

DOI: 10.12737/article\_5bd95a75010906.70019486

<sup>1</sup>Колчунов В.И., <sup>2,\*</sup>Никулин А.И., <sup>2</sup>Обернихин Д.В.<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет

305040, г. Курск, 50 лет Октября ул., 94

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

\*E-mail: Nikulin.ai@bstu.ru

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ НОВЫХ ЭФФЕКТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

**Аннотация.** В изгибаемых железобетонных конструкциях после появления трещин возникает эффект нарушения сплошности, который заметно изменяет напряженно деформированное состояние в окрестностях, прилегающих к трещине. В статье рассмотрены предложения по совершенствованию метода расчета ширины раскрытия трещин с учетом новых эффектов сопротивления железобетона. Применительно к изгибаемым железобетонным элементам трапециевидного поперечного сечения разработана методика и получены расчетные формулы, базирующиеся на традиционных предпосылках теории железобетона и основных положениях механики разрушения. Предложены зависимости для определения теоретических значений ширины раскрытия трещины не только на расстоянии  $d$ , принятом за стандартное от поверхности арматуры, но и на удалении защитного слоя до боковых граней и нижней поверхности железобетонной конструкции, где она и замеряется в опытах с помощью микроскопа. Рассмотрены расчетные схемы полосок-консолей, вырезанных в окрестностях трещины. При этом распределение усилий в сечениях вырезанной полоски соответствует двум случаям, которые подробно рассмотрены в статье. Для каждого из них приведены точные решения для получаемых эпюр напряжений, а также предложены аппроксимирующие зависимости для их описания, что существенно упрощает итоговые расчетные формулы. На основании обработки имеющихся опытных данных получена эмпирическая зависимость ширины раскрытия трещин от расстояния до поверхности арматуры. До накопления достаточного количества экспериментальных данных её использование в практике проектирования имеет некоторые ограничения. Проведенными исследованиями выявлено, что учет эффекта нарушения сплошности железобетона позволяет существенно уточнить значения ширины раскрытия трещин и объяснить многие замеченные в экспериментах явления, происходящие при сопротивлении железобетонных конструкций силовым и деформационным воздействиям.

**Ключевые слова:** ширина раскрытия трещины, железобетон, изгибаемый элемент, арматура, двухконсольный элемент.

**Введение.** Железобетонные конструкции, как правило, эксплуатируются в стадии, наступающей после образования трещин (ограничивается лишь ширина их раскрытия). Поэтому естественным является стремление изучить напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины.

Процесс раскрытия трещин в элементах железобетонных конструкций – явление достаточно сложное. Его анализ усложняется еще и потому что основная гипотеза механики твердого деформируемого тела (гипотеза сплошности), здесь неприменима, – сплошность нарушается с образованием макротрещин. Использование упрощенных подходов здесь также невозможно так как, допускаемая при этом погрешность превышает значение самой отыскиваемой характеристики  $a_{срс}$ , измеряемой в опытах с помощью микроскопа.

В существующих нормативных документах, расчет по ширине раскрытия трещин в целом ряде случаев становится определяющим даже

при подборе рабочего армирования. Это вызывает необходимость более глубокого исследования затронутого вопроса, в том числе и применительно к трапециевидным поперечным сечениям, – заметно сдерживающих раскрытие трещин в железобетонных конструкциях.

В последние годы целым рядом исследований [2–6, 9–11, 13, 14] установлено, что в железобетоне после появления трещин возникает эффект нарушения сплошности, который заметно изменяет напряженно деформированное состояние в окрестностях, прилегающих к трещине. Ниже рассмотрены предложения по совершенствованию метода расчета ширины раскрытия трещин с учетом новых эффектов сопротивления железобетона.

**Основная часть.** Будем различать ширину раскрытия трещин на уровне расстояния  $d$  от поверхности арматуры и на уровне боковых и нижней граней железобетонных конструкций. Дело в

том, что при проведении экспериментальных исследований ширину раскрытия трещин измеряют с помощью микроскопа именно на боковых и нижних гранях железобетонных конструкций, а контакт сцепления бетонной матрицы с боковой поверхностью арматуры осуществляется на некотором удалении от этих поверхностей. Это удаление составляет размер защитного слоя бетона, который, как известно, принимается не менее диаметра рабочей арматуры  $d$  и составляет в железобетонных конструкциях, как правило, 20 – 70 мм (последнее значение, например, принимается для фундаментов при отсутствии щебеночной подготовки).

Согласно гипотезе Томаса, под шириной раскрытия трещин понимается накопление относительных взаимных смещений арматуры и бетона  $\varepsilon_q(x)$ . Для конкретизации будем отталкиваться от эталонного значения защитного слоя, равного диаметру рабочей арматуры. При этом, если размер действительного защитного слоя превышает эталонное значение, то возникает необходимость в учете дополнительного раскрытия трещины, обусловленного разницей между этими значениями.

Для построения расчетной схемы вырежем полоску шириной  $d$ , прилегающую к поверхности рабочей арматуры и к боковым или нижней граням железобетонной конструкции (рис. 1).

