

КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КОРРОЗИОННО ПОВРЕЖДАЕМОГО БЕТОНА ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Н.В. КЛЮЕВА, *д-р техн. наук, проф., советник РААСН,*
Н.Б. АНДРОСОВА, *канд. техн. наук, доцент,*
М.С. ГУБАНОВА, *аспирант*
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет»
305040 г. Курск ул. 50 лет Октября 94, yz_swsu@mail.ru

Введя гипотезу кольматационного преобразования структуры бетона при коррозионных повреждениях со стабилизацией на некоторой предельной глубине повреждения авторы построили критерий прочности такого бетона при сложном напряженном состоянии. В системе координат главных нормальных напряжений этот критерий описывает поверхность эллипсоида, характерные размеры которого в первую очередь зависят от кинетики коррозионных процессов во времени и глубины нейтрализации. Предложенный критерий может быть использован при решении задач живучести железобетонных конструктивных систем в условиях одновременного проявления силовых и средовых воздействий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коррозионные повреждения бетона, критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона, изменение предела прочности в агрессивных средах, глубина нейтрализации коррозионно поврежденного бетона.

Разрушение коррозионно поврежденного железобетонного элемента статически неопределимой системы возможно как по нормальному, так и по наклонному сечению в приопорной зоне. Учет ресурса силового сопротивления и прочности поврежденной коррозией сжатого бетона в этих зонах одна из важных составляющих оценки живучести строительных конструкций. [1-3]. Коррозионные повреждения в зависимости от особенностей физических или химических воздействий, состава бетона, а также уровня напряженного состояния (σ/R_b) могут по-разному развиваться во времени и по глубине поражения [4]:

1. Энтропийно, затухая во времени, со стабилизацией на некоторой критической (предельной) глубине повреждения (глубине нейтрализации) $\delta_{кр}$ с кольматационным преобразованием структуры бетона;

2. Линейно, с постоянной скоростью продвижения фронта повреждения, без стабилизации, для которых величина $\delta_{кр}$ меняет первоначальный смысл и становится неким эмпирическим параметром процесса повреждений;

3. Лавинно, интенсифицируясь во времени, с неизбежным разрушением материалов и сооружений.

В работе рассмотрим первый вариант коррозионного повреждения с кольматационным преобразованием структуры бетона.

Существует достаточно выраженная закономерность влияния времени воздействия конкретной агрессивной среды на прочность сжатого бетона. Испытания бетонных кубов и призм показали, что при длительном действии диффузии агрессивной среды происходит изменение свойств бетона и соответственно изменяется глубина нейтрализации бетона.

Используя экспериментальные данные [5] проанализируем изменение призмной прочности (R_b^*) от времени ($t = 28$ суток до $t = 720$ суток) воздействия агрессивной среды (рис. 1, штриховая линия), построим аппроксимирующую зависимость в виде совокупности двух участков: линейного и параболического (см. рис. 1, сплошная линия):

$$\begin{cases} R_b^*(t) = C(t - 28) + R_b^*(28), & 28 \leq t \leq 180; \\ R_b^*(t) = C(t - 180)^{2/3} + R_b^*(180), & t > 180, \end{cases} \quad (1)$$

где C – коэффициент, определяемый из регрессии общего вида (для линейного участка $C = 0.015$, для параболического $C = -0.097$).

Отклонение опытных данных от значений, рассчитанных по выбранным математическим зависимостям, составила: 0,056% для линейного участка и -0,641%; -0,297%; 0,788% для параболы, соответственно в точках $t = 360, 540$ и 720 суток.

В связи с отсутствием экспериментальных данных о предельных значениях прочности бетона на растяжение в условиях агрессивной среды во времени вычислим эти значения по предельной прочности бетона на сжатие из аппроксимирующей зависимости $R_{bt}(R_b)$ по данным приведенным в СП [6, табл. 6.7]:

$$R_{bt}(R_b) = C \cdot R_b^{2/3} = 0,223 \cdot R_b^{2/3}. \quad (2)$$

Погрешность такой аппроксимации составляет: -0,522%; -0,271%; -0,469%; -0,636%; -0,05% соответственно в точках $t = 28, 180, 360, 540, 720$ суток.

