатам оценивания статистических параметров ошибки моделирования в соответствии с Приложением D ТКП EN 1990 [5]. Для выполнения верификации зависимостей на фоне экспериментов была сформирована собственная база данных, включающая результаты 60 опытов, выполненных с 1990 по 2012 гг. Верификации были подвергнуты пять расчетных зависимостей, включая *M.P. Webster* и *L.A. Clark* (аналитическая и эмпирическая модели) [1], *K. Lungren* [2], *J. Rodriguez* и др. [3], *C. Alonso* и др. [4]. По результатам оценивания (см. таблицу 1) лучшие и довольно близкие статистические параметры, полученные при оценивании ошибки моделирования, показали модели *J. Rodriguez* и др. [3] и *C. Alonso* и др. [4] (см. рисунок 1, таблицу 1).

На *втором этапе* описана расчетная модель для определения ширины раскрытия продольных коррозионных трещин. По результатам статистического анализа ошибки моделирования в соответствии с Приложением D ТКП EN 1990 [5] расчетных зависимостей (*C. Andrade* и др. [6], *J. Rodriguez* и др. [3], *D. Coronelli* и др. [7]) на фоне собственной базы опытных данных, сформированной из 39 результатов испытаний, была предложена комбинированная расчетная модель, в которой ширину раскрытия трещины рассчитывают по зависимости *J. Rodriguez* и др. ( $w_t = 0,05 + \beta \cdot (x - x_{cr})$ ) [3]), а критическую глубину распространения коррозионного повреждения, необходимую для образования продольной коррозионной трещины, рассчитывают по зависимости *C. Alonso* и др. ( $x_{cr} = 7,53 + 9,32 \cdot \frac{c}{\varnothing}$ ) [4].

Таблица 1. – Сравнение статистических параметров расчетных моделей для определения параметров коррозионного трещинообразования

Модель	Статистические параметры ошибки моделирования	
	b	V <sub>b</sub> , %
<i>Webster</i> и <i>Clark</i> (эмпир. модель) [1]	0,93	56,6
<i>Webster</i> и <i>Clark</i> (аналит. модель) [1]	2,49	63,6
<i>Lungren</i> 3-D модель [2]	12,41	60,1
<i>Rodriguez</i> и др. [3]	1,24	37,8
<i>Alonso</i> и др. [4]	1,27	38,5

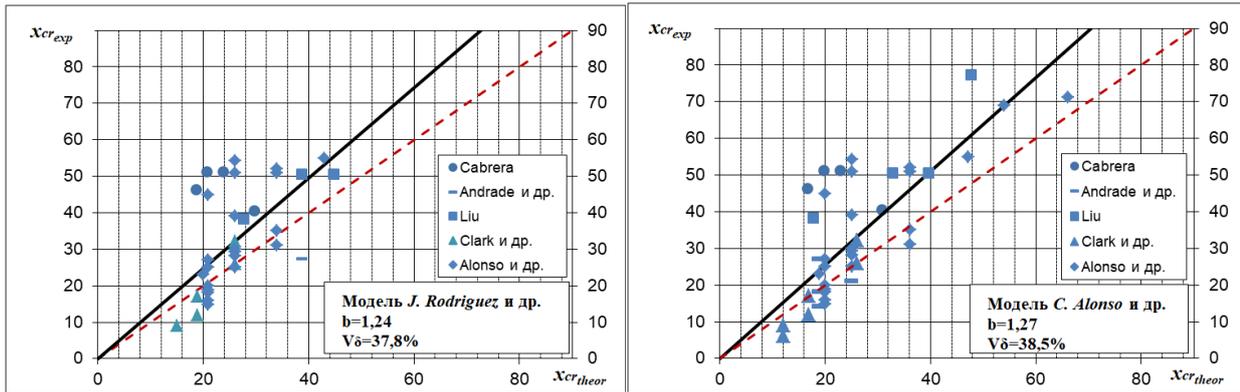


Рисунок 1. – Сравнение опытных и расчетных значений глубины распространения коррозионного повреждения по моделям J. Rodriguez и др. [3] и C. Alonso и др. [4]

**Зависимость между степенью коррозионного повреждения стальной арматуры и шириной раскрытия трещин нормального отрыва**

Параметрические исследования влияния степени коррозионного повреждения арматуры на ширину раскрытия трещин нормального отрыва выполняли с применением блочной модели для железобетонного элемента, включающей уравнения равновесия в обобщенных напряжениях, условия совместной деформации с учетом эффекта проскальзывания арматурного стержня относительно бетона, диаграммы деформирования « $\sigma$ - $\epsilon$ » для материалов и диаграммы « $\tau$ - $s$ » для контакта арматурного стержня с бетоном (рисунок 2).