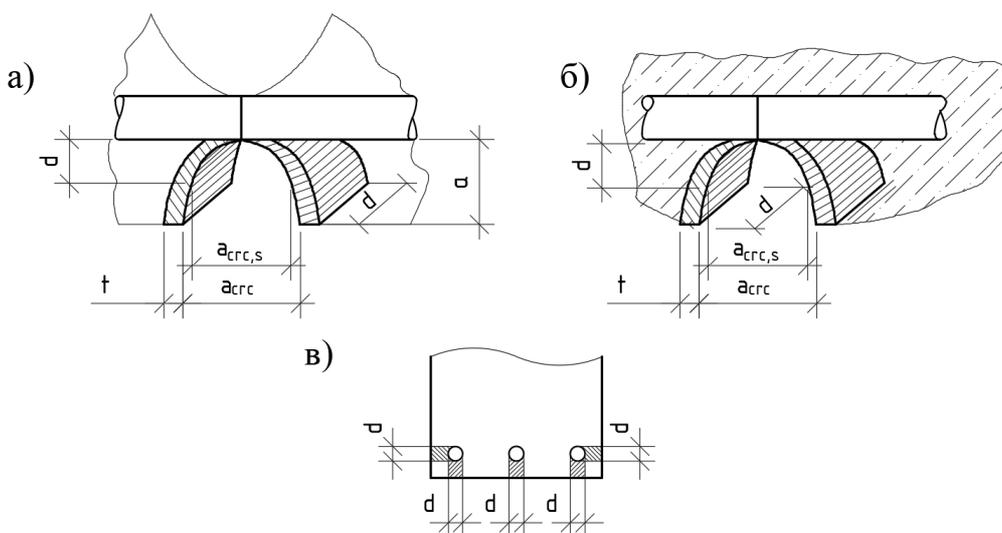


Рис. 1. Расчетные схемы полосок-консоль, вырезанных в окрестностях боковых или нижней грани железобетонной конструкции: *а* – вид сбоку; *б* – вид сверху; *в* – расположение вырезанных полосок в поперечном сечении

При этом, как уже было отмечено, в окрестности, прилегающей к трещине, будем учитывать деформационный эффект, связанный с наруше-

нием сплошности бетона, который обуславливает наличие местных сдвигающих усилий  $\Delta T$  и дополнительных распределенных моментов  $\Delta M$  (рис. 2).

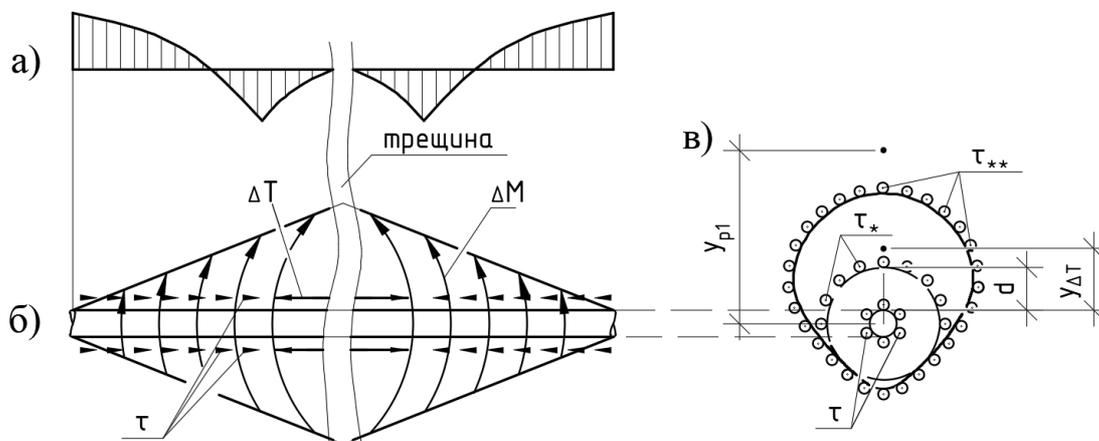


Рис. 2. Дополнительные усилия, возникающие в местной зоне, прилегающей к трещине из-за нарушения сплошности бетона: *а* – эпюра деформаций в бетоне; *б* – дополнительные распределенные моменты  $\Delta M$ ; *в* – распределение касательных усилий в околоарматурной зоне

Распределение усилий в сечениях вырезанной полосы обуславливает 2 случая, которые рассмотрены ниже.

**Случай 1.** Эпюры распределения напряжений и деформаций приведены на рис. 3. Здесь для описания эпюры напряжения используется квадратная парабола:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

1) При  $x=0$

$$y = \sigma_{bt,c} \quad (2)$$

2) При  $x=l_r$  ( $l_r=a$ , см. рисунок 1)

$$y = R_{bt} \quad (3)$$

3) При  $y=0$ ,  $x=x_0$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha = E_b \quad (4)$$

4) При  $y=0$ ,  $x=x_0$

$$Ax_0^2 + Bx_0 + C = 0 \quad (5)$$

При выполнении условия 2 из зависимости 1 следует, что

$$C = \sigma_{bt,c} \quad (6)$$

При выполнении условия 3 из зависимости 1 следует

$$R_{bt} = Al_r^2 + Bl_r + \sigma_{bt,c} \quad (7)$$

Из уравнения 7 будем иметь:

$$A = \frac{-\sigma_{bt,c} + R_{bt} - B \cdot l_r}{l_r^2} \quad (8)$$

Из условия 4 получим:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0} = 2Ax_0 + B = E_b \quad (9)$$

Отсюда следует

$$B = E_b - 2A \cdot x_0 \quad (10)$$

При выполнении условия 5 из зависимости 1 получим уравнение:

$$2Ax_0^2 + Bx_0 + \sigma_{bt,c} = 0 \quad (11)$$

В этом уравнении неизвестным является  $x_0$ . Таким образом, для определения 4-х неизвестных  $C$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $x_0$  имеем 4 уравнения: равенство (6) и уравнения (8), (10) и (11), соответственно.

