

МЕТОД РАСЧЕТА ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИЗГИБЕ

П.К. КУЗЬМИН, инженер

ООО «Промтехэкспертиза», e-mail: KuzminPK@mail.ru

В статье изложен новый метод расчета ширины раскрытия трещин в нормальных сечениях железобетонных конструкций при изгибе по деформационной модели. Приводятся данные экспериментального обоснования достоверности расчетных формул.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трещиностойкость, трещина, ширина трещины, деформационная модель, железобетонная конструкция.

Существующие методы расчета

Анализ существующих методик расчета и расчетных формул ширины раскрытия трещин выполнен в монографии В.Н. Бондаренко и В.И. Колчунова [1]. Все подходы к решению задачи и результаты, полученные авторами, разделены на 4 группы.

Первую группу составляет большинство работ, использующих исходные условия, изложенные в теории В.И. Мурашова, по которым ширина раскрытия трещин определяется как разность удлинения арматуры на участке между трещинами минус деформация бетона. К этой группе относятся работы Я.Н. Немировского, Г.А. Молодченко, Томаса, Баха. При допущении прямоугольной эпюры напряжений бетона между трещинами формула ширины раскрытия трещины имеет вид:

$$a_{crc} = \frac{\sigma_s}{E_s} l_{crc} \left(1 - \omega_1 \frac{R_{bt}}{\sigma_s} \frac{1 + \alpha_s \mu_s}{\mu_s} \right), \quad (1)$$

ω_1 - эпюра полноты растягивающих напряжений, изменяется в пределах от 0,5 до 0,7.

Вторую группу составляют эмпирические формулы, построенные по результатам экспериментальных исследований. Здесь известны работы Н.И. Мулина и Ю.П. Гуци, О.Я. Берга, Ватштейна.

Исследования, выполненные в НИИЖБе, показали, что основными параметрами, влияющими на ширину раскрытия трещины, являются напряжения в растянутой арматуре, ее диаметр, процент армирования, толщина защитного слоя. Принятая в нормах эмпирическая формула ширины раскрытия трещин имеет вид:

$$a_{crc} = \delta \varphi_e \eta \frac{\sigma_s}{E_s} 20 (5,5 - 100 \mu_s)^{\sqrt[5]{d}}, \quad (2)$$

где δ - коэффициент, учитывающий силовое воздействие; φ - коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки; η - коэффициент, учитывающий профиль рабочей арматуры. Недостатком эмпирических формул является ограничение области их применения только в случаях конструкций элементов, применительно к которым проведены исследования.

Представителями третьей группы являются работы О.Я. Берга.

Расчетная формула имеет вид:

$$a_{crc} = \frac{\sigma_s}{E_s} \psi_s \sqrt{R_r(\beta)}, \quad (3)$$

где β - это коэффициент, учитывающий степень сцепления арматуры с бетоном.

В качестве недостатка указывается «невозможность» одним коэффициентом β достоверно описать сложные процессы сцепления арматуры с бетоном.

К четвертой группе относятся исследования В.И. Колчунова, А.Н. Кузнецова, А.А. Оатул, Ш.А. Хакимова, в которых «раскрытие трещин рассматривается как накопление относительных смещений арматуры и бетона на участках между трещинами»:

$$a_{crc} = 2 \int_0^{0,5l_{crc}} \varepsilon_g(z) dz, \quad (4)$$

где ε_g относительное смещение бетона и арматуры. Общим недостатком формул перечисленных выше групп (за исключением эмпирических) является отсутствие экспериментального подтверждения точности решения в силу условности принятых гипотез.

Расчетная модель. Вывод формулы ширины раскрытия трещин.

За расчетное принимаем напряжение в арматуре, равное пределу упругости, обеспечивающее смыкание трещин, вызванных упругим последствием. Соответственно предельные деформации и напряжения в арматуре не должны превышать следующих величин:

$$\varepsilon_{0,015} = 150 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma_a = \varepsilon_{0,015} E_a = 3000 \text{ кг/см}^2. \quad (5)$$

При расчете плит на трещиностойкость максимальная ширина раскрытия трещин в фибровом сечении на нижней поверхности определяется из условия достижения в арматуре предельных деформаций, равных условному физическому пределу упругости: $\varepsilon_{0,02} = 200 \cdot 10^{-5}, \quad \sigma_a = \varepsilon_{0,02} E_s = 4000 \text{ кг/см}^2$.

За основу метода расчета принята деформационная модель, согласно которой деформации по высоте нормального сечения распределяются по линейному закону относительно нейтральной оси, эпюра распределения напряжений сжатой зоны - линейно-упругая, в растянутой - линейно-пластическая; пластические деформации рассматриваются как непрерывный процесс образования и накопления микроразрывов сплошности структуры растворно-цементной матрицы бетона.