При выполнении анализа с использованием деформационной блочной модели базовыми параметрами являются аналитическое описание закона сцепления « $\tau$ - $s$ » по контакту проржавевшего стержня с окружающим бетоном и значения параметрических точек диаграммы. Для аналитического описания диаграммы « $\tau$ - $s$ » за основу была принята зависимость, предложенная fib Model Code 2010 [8]. При этом зависимости для определения расчетных значений в параметрических точках диаграммы деформирования были предложены автором (см. таблицу 2).

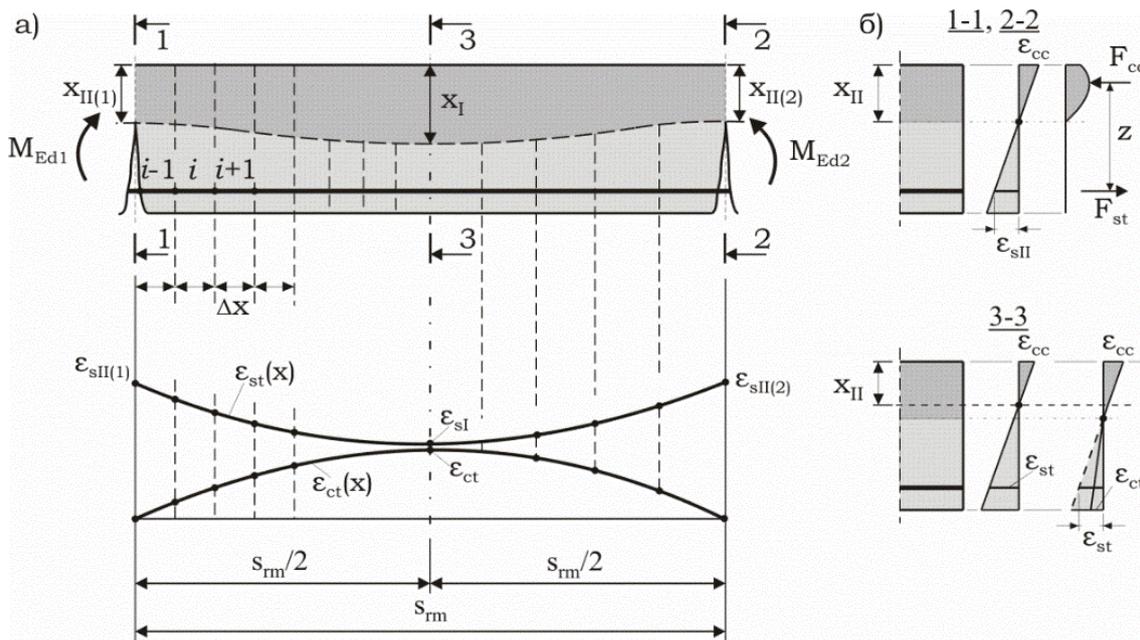


Рисунок 2. – Распределение относительных деформаций в арматуре ( $\epsilon_{st}(x)$ ) и бетоне ( $\epsilon_{ct}(x)$ ) на длине блока между трещинами нормального отрыва (а) и по высоте сечения (б)

Таблица 2. – Предложения по нормированию параметрических точек диаграммы « $\tau$ - $s$ » для корродирующего стержня

$\tau_{\max}$ , МПа	$s_1$ , мм	$\tau_f$ , МПа	$s_3$ , мм
$1,56 \cdot \frac{1}{(1 + 0,8 \cdot w_l)} \cdot f_{bond,0}$	1,0	$0,40\tau_{\max}$	$s_{clear}$

На рисунке 3 показаны модификации диаграммы « $\tau$ - $s$ » в зависимости от ширины раскрытия продольной трещины, вызванной коррозионным повреждением арматуры.

