

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,
УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫМ ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ**

**RELIABILITY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES,
STRENGTHENING BY EXTERNAL REINFORCEMENT WITH CARBON FIBER**

А.Г. ТАМРАЗЯН, Н.В. ФЕДОРОВА
A.G. TAMRAZYAN, N.V. FEDOROVA

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Юго-Западный государственный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Southwest State University)
E-mail: tamrazian@mail.ru, klynavit@yandex.ru

В статье представлен расчет надежности железобетонных балок, усиленных углепластиковым внешним армированием.

Такая модель основана на учете статистического характера нагрузок, прочности материалов, свойств конструкций и позволяет определить вероятностные условия безотказной работы или отказа конструкций, из анализа которых получают оценки их надежности.

The article presents a calculation of the reliability of reinforced concrete beams for such buildings, carbon-fiber-reinforced outer reinforcement.

This model is based on taking into account the statistical nature of the load, strength of materials, structures and properties to determine the probability of failure-free conditions or failure of structures, of which the analysis produced estimates of their reliability.

Ключевые слова: железобетонная балка, усиление, углепластик, надежность.

Keywords: reinforced concrete beam, strengthening, carbon fiber, reliability.

В связи с большой пожарной нагрузкой, характерной для зданий текстильной промышленности и износом основных несущих конструкций перекрытий (срок эксплуатации более 50 лет) их усиление является важной научно-технической проблемой, актуальность которой нарастает в настоящее время. Особенность этой отрасли строительства в последние годы – появление, исследование и активное внедрение в практику усиления конструкций новых современных материалов, имеющих высокие прочностные и эксплуатационные свойства.

Одними из таких материалов являются композитные материалы на основе углеродного волокна, предназначенные для по-

вышения прочности железобетонных, бетонных, кирпичных, каменных и армокаменных конструкций.

В основу расчета положена методика оценки надежности и безопасности строительных конструкций, разработанная в [2...5], а также [7], [8]. Особенности проявления свойств материалов при огневых воздействиях могут быть учтены по [9].

В связи со сложностью последовательного стохастического анализа поведения железобетонных конструкций, усиленных углепластиком, для получения оценок их надежности будем использовать подстановку вероятностных параметров в детерминистические решения прочности таких железобетонных конструкций.

При этом принимается во внимание, что большинство случайных аргументов резерва несущей способности железобетонных балок может обоснованно описываться нормальным законом (распределением Гаусса), в частности, прочность бетона, арматуры, углепластика, а также ряд нагрузок (постоянные, технологические, крановые и т.д.).

При общей постановке задачи условие безотказной работы (неразрушимости) конструкций, в том числе железобетонных балок, записывается в следующем виде:

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{S}(t) \geq 0, \quad (1)$$

где $\tilde{R}(t)$ – обобщенная несущая способность конструкций; $\tilde{S}(t)$ – обобщенная нагрузка на конструкцию; $\tilde{Y}(t)$ – характеристика, названная нами резервом несущей способности конструкции.

Оценками надежности конструкций являются вероятность безотказной работы $P(t)$ или вероятность отказа работы конструкции $Q(t)$:

$$P(t) = P(Y \geq 0); \quad Q(t) = 1 - P(t). \quad (2)$$

Представление параметров условия (1) в виде случайных величин уместно при действии нагрузок, мало изменяющихся со временем (постоянных и некоторых технологических) или имеющих однократный характер, при вычислении надежности в начальный или конкретно выбранный момент времени. Такой подход используется также в задачах сравнительной оценки надежности конструкций.

Если функция является линейной или может без заметной погрешности быть линеаризована, ее распределение будет нормальным при условии нормальности распределений аргументов функции. Тогда вычисление оценок надежности выполняется с использованием функции Лапласа $\Phi(\beta)$ [1]:

$$Q(Y < 0) = 0,5 - \Phi(\beta), \quad (3)$$

$$P(Y \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta).$$

За основу принимается расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси железобетонных балок с одиночным армированием и усиленных углепластиком.

Случайное значение предельного изгибающего момента, воспринимаемого балкой [6]:

$$\tilde{M}_{ult} = f(\tilde{\sigma}_b, \tilde{\sigma}_s) = \tilde{\sigma}_s A_s (h_0 - 0,5\tilde{x}), \quad (4)$$

где $\tilde{\sigma}_b$ – случайное значение сопротивления бетона сжатию для предельных состояний первой группы; $\tilde{\sigma}_s$ – случайное значение прочности стержневой арматуры растяжению; A_s – площадь сечения растянутой стержневой арматуры; h_0 – расчетная высота сечения; x – высота сжатой зоны бетона, равная $\tilde{x} = \frac{\tilde{\sigma}_s A_s}{\tilde{\sigma}_b b}$, где b – ширина сечения.