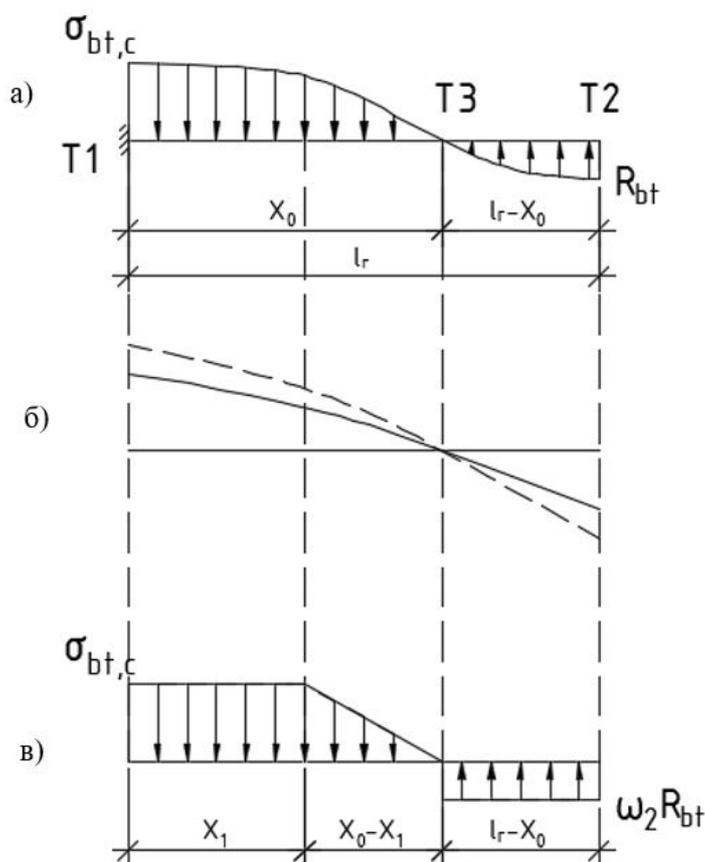


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений и деформаций на участках 1–3 и 3–2 (случай 1):  
 а – действительная эпюра напряжений; б – аффиноподобное распределение деформаций; в – эпюра напряжений принятая для практического расчета

Чтобы не усложнять расчет сложными алгебраическими преобразованиями и громоздкими зависимостями, систему уравнений (8), (10) и (11) будем решать методом последовательных приближений. При этом, в качестве первого приближения принимаем из условия аффиноподобия (рис. 3, б)

$$\frac{\varepsilon_{bt,c}}{\varepsilon_{bt,u}} = \frac{x_0}{l_r - x_0}, \quad (12)$$

где

$$\varepsilon_{bt,c} = \frac{\sigma_{bt,c}}{E_b \cdot \nu_b}; \quad \varepsilon_{bt,u} = \frac{2R_{bt}}{E_b}; \quad \nu_b = 0,45$$

$$x_0 = \frac{\varepsilon_{bt,c} \cdot l_r}{\varepsilon_{bt,u} + \varepsilon_{bt,c}} \quad (13)$$

После этого, решая совместно уравнения (8) и (10), получим:

$$A = \frac{-\sigma_{bt,c} + R_{bt} - E_b \cdot l_r}{l_r^2 - 2l_r \cdot x_0} \quad (14)$$

Тогда параметр  $B$  будем определять по зависимости (10).

После этого можно уточнить параметр  $x_{0,1}$  из уравнения:

$$x_{0,1} = -\frac{B}{2A} \pm \sqrt{\frac{B^2}{4A^2} - \frac{\sigma_{bt,c}}{A}} \leq l_r \quad (15)$$

Полученное значение сравниваем с его приближенным значением по зависимости (13).

На следующем шаге итерации принимаем

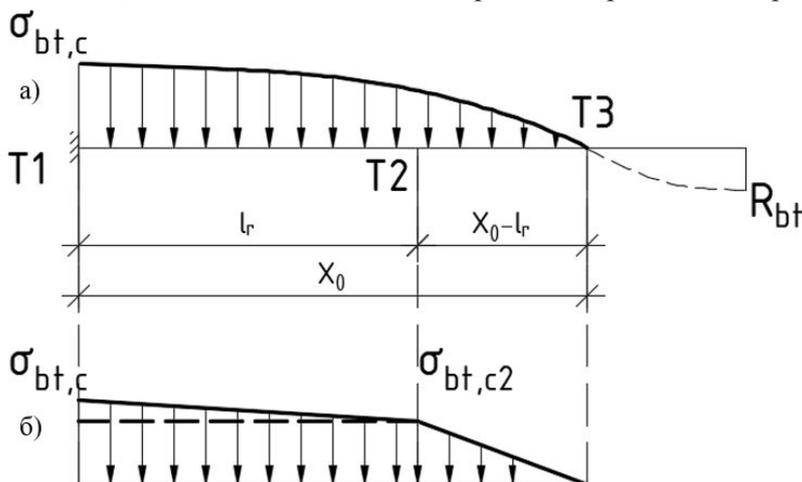


Рис. 4. Эпюры распределения напряжений на участках 1–2 и 2–3 (случай 2):  
 а – действительная эпюра напряжений; б – эпюра напряжений, принятая для практического расчета

Для описания эпюры распределения напряжений будем использовать параболу по уравнению (1). Для определения её параметров воспользуемся следующими условиями:

- 1) условие совпадает с уравнением (2);
- 2) условие совпадает с уравнением (4);

$$x_{0,2} = \frac{x_0 + x_{0,1}}{2} \quad (16)$$

Итерации повторяются до получения требуемой точности расчета.