За расчетное принимается напряженно-деформированное состояние нормально-го сечения с трещиной, при котором продольные деформации на поверхности сжатой зоны не превышают предельных значений при осевом сжатии ($\varepsilon_{сж} = \varepsilon_{0,2}$), а в растянутой - предельной растяжимости бетона (ε_p) будучи связанными зависимостями:

$$\varepsilon_p = \mu \cdot \varepsilon_{сж}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{0,2}^I = 200 \cdot 10^{-5}$ отн. ед ; $\varepsilon_p = 22 \cdot 10^{-5}$ отн. ед ; $\mu = 0,11$ – коэффициент Пуассона. На рис. 2 представлена фотография распределения полос интерференции в слое оптически активного покрытия, нанесенного на поверхность железобетонной балки в зоне чистого изгиба.

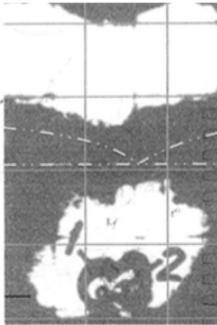


Рис. 2. Фотография полос интерференции

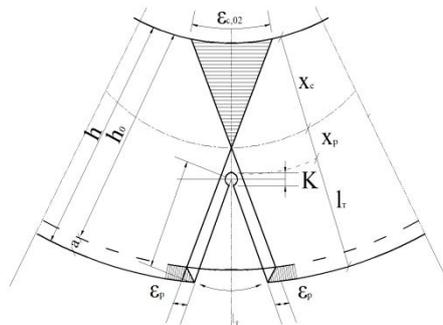


Рис. 3. Схема расчета ширины раскрытия трещины по деформационной модели

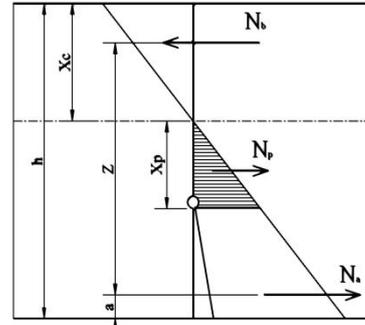


Рис. 4. Расчет прочности поперечного сечения с трещиной

В соответствии с рис. 2 величина концентратора деформаций в вершине трещины относительно к осевому растяжению принимается равной $K_p = 4$. Соответственно, предельная растяжимость бетона в вершине трещины равна:

$$\varepsilon_{p-k} = K_p \varepsilon_p^I = \varepsilon_{p0.04}. \quad (7)$$

Предельно допустимая ширина раскрытия трещины в случае чистого изгиба, если это не связано с эксплуатационными требованиями, определяется из условия достижения в арматуре, пересекающей трещину, деформаций, равных физическому

пределу текучести $\varepsilon_{0.02}$ за которым начинается процесс неконтролируемого раскрытия трещины, ее прорастания и разрушения сечения. Работой бетона на растяжение на участках между трещинами пренебрегают.

Вывод расчетной формулы

Следуя закону подобия эпюр относительных деформаций и относительной ширины раскрытия трещин (рис. 3, 4), получим формулу ширины раскрытия a_T в виде:

$$a_T = \frac{h_T \cdot \varepsilon_c \cdot l_T}{x_c} \tag{8}$$

Раскроем значения ее составляющих: x_c - высота сжатой зоны из условия равновесия напряженного состояния нормального сечения с трещиной,

$$x_c = 0,48\mu \cdot n \cdot h, \tag{9} \quad n = \frac{E_a}{E_b}; \mu = \frac{A_a}{A_b} \tag{10}$$

x_p - высота растянутой зоны над трещиной из условия соотношения предельных деформаций сжатой и растянутой зоны:

$$x_p = 0,2x_c, \tag{11}$$

$$h_T - \text{высота трещины:} \tag{12} \quad h_T = x_c - x_p = h \left(1 - 1,2 \frac{x}{h}\right) = h \cdot K_T,$$

$$k_T = 1 - 1,2\xi; \tag{13}$$

В формулу (11) входят k_T - коэффициент, характеризующий высоту сечения над трещиной: $\xi = x/h$ - относительная высота сжатой зоны:

$$\xi = \frac{x}{h_0} = R_a \cdot \frac{A_a}{R_b}. \tag{14}$$

После подстановки получим:
$$a_T = \frac{0,96 \varepsilon_c \cdot k_T \cdot l_T}{\mu \cdot n}, \tag{15}$$

l_T - расстояние между трещинами.