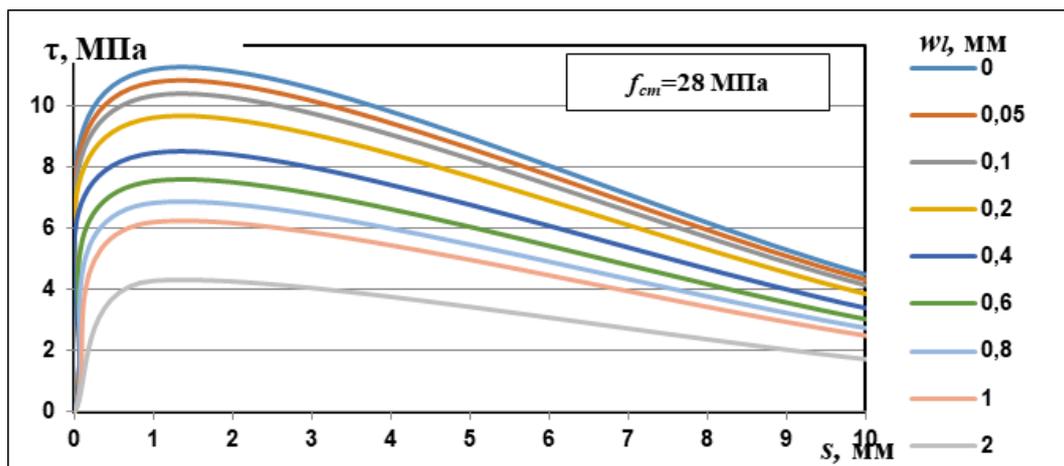


Рисунок 3. – Диаграмма деформирования « $\tau$ - $s$ » для корродирующего стержня при соответствующей ширине раскрытия продольной коррозионной трещины

С использованием блочной модели (см. рисунок 4) проведены параметрические исследования железобетонных элементов из различных классов бетона с различными коэффициентами продольного армирования и отношением  $s/\phi$ . Как результат параметрических исследований были получены распределения относительных деформаций в арматурном стержне и растянутом бетоне по длине блока, выделенного трещинами (с учетом последовательного деления на блоки при возрастании нагрузки), для соответствующего уровня повреждения коррозией, выраженного потерей массы арматурного стержня, и определена ширина раскрытия трещин нормального отрыва с учетом степени коррозионного повреждения.

#### **Зависимость между средней шириной раскрытия трещины нормального отрыва и относительным прогибом**

Для вывода зависимости между средней шириной раскрытия трещин нормального отрыва и относительным прогибом конструктивного элемента были использованы теоретические положения блочной модели, в которую было включено дополнительное допущение о линейном распределении относительных деформаций и напряжений в арматурном стержне по длине участка между трещинами. Была получена аналитическая зависимость, связывающая среднюю ширину раскрытия трещин нормального отрыва и относительный прогиб элемента [9].

Было выполнено сравнение авторской модели с моделью, предложенной J.O. Kang и др. [10]. Сравнение производили, основываясь на результатах параметров статистической оценки ошибки моделирования в соответствии с Приложением D ТКП EN 1990 [5], на фоне собственной базы опытных данных, сформированной из 17 результатов испытаний балок. Результаты сравнения статистических параметров ошибки моделирования представлены в таблице 3 и на рисунке 5.