Проведенные обширные численные исследования показали, что на участке от Т1 до Т3 искомая эпюра распределения напряжений действительно близка к параболе и, следовательно, коэффициент заполнения эпюры  $\omega_1=2/3$ .

На участке же от Т3 до Т2 коэффициент заполнения эпюры близок к  $\omega_2=5/6$ .

Поэтому для дальнейшего построения способа расчета принимаем усредненную эпюру на участке 1–3, состоящую из двух фигур: прямоугольника и треугольника (рис. 3, в), а на участке 3–2: в виде прямоугольника с ординатой  $\omega_2 \cdot R_{bt}$ .

При этом параметр  $x_1$  определяется из условия, в соответствии с которым сумма площадей прямоугольника и треугольника с ординатой  $\sigma_{bt,c}$  на участке 1–3 равна площади параболы с коэффициентом заполнения, равном  $\omega_1=2/3$ :

$$\sigma_{bt,c} \cdot x_1 + 0,5\sigma_{bt,c} \cdot (x_0 - x_1) = \omega_1 \cdot \sigma_{bt,c} \cdot x_0 \quad (17)$$

Отсюда следует, что

$$x_1 = \frac{1}{3}x_0 \quad (18)$$

Если неравенство, ограничивающее зависимость (15), не выполняется, т.е.  $x_0 > l_r$ , – это означает, что мы переходим к расчетному случаю 2.

**Случай 2.** Эпюры распределения действительных и принятых для практического расчета напряжений приведены на рисунке 4.

- 3)  $x_0=l_r$  ( $x_0=a$ , см. рисунок 1),  $y=\sigma_{bt,c}$ ;
- 4) при  $x=x_0$   $y=0$ .

Тогда параметры  $C$  и  $B$  определяются из зависимостей (6) и (10).

Параметр  $A$  отыскивается из уравнения

$$\sigma_{bt,c2} = A \cdot l_r^2 + B l_r + \sigma_{bt,c} \quad (19)$$

Отсюда следует:

$$A = \frac{\sigma_{bt,c} - \sigma_{bt,c2} + B \cdot l_r}{l_r^2} \quad (20)$$

Расстояние  $x_0$  до точки Т3, в которой  $y=0$  (рисунок 2), известно, – оно следует из зависимости (15) для случая 1 при обращении неравенства в равенство.

Тогда зная  $x_0$ , из 4-го условия получим параметр  $A$

$$A x_0^2 + B x_0 + \sigma_{bt,c} = 0 \quad (21)$$

Из (21) следует

$$A = \frac{-B \cdot x_0 - 2 \cdot \sigma_{bt,c}}{x_0^2} \quad (22)$$

Раскрывая параметр  $B$ , получим

$$A = \frac{\sigma_{bt,c} + E_b x_0}{x_0^2} \quad (23)$$

С другой стороны, из третьего условия

$$A = \frac{\sigma_{bt,c} - \sigma_{bt,c2} + B \cdot l_r}{l_r^2} \quad (24)$$

Приравняв (24) и (23), получим

$$\sigma_{bt,c2} = \sigma_{bt,c} \left( 1 + \frac{l_r^2}{x_0^2} \right) + B \cdot \left( l_r + \frac{l_r}{x_0^2} \right) \quad (25)$$

Из проведенных численных исследований следует, что на участке от Т1 до Т2 (рис. 2) эпюру распределения напряжений можно упростить, приняв её в виде трапеции, а на участке от Т2 до Т3, – в виде треугольника (рис. 4, б). При этом, если параметр  $x_0$  приближается к параметру  $l_r$ , то случай 2 упрощается и вместо двух фигур, трапеции и треугольника, будет одна, – в виде треугольника с ординатой, равной  $\sigma_{bt,c}$ . Вторая ордината будет стремиться к 0, – имеем частный вариант случая 2, – здесь точки 2 и 3 совпадают и  $x_0=l_r$ , который в практических расчетах встречается крайне редко.

Теперь, располагая эпюрами распределения усилий по мере удаления от поверхности арматурного стержня до боковой или нижней граней железобетонной конструкции, можно определить перемещения полосок-консоль, принятых в качестве расчетной схемы (рис. 1 и 2). В принятой расчетной схеме также учитываются дополнительный момент  $\Delta M$  и сосредоточенная сила  $\Delta T$ , возникающие в зоне, прилегающей к трещине из-за нарушения сплошности.

Здесь следует подчеркнуть, что необходимо различать ширину раскрытия трещины на удалении  $d$  от поверхности арматуры и на удалении защитного слоя до боковых и нижней граней железобетонной конструкции (рис. 1).

Тогда усилие, отыскиваемое в продольной арматуре, распределяется пропорционально произведению площади на периметр  $i$ -го арматурного стержня:

$$\frac{N_s}{N_{s,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{s,i} S_s}{A_{s,i} \cdot S_i} \quad (26)$$

В расчете определяющей будет та полоска-консоль, для которой ширина раскрытия трещины на поверхности железобетонной конструкции будет наибольшей.