Расчет расстояния между трещинами не имеет точного решения в силу влияния случайных факторов, в том числе начальных напряжений, вызванных технологическими причинами.

Выбор и обоснование расчетной модели, объем и методика испытаний

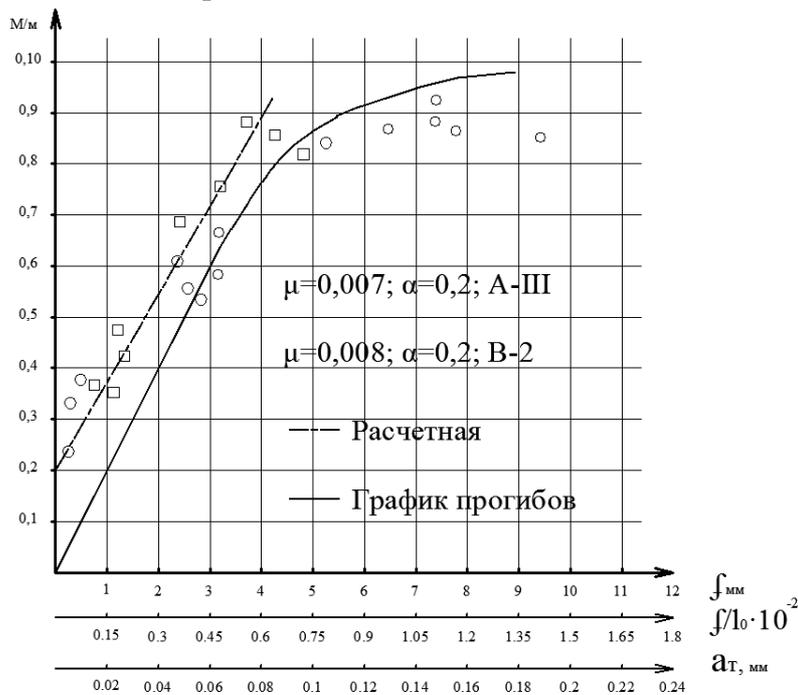


Рис. 5. Опытные и расчетные значения ширины раскрытия трещин

Исследования проводились на физических моделях в виде балочных плит размером $70 \times 15 \times 5$ см. Значение геометрических параметров относительных величин ширины и длины к высоте аналога и модели соответственно равны

$$b/h = 3, L/h = 12, \text{ размеры в плане } L/b = 4,6.$$

При выбранном геометрическом масштабе 1:3 размеры физической модели осредненно охватывают основной спектр номенклатуры выпускаемой промышленностью сборных железобетонных плит покрытий без предварительного напряжения.

Армирование осуществлено арматурой класса А-III и В-II, А-I, рекомендуемой нормами. Величина коэффициента армирования изменялась от 0,025 до 0,076 в соответствии с диапазоном изменения реального армирования плит. Учитывая статистическую природу распределения трещин на поверхности, значение l_T можно определять по формулам действующих норм. Опытные и расчетные значения ширины раскрытия трещин в зависимости от уровня напряжения приведены рис. 5.

Близкое совпадение опытных и расчетных результатов свидетельствует о достоверности предлагаемого метода расчета по формуле. При этом заметим, что опытные точки a_T образцов, армированных сталью ВII, расположились выше опытных точек, армированных «мягкой» сталью АIII.

Испытания выполнены в соответствии с программой научных исследований кафедры ПС ПГС инженерного факультета РУДН совместно с соискателями степени магистра наук (Ю.В. Серeda, Е.С. Белобородова, О.В. Панин).

Л и т е р а т у р а

1. *Бондаренко В.М., Колчунов В.И.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 471 с.

2. *Майоров В.И., Кузьмин П.К.* От условной к точной модели расчета трещиностойкости железобетонных сечений// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2011. – №2. – С. 22-28.

References

1. *Bondarenko, V.M., Kolchunov, V.I.* (2004). *Calculated Models of Force Resistance of Reinforced Concrete*, Moscow: Izd-vo ASV, 471 p.

2. *Mayorov, B.I., Kuzmin. P.K.* (2011). From conventional to accurate model of analysis of crack resistance of reinforced concrete sections, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, № 2, p. 22-28.

THE METHOD OF ANALYSIS OF WIDTH OF THE CRACK OPENINGS IN FERRO-CONCRETE STRUCTURES UNDER BENDING

P.K. KUZMIN

LLC «Promtehekspertiza», Moscow, Russia

The article contains the new width calculating method of the cracks opening in normal sections of ferro-concrete structures in bending via deformation model. Experimental data of valid calculations are given.

KEY WORDS: crack resistance, crack, crack width, deformation model, reinforced concrete structure.