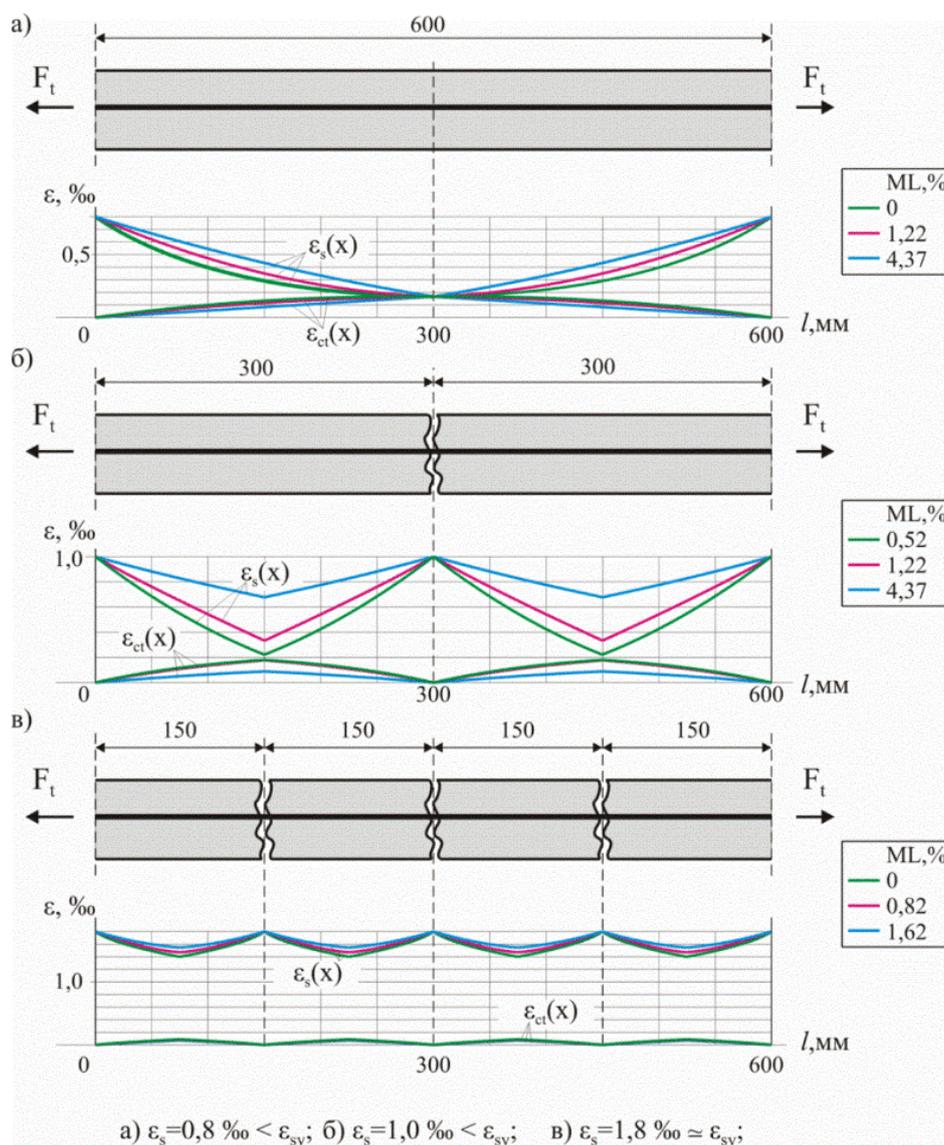


Рисунок 4. – График распределения относительных деформаций по длине арматурного стержня  $\epsilon_s(x)$  и растянутого бетона  $\epsilon_{ct}(x)$  на очередных этапах нагружения конструкции и для различных уровней коррозионного повреждения, выраженного потерей массы арматурного стержня ( $ML, \%$ )

Как видно из представленного сравнения, статистические параметры достаточно близки, но авторская модель, обладая меньшей степенью неопределенности, более проста в применении. Для дальнейшего анализа по результатам оценивания была принята авторская модель, имеющая наименьший коэффициент вариации ошибки моделирования ( $V_\delta = 19,2\%$  при среднем  $b = 1,02$ ).

Таблица 3. – Сравнение статистических параметров (неопределенностей) расчетных моделей для определения параметров прогиба

Модель	Статистические параметры ошибки моделирования	
	b	$V_\delta, \%$
Авторская модель [9]	1,02	19,2
Kang и др.[10]	1,34	24,3