В итоге расчетная схема вырезанных полосок-консоль принимает вид (рис. 5).

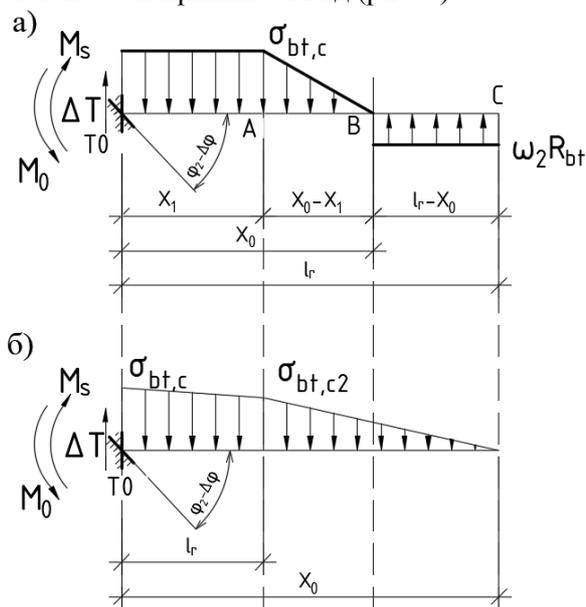


Рис. 5. Расчетные схемы вырезанных полосок-консоль: а – случай 1; б – случай 2

На рис. 5:

$M_0$  – моментная реакция в заделке;  $M_s$  – нагельный момент в арматуре, полученный из двухконсольного элемента [1],

$M_s = X_3 = \Delta T \cdot y_{\Delta T}$ ;  $\varphi_2$  – угол поворота заделки, равный  $\varphi_2 = \frac{0,5 \cdot a_{cr,c,s} \cdot k_r}{a_p}$ , где  $a_p$  – величина защит-

ного слоя;  $\Delta \varphi$  – угол поворота заделки, обусловленный поворотом изогнутой оси железобетонной конструкции [1] (учитывается только для трещин снизу, при рассмотрении для трещин, развивающихся до боковой поверхности конструкции,  $\Delta \varphi$  принимается равным 0);  $\Delta T$  – определяется из расчетной схемы двухконсольного

элемента [1, 8, 14];  $\Delta M$  – дополнительный момент, возникающий в зоне, прилегающей к трещине из-за нарушения сплошности.

Для трещины снизу  $\Delta M = \Delta T \cdot y_{\Delta t} - P_1 \cdot y_{p1}$ .

$$EI \cdot y_r = \frac{\sum EI \cdot (\varphi_2 - \Delta\varphi) \cdot l_r}{1!} + \frac{\sum M_0 \cdot l_r^2}{2!} - \frac{X_3 \cdot l_r^2}{2!} - \frac{\sum \Delta M \cdot l_r^2}{2!} + \frac{\Delta T l_r^3}{3!} - \frac{q_1 l_r^4}{4!} + \frac{q_1 (l_r - x_1)^4}{4!} - \frac{q_1 (l_r - x_1)^4}{4!} + \frac{(q_1 + q_2) \cdot (l_r - x_1)^5}{5!} - \frac{(q_1 + q_2) \cdot (l_r - x_0)^5}{5!} + \frac{q_{Rbt} \cdot (l_r - x_0)^4}{4!} \quad (27)$$

где

$$q_1 = \sigma_{bt,c} \cdot d \quad (28)$$

$$q_2 = q_1 \cdot \frac{l_r - x_0}{x_0 - x_1} \quad (29)$$

Для трещины сбоку  $\Delta M = \Delta T \cdot y_{\Delta t}$ .

Опираясь на предложенную расчетную схему, для случая 1 (рис. 5, а) будем иметь:

$$q_{Rbt} = R_{bt} \cdot d \quad (30)$$

Для записи формулы (27) был использован дополнительный рис. 6.

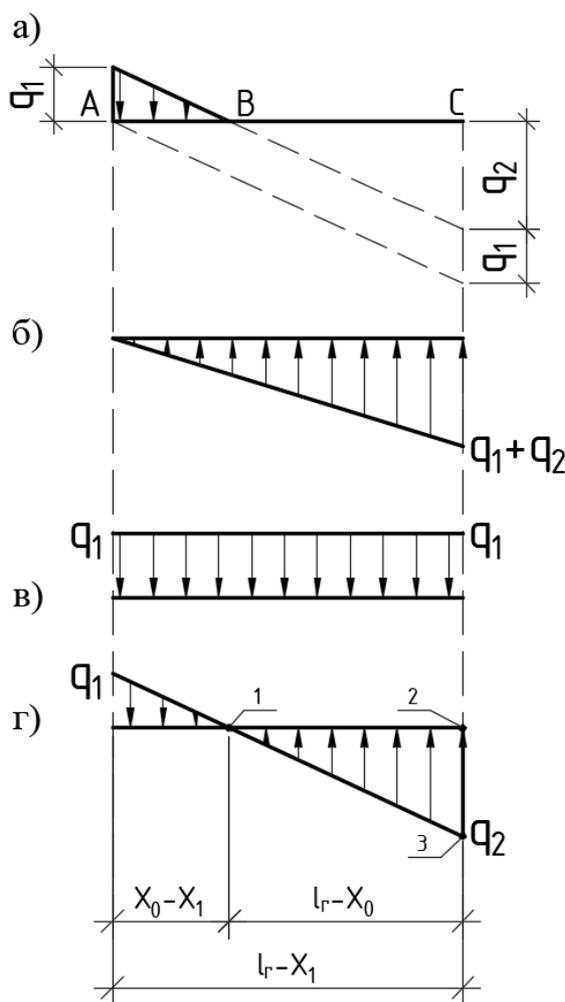


Рис. 6. Преобразование заданной нагрузки (а) к необходимому виду, принятому в методе начальных параметров путем сложения эпюры (б) и эпюры (в) и вычитания из результирующей (г) дополнительного треугольника 1–2–3 на участке В–С