Вычисленные по полученной зависимости значения предельной прочности бетона на растяжение ($R_{bt}^*(t)$) приведены в табл. 1. Графики изменения прочности бетона на растяжение во времени построены по данным табл. 1 и аппроксимированы с помощью регрессионных зависимостей (1) при значениях $C = 9,2105 \cdot 10^{-5}$ – для линейного участка и $C = -2,785 \cdot 10^{-3}$ для параболы приведены в нижней половине на рис. 1.

Таблица 1. Экспериментальные значения призмной прочности коррозионно повреждаемого бетона (R_b^*) и прочности бетона на растяжение вычисленного по аппроксимирующей зависимости (2)

Среда	t , сут	R^* , МПа	R_b^* , МПа	R_{bt}^* , МПа
Воздух	28	40,2	33,4	2,313
	180	42,4	35,7	2,327
1%-ный раствор HCl	360	37,3	32,4	2,266
	540	34,2	30,7	2,186
	720	33,6	29,5	2,129

Отклонение опытных данных от значений рассчитанных по выбранным математическим зависимостям составила: $1,719 \cdot 10^{-6}$ % для линейного участка и 1,226%; $-2,855 \cdot 10^{-3}$ %; -0,626% для параболы, соответственно в точках $t = 360, 540$ и 720 суток.

Определение глубины нейтрализации коррозионно повреждаемого бетона при первом варианте повреждения может быть выполнено с использованием известных экспериментальных зависимостей, например, с помощью степенной функции вида [5]:

$$\delta = k \cdot t^m, \quad (3)$$

где k, m – коэффициенты конкретной агрессивной среды к определенному классу бетона, являющиеся экспериментальными величинами. Так, применительно к рассматриваемому случаю значения этих коэффициентов по экспериментальным данным [5] составило $k = 0,033; m = 0,634$. С использованием этих коэффициентов построен график изменения глубины нейтрализации бетона во времени под действием агрессивной среды (рис. 2, кривая 1). Здесь же приведена кривая 2 построенная по опытным данным [5]. Погрешность аппроксимации опытных данных аналитической зависимости (3) в точках $t = 180, 360, 540$ и 720 суток соответственно составила 1,346%; 1,58%; 3,688%; 7,032%. В табл. 2 приведены значения глубины нейтрализации, пределов прочности при одноосном сжатии

$(R_b^*(t))$ и растяжении $(R_{bt}^*(t))$ коррозионно поврежденного бетона класса В40 (кубиковая прочность 40,2 МПа) в зависимости от времени воздействия t агрессивной среды.

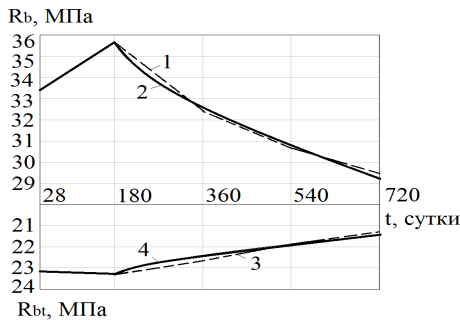


Рис. 1. Графики изменения призмочной прочности $R_b^*(t)$ и прочности на растяжение $R_{bt}^*(t)$ бетона, подверженного коррозии в растворе соляной кислоты во времени (1 и 3 - опытные данные, 2 и 4 - аппроксимирующая кривая)

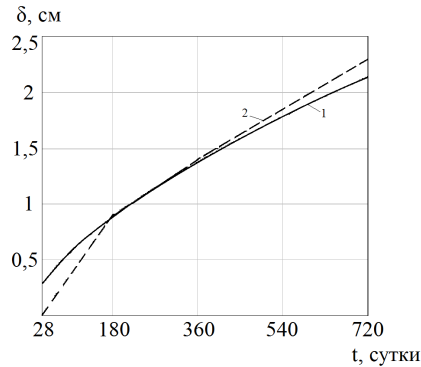


Рис. 2. Расчетные (1) и опытные (2) зависимости глубины нейтрализации бетона во времени

Таблица 2. Значения R_b^* , R_{bt}^* и δ от времени воздействия агрессивной среды

Время воздействия агрессивной среды t , суток	28	720	1440	2160	2749
R_b^* , МПа	33,4	29,268	24,384	20,405	17,505
R_{bt}^* , МПа	2,313	2,142	2,002	1,888	1,805
δ , см	0,19	2,256	3,318	4,291	5

Имея аналитические выражения для оценки глубины нейтрализации коррозионно поврежденного бетона можно сформулировать критерий его прочности во времени при таких повреждениях.