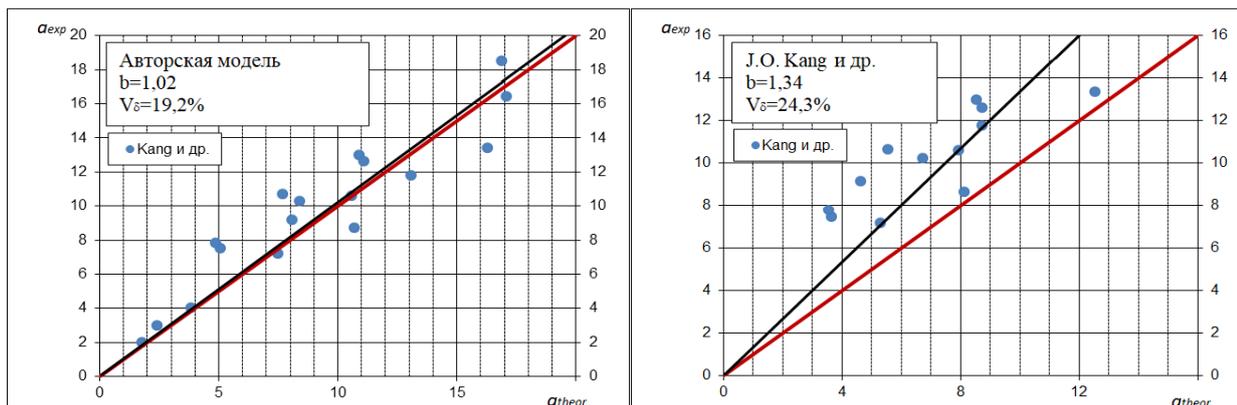


Рисунок 5. – Сравнение опытных и расчетных значений прогибов по авторской модели и модели, предложенной J.O. Kang и др. [10]

**Заключение.** По результатам выполненных параметрических исследований и анализа результатов опытных данных численно подтверждены логические связи между принятыми основными переменными. Так, очевидно, что наличие и ширина раскрытия трещин нормального отрыва, снижая изгибную жесткость балочного элемента, влияет на величину прогибов, а наличие продольных трещин коррозионного происхождения, оказывает влияние на характеристики сцепления арматуры с окружающим бетоном с одной стороны, а с другой – ширина раскрытия продольных коррозионных трещин позволяет косвенно судить об уровне коррозионного повреждения, выраженной в терминах потери массы арматурного стержня в результате развития коррозионного повреждения.

Работа выполнена в рамках гранта БРФФИ T23M-016 «Разработать и экспериментально апробировать методику предварительной оценки технического состояния существующих железобетонных конструкций, основанную на применении положений нечеткой логики».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Webster, M. P. The assessment of corrosion-damaged concrete structures : Thesis ... Doctor of Philosophy / M. P. Webster. – Birmingham, 2000. – 318 p.
2. Lundgren, K. Bond between ribbed bars and concrete. Part 2 : The effect of corrosion / K. Lundgren // Magazine of Concrete Research. – 2015. – Vol. 57 (7). – P. 383–395.
3. Rodriguez, J. Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures : Corrosion and bond deterioration / J. Rodriguez, L. M. Ortega, J. Casal // Concrete across borders. – Odense : Kongres Bureau Fyn, 1994. – P. 315–326.
4. Alonso, C. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion / C. Alonso, C. Andrade, J. Rodriguez, J. M. Diez // Materials and Structures. – 1998. – Vol. 31. – P. 435–441.
5. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций = Еурокод. Асновы праектавання будаўнічых канструкцый : ТКП EN 1990-2011 (02250) (EN 1990:2002, IDT) (с изм.). – Введ. 01.07.12. – Минск : Стройтехнорм, 2012. – 86 с.
6. Andrade, C. Cover cracking as a function of bar corrosion : Part I - Experimental test / C. Andrade, C. Alonso, F. J. Molina // Materials and structures. – 1993. – № 26. – P. 453–464.
7. Coronelli, D. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines / D. Coronelli, P. Gambarova // Journal of Structural Engineering. – 2004. – Vol. 130, № 8. – P. 1214–1224.
8. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. – Lausanne, 2013. – 402 p.
9. Яловая, Ю. С. Зависимость между шириной раскрытия трещин нормального отрыва и прогибом в железобетонных балках / Ю. С. Яловая, В. В. Тур // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 г. / Курский государственный университет; под ред. проф. С.И. Меркулова. – ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 201–208.
10. Kang, J. O. Correlation between crack widths and deflection in reinforced concrete beams / J. O. Kang, K. S. Kim, D. H. Lee, S. B. Lee // Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection. – 2010. – Vol. 14. – P. 184–192.