Опираясь на предложенную расчетную схему, для случая 2 (рис. 5, б) будем иметь:

$$EI \cdot y_{x0} = \frac{\sum EI \cdot (\varphi_2 - \Delta\varphi) \cdot x_0}{1!} + \frac{\sum M_0 \cdot x_0^2}{2!} - \frac{X_3 \cdot x_0^2}{2!} - \frac{\sum \Delta M \cdot x_0^2}{2!} + \frac{\Delta T x_0^3}{3!} - \frac{q_1 x_0^4}{4!} + \frac{(q_1 + q_2) \cdot x_0^5}{5!} - \frac{q_2 (x_0 - l_r)^5}{5!} - \frac{q_{bt,c2} \cdot (x_0 - l_r)^4}{4!} + \frac{q_{bt,c2} \cdot (x_0 - l_r)^5}{5!} \quad (31)$$

где

$$q_2 = (\sigma_{bt,c} - \sigma_{bt,c2}) \cdot d \cdot \frac{x_0 - l_r}{l_r} \quad (32)$$

$$q_{bt,c2} = \sigma_{bt,c2} \cdot d \quad (33)$$

Для записи формулы (31) был использован дополнительный рисунок 7.

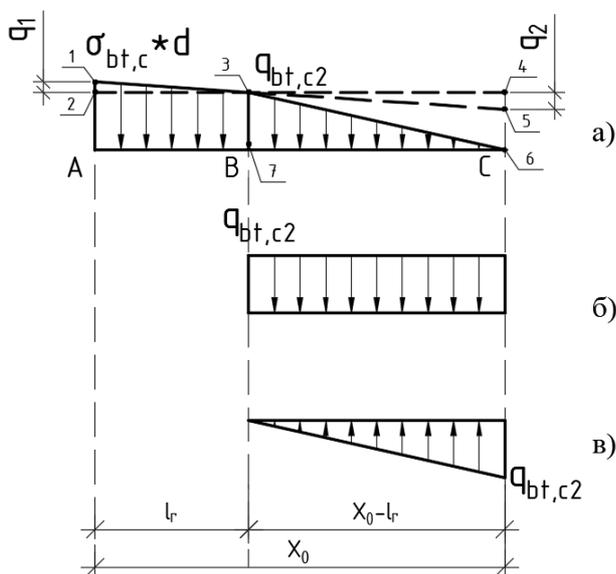


Рис. 7. Преобразование заданной нагрузки на участке В-С к необходимому виду, принятому в методе начальных параметров путем сложения эпюры (б) и эпюры (в)

Преобразование заданной нагрузки на участке А-В (треугольник 1-2-3 и треугольник 3-4-5 на рис. 7, а) к виду метода начальных параметров выполняется аналогично случаю 1 (рисунок 6).

Преобразование заданной нагрузки на участке В-С (треугольник 3-6-7 на рис. 7, а) к виду метода начальных параметров выполняется путем сложения прямоугольной (рис. 7, б) и треугольной (рис. 7, в) эпюр.

Численный анализ показывает, что перемещения в зоне защитного слоя  $y_r$  и  $y_0$ , вычисленные по формуле (27) (случай 1) и по формуле (31) (случай 2), достаточно близки к экспериментальным данным [5, 6, 7].

Аналогичным образом можно определить перемещения  $y_{ds}$  при  $l_r$  или  $x_0$ , равным  $d$ , соответственно, для первого и второго случаев. При этом формула (27) записывается без последних четырех слагаемых, а формула (31) без последних двух слагаемых.

Тогда ширину раскрытия трещины  $a_{crc}$  на боковых или нижней поверхностях железобетонной конструкции можно определить, располагая её теоретическим значением  $a_{crc,s}$ , умноженным на коэффициент  $k_r$ :

$$a_{crc} = a_{crc,s} \cdot k_r \quad (34)$$

Коэффициент  $k_r$  определяется по формуле:

– случай 1,  $k_r = \frac{y_r}{y_{ds}} \quad (35)$

– случай 2,  $k_r = \frac{y_{x0}}{y_{ds}} \quad (36)$

При этом теоретическое значение ширины раскрытия трещин  $a_{crc,s}$  определяется по формуле [12]:

$$a_{crc,s} = -\frac{2\Delta T}{G} + \frac{2B_3}{B} \left(1 - e^{-B \cdot (0,5l_{crc} - t^*)}\right) \quad (37)$$

где  $l_{crc}$  – расстояние между трещинами;  $B, B_3, G, \Delta T$  – параметры сцепления арматуры с бетоном. Их физический смысл подробно охарактеризован в работе [12].