Для общего случая трехосного напряженного состояния критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона в системе главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ может быть представлен в виде эллипсоида вращения:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1) - (R_b^*(t) - R_{bt}^*(t)) \times (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - R_b^*(t) \cdot R_{bt}^*(t) = 0. \quad (4)$$

При плоском напряженном состоянии ($\sigma_3 = 0$) прочность коррозионно повреждаемого бетона определяется эллиптическими кривыми (рис. 3):

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - (R_b^*(t) - R_{bt}^*(t)) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) - R_b^*(t) \cdot R_{bt}^*(t) = 0, \quad (5)$$

где $R_b^*(t)$, $R_{bt}^*(t)$ - предел прочности коррозионно повреждаемого бетона при одноосном сжатии и одноосном растяжении соответственно. В дальнейшем для краткости будем пользоваться обозначениями R_b и R_{bt} .

Проанализируем некоторые характерные точки графиков критерия прочности коррозионно повреждаемого бетона при плоском напряженном состоянии:

а) при $\sigma_2 = 0$:

$$\sigma_1 = \frac{(R_b - R_{bt})}{2} \pm \sqrt{\frac{(R_b - R_{bt})^2}{4} + R_b \cdot R_{bt}}, \quad (6)$$

$$\sigma_1^2 - (R_b - R_{bt}) \cdot \sigma_1 - R_b \cdot R_{bt} = 0, \quad \sigma_1^{(1)} = R_b; \quad \sigma_1^{(2)} = -R_{bt},$$

что соответствует точкам B и B' .

б) При $\sigma_1 = \sigma_2 = p$ - двухосное равномерное сжатие и растяжение:

$$p = \frac{2}{3}(R_b - R_{bt}) \pm \sqrt{\frac{4(R_b - R_{bt})^2}{9} + \frac{2}{3}R_b \cdot R_{bt}}. \quad (7)$$

Значения $p^{(1)}$ и $p^{(2)}$ соответствует точкам A и A' . При $t = 28$ суток $p^{(1)} = 42,657$ МПа, $p^{(2)} = -1,207$ МПа.

в) При $\sigma_1 = -\sigma_2 = f$ - случай чистого сдвига,

$$f = \sqrt{\frac{R_b \cdot R_{bt}}{2,5}}, \quad (8)$$

что соответствует точке C . При $t = 28$ суток $f = 5,559$ МПа.

г) Экстремальные значения σ_1 , следующие из условия $d\sigma_1/d\sigma_2 = 0$, отвечают значениям:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{4} + \frac{(R_b - R_{bt})}{2}$$

и

$$\sigma_{1\min}^{\max} = \frac{2}{3}(R_b - R_{bt}) \pm 4\sqrt{\frac{2(R_b - R_{bt})^2}{45} + \frac{1}{15}R_b \cdot R_{bt}}. \quad (9)$$

При $t = 28$ суток $\sigma_{1\max} = 48,467$ МПа, $\sigma_{1\min} = -7,017$ МПа.