Подставляем выражение для x в формулу (4):

$$\tilde{M}_{ult} = \tilde{\sigma}_s A_s h_0 - 0,5 \frac{(\tilde{\sigma}_s A_s)^2}{\tilde{\sigma}_b b}. \quad (5)$$

Учитывая общее выражение (5), имеем для математического ожидания предельного момента:

$$\bar{M}_{ult} = \bar{\sigma}_s A_s h_0 - 0,5 \frac{(\bar{\sigma}_s A_s)^2}{\bar{\sigma}_b b}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_b$ – соответственно математическое ожидание сопротивления бетона и прочности арматуры.

Определим коэффициенты для вычисления стандарта предельного момента:

$$D_s = \frac{\partial M_{ult}}{\partial \sigma_s} = A_s h_0 - \frac{\sigma_s A_s^2}{\sigma_b b} = \frac{A_s}{\sigma_b b} (\sigma_b h_0 b - \sigma_s A_s), \quad (7)$$

$$D_b = \frac{\partial M_{ult}}{\partial \sigma_b} = \frac{0,5}{\sigma_b^2 b} (\sigma_s A_s)^2. \quad (8)$$

Стандарт предельного изгибающего момента определяется так:

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(D_b \hat{\sigma}_b)^2 + (D_s \hat{\sigma}_s)^2}. \quad (9)$$

Для оценки надежности балок определяем характеристику безопасности, имеющую в данном случае следующий вид:

$$\beta = \frac{\bar{M}_{ult} - M_{cal}}{\hat{M}_{ult}}, \quad (10)$$

где M_{cal} – расчетное значение внешнего изгибающего момента в балке.

Случайное значение предельного изгибающего момента, воспринимаемого усиленной балкой:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{ult} &= f(\tilde{\sigma}_b, \tilde{\sigma}_s, \tilde{\sigma}_{fu}) = \\ &= \tilde{\sigma}_{fu} A_f (h - 0,5\tilde{x}) + \tilde{\sigma}_s A_s (h_0 - 0,5\tilde{x}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\tilde{\sigma}_{fu}$ – случайное значение прочности на растяжение СВА (углепластика – системы

внешнего армирования); A_f – площадь сечения арматуры СВА; h – высота сечения; x – высота сжатой зоны бетона, равная

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{\sigma}_{fu} A_f + \tilde{\sigma}_s A_s}{\tilde{\sigma}_b b}.$$

Расчетная схема усиливаемого сечения балки показана на рис. 1.

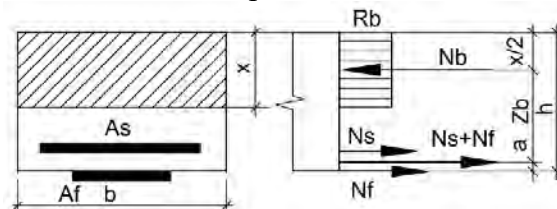


Рис. 1

Подставляем выражение для x в формулу (11):

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{ult} &= \tilde{\sigma}_{fu} A_f \left(h - 0,5 \frac{\tilde{\sigma}_{fu} A_f + \tilde{\sigma}_s A_s}{\tilde{\sigma}_b b} \right) + \tilde{\sigma}_s A_s \left(h_0 - 0,5 \frac{\tilde{\sigma}_{fu} A_f + \tilde{\sigma}_s A_s}{\tilde{\sigma}_b b} \right) = \\ &= \tilde{\sigma}_{fu} A_f h + \tilde{\sigma}_s A_s h_0 - \frac{0,5}{\tilde{\sigma}_b b} (\tilde{\sigma}_{fu} A_f + \tilde{\sigma}_s A_s)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Математическое ожидание предельного момента получаем, подставляя в полученное выражение математические ожидания случайных аргументов.