В свою очередь, обработка опытных данных позволяет получить следующую зависимость:

$$2f_R = \frac{2 \cdot 0,0163 \cdot 100 \cdot \sigma_s \cdot (1 - e^{-0,516 \cdot r}) \cdot 10}{100 \cdot R_s} \quad (38)$$

Здесь  $f_R$  – экспериментальное перемещение волокон бетона, расположенных на расстоянии  $r$  от поверхности арматуры в направлении её продольной оси в сечении с трещиной (депланация в сечении с трещиной);  $r$  – радиус околоарматурной зоны до рассматриваемых волокон;  $\sigma_s$  и  $R_s$  – напряжение в арматуре и предел текучести арматуры, соответственно;  $\sigma_s$  и  $R_s$  принимаются в  $кН/см^2$ , а значение  $f_R$  в  $мм$ .

До накопления достаточного количества экспериментальных данных и проведения сопоставительного анализа принято целесообразным вводить в расчет ограничение для коэффициента  $k_r$  в соответствии с неравенством:

$$k_r \leq \frac{f_{R,p}}{f_{R,ds}} \quad (38)$$

где  $f_{R,p}$  – экспериментальное перемещение волокон бетона, расположенных на боковых или нижней гранях железобетонной конструкции в направлении продольной оси арматуры в сечении с трещиной (депланация в сечении с трещиной);

$f_{R,ds}$  – экспериментальное перемещение волокон бетона, расположенных на расстоянии  $r=d$  от поверхности арматуры в направлении продольной её оси, в сечении с трещиной (депланация в сечении с трещиной до уровня  $r=d$ ).

**Выводы**

1. Разработана методика определения ширины раскрытия трещин и получены расчетные формулы, базирующиеся на традиционных пред-

посылках теории железобетона и основных положениях механики разрушения, позволяющие заметно приблизить этот важнейший расчетный параметр к действительному экспериментальному значению. Предложены зависимости для определения теоретических значений ширины раскрытия трещины не только на расстоянии  $d$  (принятой за стандартное) от поверхности арматуры, но и на удалении защитного слоя до боковых граней и нижней поверхности железобетонной конструкции, где она и замеряется в опытах с помощью микроскопа.

2. В свою очередь, обработка имеющихся опытных данных позволила получить эмпирическую зависимость ширины раскрытия трещин от расстояния до поверхности арматуры. До накопления достаточного количества экспериментальных данных и проведения сопоставительного анализа было принято целесообразным ввести в расчет необходимое ограничение.

3. Проведенные исследования показали, что учет эффекта нарушения сплошности железобетона позволяет существенно уточнить значения ширины раскрытия трещин и объяснить многие замеченные в экспериментах явления, происходящие при сопротивлении железобетонных конструкций силовым и деформационным воздействиям.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
2. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Изд-во Основа, 2009. 432 с.
3. Федоров В.С., Шавыкина Е.В., Колчунов В.И. Методика расчета ширины раскрытия трещин в железобетонных внецентренно сжатых конструкциях с учетом эффекта нарушения сплошности // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 1. С. 8–11.
4. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. К построению расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №1(252). С. 13–17.
5. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А., Дмитриенко Е.А. Методика экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании (сжати) арматурного стержня из бетона (в бетон) с учетом выпадающей ветви деформирования // В сб. науч. трудов: Ресурсоёмкие материалы, конструкции, здания и сооружения. Рівне, 2016. № 33. С. 162–173.
6. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне // Строительство и реконструкция. 2011. №6. С. 16–23.
7. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Об учете эффекта нарушения сплошности в железобетоне при проектировании реконструкции предприятий текстильной промышленности // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 3. С. 258–263.
8. Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2009. №4. С. 160–163.
9. Смоляго Г.А. Оценка уровня конструктивной безопасности железобетонных конструкций по трещиностойкости // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 4. С. 62–63.
10. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Прочность и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного поперечного сечения с нижней широкой гранью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 66–72.
11. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Рубанов В.Г., Свентиков А.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 58–63.
12. Бамбура А.М., Павликов А.М. Колчунов В.И., Кочкарёв Д.В., Яковенко И.А. Практичний посібник із розрахунку залізобетонних конструкцій за діючими нормами України (ДБН В2.6–98:2009) та новими моделями деформування, що розролені на їхню заміну. Київ: Изд-во Талком, 2017. 627 с.
13. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15(2017)3. Pp. 366–375. DOI:10.5937/jaes15–14662.
14. Salnikov A., Kolchunov V.I., Iakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. Pp. 784–789.

### Информация об авторах

**Колчунов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительства уникальных зданий и сооружений. E-mail: vlik52@mail.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, г. Курск, 50 лет Октября ул., 94.

**Никулин Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: Nikulin.ai@bstu.ru; nikulin137@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Обернихин Дмитрий Вячеславович**, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: obernikhindmitriy@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в июне 2018 г.

© Колчунов Вл.И., Никулин А.И., Обернихин Д.В., 2018

<sup>1</sup>Kolchunov V.I., <sup>2</sup>\*Nikulin A.I., <sup>2</sup>Obernikhin D.V.