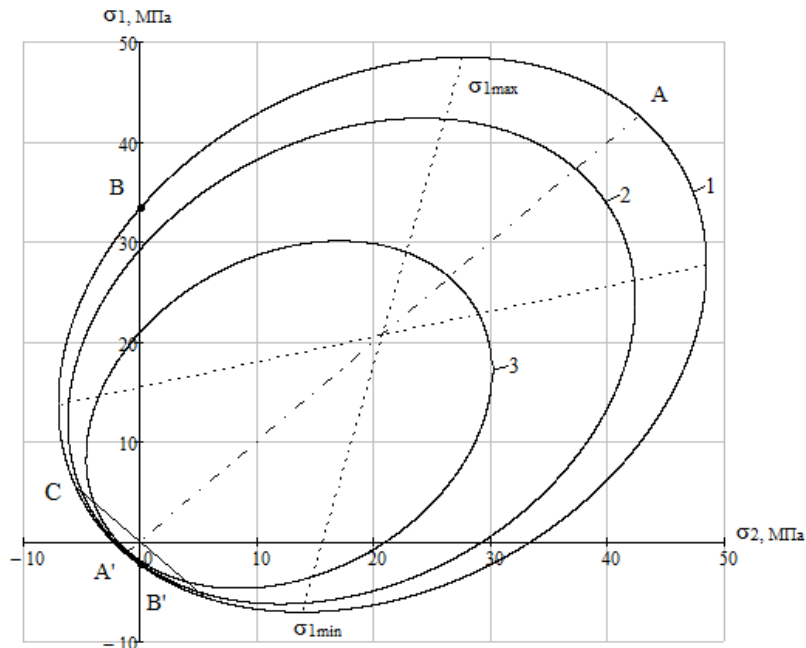


Рис. 3. График критерия прочности коррозионно поврежденного бетона при плоском напряженном состоянии 1 - $t = 28$ суток, 2 - $t = 720$ суток, 3 - $t = 2749$ суток

Из приведенного анализа следует, что увеличению времени коррозионного воздействия до предельного значения глубины нейтрализации происходит уменьшение предельной поверхности - эллипсоида вращения, соответствующего критерию прочности при плоском напряженном состоянии.

Ресурс силового сопротивления и прочность бетонного элемента системы зависят от коррозионных повреждений, энтропийно затухая во времени со стабилизацией на некоторой критической глубине повреждения с кольматационным преобразованием структуры бетона. Как показывает многочисленные натурные и лабораторные исследования, глубина разрушения бетона незначительна в сравнении с глубиной нейтрализации за один и тот же период. Наиболее объективной количественной характеристикой коррозионного процесса бетона будем считать глубину нейтрализации δ бетона агрессивным веществом за определенный период времени.

Л и т е р а т у р а

1. *Stefan Szyniszewski, Ted Krauthammer*. Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings // *Engineering Structures*. – 2012. – Vol. 42. – P. 142-153.
2. *Jun Li, Hong Hao*. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique // *Engineering Structures*. – 2013. – Vol. 52, July. – P. 101–113.
3. *Клюева Н.В.* Общий критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при плоском напряженном состоянии [Текст] / Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2009. – №3. – С. 2-5.
4. *Бондаренко В.М.* Феноменология кинетики повреждений железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде [Текст] / В.М. Бондаренко // *Бетон и железобетон*. – 2008. – №2. – С. 25-27.
5. *Попеско А.И.* Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии [Текст] / А.И. Попеско. – СПб: СПб гос. архит.-строит. ун-т, 1996. – 182 с.
6. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

References

1. *Szyniszewski, Stefan, Krauthammer, Ted* (2012). Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*. Vol. 42, p. 142-153.
2. *Jun, Li, Hong, Hao* (2013). Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique. *Engineering Structures*. Vol. 52, July, p. 101–113.
3. *Klyueva, NV, Androsova, NB* (2009). Obshchiy kriteriy prochnosti korrozionno povrezhdaemogo betona pri ploskom napryazhennom sostoyanii. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. №3, p. 2-5.
4. *Bondarenko, VM* (2008). Fenomenologiya kinetiki povrezhdeniy zhelezobetonnykh konstruktсий, ekspluatiruyushchikhsya v agressivnoy srede. *Beton i Zhelezobeton*. №2, p. 25-27.
5. *Popesko AI* (1996). Rabotosposobnost zhelezobetonnykh konstruktсий, podverzhennykh korrozii. SPb: SPb Gos. Arkhit.-Stroit. Un-t, 182 p.
6. *SP 63.13330.2012* «Betonnnye i zhelezobetonnye konstruktсий. Osnovnye polozheniya».

STRENGTH CRITERIA FOR CONCRETE WITH CORROSION DAMAGE IN COMPLEX STRESS STATE

N.V. Klyueva, N.B. Androsova, M.S. Gubanova

FGBOU VPO "Yugo-Zapadny Gosudarstvenniy Universitet", Kursk

Introducing the hypothesis of colmatation conversion of concrete structure with corrosion damage with stabilization at any ultimate depth of damage, the authors have built a strength criterion of the concrete under complex stress state. In the coordinate system of the principal normal stresses, this criterion describes the surface of the ellipsoid, the characteristic dimensions of which are primarily dependent on the kinetics of corrosion processes in time and depth of neutralization. The presented criterion can be used for solution of problems of the survivability of reinforced concrete structural systems under conditions of simultaneous manifestation of power and environmental impacts.

KEY WORDS: corrosion damage of concrete, strength criterion of corrosion damages of concrete, tensile strength change in hostile environments, the depth of neutralization of corrosion damaged concrete.