Определим коэффициенты для вычисления стандарта предельного момента:

$$D_{fu} = \frac{\partial M_{ult}}{\partial \sigma_{fu}} = \frac{A_f}{\sigma_b b} [\sigma_b h b - (\sigma_{fu} A_f + \sigma_s A_s)], \quad (13)$$

$$D_s = \frac{\partial M_{ult}}{\partial \sigma_s} = \frac{A_s}{\sigma_b b} [\sigma_b h_0 b - (\sigma_{fu} A_f + \sigma_s A)], \quad (14)$$

$$D_b = \frac{\partial M_{ult}}{\partial \sigma_b} = \frac{0,5}{\sigma_b^2 b} (\sigma_{fu} A_f + \sigma_s A_s)^2. \quad (15)$$

Числовые значения коэффициентов находим, подставляя в полученные выражения математические ожидания случайных аргументов.

Стандарт предельного изгибающего момента определяется следующим образом;

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(D_b \hat{\sigma}_b)^2 + (D_s \hat{\sigma}_s)^2 + (D_{fu} \hat{\sigma}_{fu})^2}. \quad (16)$$

Оценка надежности балки с одиночным армированием

Балка имеет сечение размерами $b=300$ мм, $h = 800$ мм, $a = 70$ мм; растянутая арматура А400 ($R_s=355$ МПа); площадь ее сечения $A_s = 2945$ мм² = 29,45 см² (6Ø25); бетон класса В25 ($R_b=14,5$ МПа); расчетный внешний изгибающий момент $M_{cal} = 650$ кН·м.

По приведенным расчетным характеристикам материалов определяем их статистические характеристики:

- бетон В25
- $\bar{\sigma}_b = 1,282R_b = 1,282 \cdot 14,5 = 18,59$ МПа = 1,86 кН/см²;
- $\hat{\sigma}_b = 0,135 \bar{\sigma}_b = 0,135 \cdot 18,59 = 2,51$ МПа = 0,25 кН/см².
- арматура А400
- $\bar{\sigma}_s = 420$ МПа = 42,0 кН/см², коэффициент вариации $V_s = 0,0436$,
- $\hat{\sigma}_s = 0,0436 \cdot 420 = 18,31$ МПа = 1,83 кН/см².

По формуле (6) вычисляем математическое ожидание предельного момента:

$$\bar{M}_{ult} = 42,0 \cdot 29,45 \cdot 73 - \frac{0,5}{1,86 \cdot 30} (42,0 \cdot 29,45)^2 = 90293,7 - 13709,0 = 76584,7 \text{ кН} \cdot \text{см} = 756,85 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По формулам (7) и (8) определяем коэффициенты для вычисления стандарта предельного момента:

$$D_s = \frac{29,45}{1,86 \cdot 30} (1,86 \cdot 73 \cdot 30 - 42 \cdot 29,45) = 1497,0 \text{ см}^3,$$

$$D_b = \frac{0,5}{1,86^2 \cdot 30} (42 \cdot 29,45)^2 = 7370,4 \text{ см}^3.$$

По формуле (9) определяем стандарт предельного момента:

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(1497 \cdot 1,83)^2 + (7370,4 \cdot 0,25)^2} = 3301,5 \text{ кН} \cdot \text{см} = 33,02 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По отношению к расчетному значению внешнего изгибающего момента в балке вычисляем характеристику безопасности по (10):

$$\beta = \frac{765,85 - 650}{33,02} = 3,51.$$

Вероятность отказа балки составит $Q(\beta) = 2,26 \cdot 10^{-4}$.

Оценка надежности балки с усилением СВА

Исходные данные – те же. Усиление – 1 слой углеродной ткани шириной 300 мм, площадь сечения усиления $A_f = 52,5 \text{ мм}^2 = 0,525 \text{ см}^2$. Расчетная прочность углепластика $R_{fu} = 1033 \text{ МПа}$.

Определим числовые характеристики прочности углепластика. Примем ориентировочно коэффициент вариации $V_{fu} = 8\% = 0,08$ и ту же обеспеченность расчетной прочности 95% (на расстоянии 1,64 стандарта от математического ожидания).

$$R_{fu} = \bar{R}_{fu} - 1,64 \cdot 0,08 \cdot \bar{R}_{fu} = 0,869 \bar{R}_{fu},$$

$$\bar{R}_{fu} = \frac{R_{fu}}{0,869} = 1,151 R_{fu} = 1,151 \cdot 1033 = 1188,7 \text{ МПа} = 118,9 \text{ кН/см}^2,$$

$$\hat{R}_{fu} = 0,08 \cdot 1188,7 = 95,1 \text{ МПа} = 9,51 \text{ кН/см}^2.$$

По формуле (12) вычисляем математическое ожидание предельного момента:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{ult} &= 118,9 \cdot 0,525 \cdot 80 + 42,0 \cdot 29,45 \cdot 73 - \frac{0,5}{1,86 \cdot 30} (118,9 \cdot 0,525 + 42,0 \cdot 29,45)^2 = \\ &= 4993,8 + 90293,7 - 15127,70 = 80160 \text{ кН} \cdot \text{см} = 801,6 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