<sup>1</sup>Southwest State University

Russia, 308012, Kursk, str. 50 let Oktyabrya, 94

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

\*E-mail: Nikulin.ai@bstu.ru

## WIDTH DISCLOSURE CRACKS OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS OF TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION TAKING INTO ACCOUNT NEW EFFECTS OF RESISTANCE

**Abstract.** The effect of discontinuity occurs in result of cracks in flexible concrete structures. It significantly changes the stress-strain condition near the crack. The article investigates proposals for improving the calculating method of cracks disclosure width in the light of new effects of reinforced concrete resistance. With regard to bending reinforced concrete elements of a trapezoidal cross-section, the technique is developed and the calculation formulas are obtained. They are based on traditional premises of the reinforced concrete theory and the basic principles of fracture mechanics. Dependencies are proposed for determining theoretical values of the crack width at a distance  $d$ , taken as a standard of armature surface, and at a distance of the protective layer to the side and the bottom surface of the reinforced concrete structure, where it is measured by using a microscope. The design schemes of cantilever strips cut near the crack are considered. At the same time, the distribution of efforts in the sections of cut strip corresponds to both cases discussed in the article. For each case, exact solutions for the resulting stress diagrams and approximating dependencies for description, which simplifies the final calculation formulas, are given. Based on the processing of available experimental data, the empirical dependence of the crack width on the distance to the armature surface is obtained. Without accumulating a sufficient amount of experimental data, its use in design practice has limitations. Studies have shown that the inclusion of the discontinuity effect of reinforced concrete can significantly clarify the values of the crack width. Furthermore, it explains some phenomena in experiments, occurred when reinforced concrete structures resist force and deformation effects.

**Keywords:** cracks disclosure width, reinforced concrete, flexible element, reinforce, dual console element.

### REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation models of the power of resistance of reinforced concrete. Moscow.: ASV, 2004, 472 p.
2. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete. Kiev.: Osnova, 2009, 432 p.
3. Fedorov V.S., Shavykin E.V., Kolchunov V.I. The method of calculating the width of the disclosure of the cracks in reinforced concrete patands compressed structures considering the effect of damages. Structural mechanics and calculation of structures, 2009, no 1, pp. 8–11.
4. Kolchunov V.I., Klyueva I.A., Yakovenko N.V. To build the design model disclosure width inclined cracks in composite reinforced concrete structures. Structural mechanics and calculation of structures, 2014, no 1(252), pp. 13–17.
5. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., Dmitrienko E.A. The methodology of experimental research of coupling of reinforcement with concrete while pulling (compression) of reinforcing rod of concrete (concrete) subject to descending branches deformation. Resource-intensive materials, constructions, buildings and structures, no 33, Rivne, 2016, pp. 162–173.
6. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A., About using the hypothesis of flat sections in reinforced concrete. Construction and reconstruction, 2011, no. 6, pp. 16–23.
7. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A. Of accounting for the effect of damages of reinforced concrete in reconstruction projects of enterprises of textile industry. Proceedings of high schools. Technology of the textile industry, 2016, no. 3, pp. 258–263.

8. Kolchunov V.I., Iakovenko I.A. Development of a twoconsole element of fracture mechanics to calculate the width of the disclosure of the cracks in reinforced concrete structures. Bulletin of civil engineers, 2009, no. 4. pp. 160–163.

9. Smoljago G.A. Evaluation of the level of constructive security crack-resistance of reinforced concrete constructions. Industrial and civil construction, 2003, no. 4, pp. 62–63.

10. Obernihin D.V., Nikulin A.I. Strength and fracture toughness of steel reinforced concrete elements of trapezoidal cross-section with lower general face. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 4, pp. 66–72.

11. Nikulin A.I., Obernihin D.V., Rubanov V.G., Sventikov A.A. Fracture toughness of steel reinforced concrete elements of trapezoidal cross-section based on the application of nonlinear deformation models. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2016, no. 2, pp. 58–63.

12. Bambura A.M., Pavlikov A.M. Kolchunov V.I., Kochkarjov D.V., Iakovenko I.A. Practical collection of calculation concrete structures according to the applicable norms of Ukraine (DBN V2.6–98:2009) and new models of deformation that are rooted in their replacement. Kiev: Talkom. 2017, 627 p.

13. Iakovenko I., Kolchunov V.I. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. Journal of Applied Engineering Science, 2017, vol. 15(2017)3, pp. 366–375. DOI:10.5937/jaes15–14662.

14. Salnikov A., Kolchunov V.I., Iakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. Applied Mechanics and Materials. 2015, vol. 725–726, pp. 784–789.

#### *Information about the author*

**Kolchunov, Vladimir I.** DSc, Professor. E-mail: vlik52@mail.ru. Southwest State University. Russia, 308012, Kursk, str. 50 let Oktyabrya, 94.

**Nikulin, Alexandr I.** PhD, Assistant professor. E-mail: Nikulin.ai@bstu.ru; nikulin137@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Obernikhin, Dmitriy V.** Senior lecturer. E-mail: obernikhindmitriy@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in June 2018*

#### **Для цитирования:**

Колчунов В.И., Никулин А.И., Обернихин Д.В. Ширина раскрытия трещин железобетонных конструкций трапециевидного поперечного сечения с учетом новых эффектов сопротивления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №10. С. 64–73. DOI: 10.12737/article\_5bd95a75010906.70019486

#### **For citation:**

Kolchunov V.I., Nikulin A.I., Obernikhin D.V. Width disclosure cracks of reinforced concrete constructions of trapezoidal cross-section taking into account new effects of resistance. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 10, pp. 64–73. DOI: 10.12737/article\_5bd95a75010906.70019486