По формулам (13), (14) и (15) определяем коэффициенты для вычисления стандарта предельного момента:

$$D_{fu} = \frac{0,525}{1,86 \cdot 30} (1,86 \cdot 80 \cdot 30 - 118,9 \cdot 0,525 - 42 \cdot 29,45) = 29,78 \text{ см}^3,$$

$$D_s = \frac{29,45}{1,86 \cdot 30} (1,86 \cdot 73 \cdot 30 - 118,9 \cdot 0,525 - 42 \cdot 29,45) = 1464,1 \text{ см}^3,$$

$$D_b = \frac{0,5}{1,86^2 \cdot 30} (118,9 \cdot 0,525 + 42 \cdot 29,45)^2 = 8132,8 \text{ см}^3.$$

По формуле (16) определяем стандарт предельного момента:

$$\hat{M}_{ult} = \sqrt{(29,78 \cdot 9,51)^2 + (1464,1 \cdot 1,83)^2 + (8132,8 \cdot 0,25)^2} = 3375,3 \text{ кН} \cdot \text{см} = 33,75 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По отношению к расчетному значению внешнего изгибающего момента в балке вычисляем характеристику безопасности:

$$\beta = \frac{801,6 - 650}{33,75} = 4,49.$$

Вероятность отказа балки:

$$Q(\beta) = 3,4 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, усиление балки углепластиковым армированием существенно (на два порядка) повысило надежность балки.

ВЫВОДЫ

1. Разработана вероятностная модель для оценки надежности, усиленных системой внешнего армирования (СВА) углепластиком.

2. Полученная модель апробирована на тестовых примерах для оценки надежности балочных железобетонных конструкций, усиленных углепластиковым внешним армированием, которая показала существенное повышение надежности усиленных СВА конструкций по сравнению с их вариантом без усиления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2001.
2. *Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P.* On strength reserve assessment for prismatic folded plate roof structures. *Applied Mechanics and Materials.* – Vol.725-726, 2014. P. 922...927.
3. *Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M.* Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state // *Procedia Engineering.* – V. 177. Issue 1, 2015. P. 179...185.
4. *Пичугин С.Ф.* Надежность стальных конструкций производственных зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2011.
5. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.

6. СНиП 52-101–2003. Бетонные и железобетонные конструкции. – М., 2011.

7. *Тамразян А.Г., Орлова М.А.* К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами // *Жилищное строительство.* – 2015, № 6. С. 32...34.

8. *Тамразян А.Г., Звонов Ю.Н.* К оценке надежности изгибаемых железобетонных плит при огневых воздействиях // *Научное обозрение.* – 2015. № 14. С. 130...133.

9. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Estimation of load bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in fire conditions // *Applied Mechanics and Materials.* – V. 638-640, 2014. P. 62...65.

REFERENCES

1. *Ventcel' E.S.* Teorija verojatnostej. – M.: Vysshaja shkola, 2001.
2. *Kolchunov V., Osovskih E., Afonin P.* On strength reserve assessment for prismatic folded plate roof structures. *Applied Mechanics and Materials.* – Vol. 725-726, 2014. P.922...927.
3. *Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M.* Criterion of crack resistance of corrosion damaged concrete in plane stress state // *Procedia Engineering.* – V. 177. Issue 1, 2015. P. 179...185.
4. *Pichugin S.F.* Nadezhnost' stal'nyh konstrukcij proizvodstvennyh zdaniy. – M.: Izd-vo ASV, 2011.
5. *Rzhanicyn A.R.* Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost'. – M.: Strojizdat, 1978.
6. СНиП 52-101–2003. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. – M., 2011.
7. *Tamrazjan A.G., Orlova M.A.* K ostatochnoj nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh balok s tre-shhinami // *Zhilishhnoe stroitel'stvo.* – 2015, № 6. S.32...34.
8. *Tamrazjan A.G., Zvonov Ju.N.* K ocnke nadezhnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh plit pri ognevyyh vozdejstvijah // *Nauchnoe obozrenie.* – 2015. № 14. S.130...133.
9. *Tamrazyan A., Avetisyan L.* Estimation of load bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in fire conditions // *Applied Mechanics and Materials.* – V. 638-640, 2014. P. 62...65.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИ МГСУ. Поступила 10.10.16.