

УДК 624.012.045

*Вл.И. Колчунов, д.т.н., профессор
И.А. Яковенко, к.т.н.
Н.В. Усенко, инженер
Национальный авиационный университет*

К ОБРАЗОВАНИЮ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН ПОСЛЕДУЮЩИХ УРОВНЕЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Определена полная картина трещинообразования веера наклонных трещин, прилегающего к грузу, что позволяет существенно уточнить действительное напряженно-деформированное состояние железобетонных составных конструкций в процессе нагружения. Предложена расчетная модель для определения усилий в продольной и поперечной арматуре в наклонных трещинах первого и второго типов для различных уровней трещинообразования и расчетная схема для определения деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ между этими трещинами.

***Ключевые слова:** уровни трещинообразования, наклонные трещины, расчетная модель, расчетная схема, напряженно-деформированное состояние, железобетонные составные конструкции.*

УДК 624.012.045

*Вл.И. Колчунов, д.т.н., профессор
И.А. Яковенко, к.т.н.
Н.В. Усенко, инженер
Національний авіаційний університет*

ДО УТВОРЕННЯ ПОХИЛИХ ТРІЩИН НАСПУПНИХ РІВНІВ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СКЛАДОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Визначено повну картину тріщиноутворення віяла похилих тріщин, який прилягає до вантажу, що дозволяє суттєво уточнити дійсний напружено-деформований стан залізобетонних складових конструкцій у процесі навантаження. Запропоновано розрахункову модель для визначення зусиль у поздовжній і поперечній арматурі в похилих тріщинах першого та другого типів для різних рівнів тріщиноутворення та розрахункову схему для визначення деформацій розтягнутого бетону $\varepsilon_{bt}(y)$ між цими тріщинами.

***Ключові слова:** рівні тріщиноутворення, похилі тріщини, розрахункова модель, розрахункова схема, напружено-деформований стан, залізобетонні складові конструкції.*

*Vi.I. Kolchunov, ScD, Professor
I.A. Yakovenko, PhD
N. V. Usenko, engineer
National Aviation University*

TO THE EMERGENCE OF INCLINED NEXT LEVEL CRACKS IN THE REINFORCED CONCRETE COMPOSITE CONSTRUCTIONS

The article is devoted to the definition of complete picture cracking of the inclined cracks adjacent to the cargo, which allows to specify the actual stress-strain state of reinforced concrete composite constructions in the process of loading. The calculation model for of cracking, inclined cracks, calculation model, design scheme, stress-strain state, reinforced determining the forces applied in the longitudinal and transverse reinforcement in the inclined cracks of the first and second type for fracturing different levels and calculation circuit for determining the deformations of concrete in tension $\varepsilon_{bt}(y)$ between the cracks.

Keywords: *concrete composite constructions*

Введение. Наклонные трещины появляются в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил. Характер трещинообразования зависит от величин и соотношения M и Q , а также от геометрии сечения, прочностных и деформативных характеристик бетона, величины и характера предварительного обжатия бетона и ряда других факторов.

Для успешного исследования напряженно-деформированного состояния и анализа его влияния на трещиностойкость, при наличии трещин, необходимо располагать четкой классификацией трещин, а также неискаженными результатами экспериментов.

В этих зонах, как известно [1], появляются трещины первого и второго типов. Для трещин первого типа определяющим усилием, вызывающим их появление, является изгибающий момент M . Они начинаются от растянутой грани, вначале к ней нормальны, затем искривляются в сторону силы. С увеличением нагрузки зона образования трещин постепенно перемещается в сторону уменьшения изгибающего момента (в обычных балках – к опоре).

Трещины второго типа появляются, когда определяющим усилием является поперечная сила Q . Эти трещины образуются в средней части высоты балки и с ростом нагрузки развиваются в сторону груза и в сторону опоры. В коротких балках при больших поперечных силах и в предварительно напряженных двутавровых балках с тонкой стенкой они могут появляться раньше нормальных.

Кроме общеизвестных двух типов трещин, в работе выявлен третий тип наклонных трещин, развивающихся в приопорной части вдоль сжатого столба образующейся арки, которые могут соединяться (при определенных геометрических параметрах и армировании) с трещинами, появляющимися на верхней грани железобетонной конструкции над аркой. Как подтверждают эксперименты, их слияние происходит практически мгновенно. Угол их наклона может существенно изменяться, образуя веер 2 [2]. Этот тип трещин развивается не от опоры к силе, а пробивается через сжатый столб образующейся арки, который может выходить на верхнюю грань железобетонной конструкции и приводить к ее разрушению.

Что касается существующих методов расчета по образованию наклонных трещин, то следует отметить, что нормативный метод ограничивается рассмотрением трещин лишь второго типа. Он основан на сравнении величин главных растягивающих напряжений на центральной оси элемента, полученных по формулам теории упругости, с пределом прочности бетона при растяжении. При этом не только не используется существенный резерв, заложенный в способности растянутого бетона к неупругому деформированию, но и не учитывается реальная возможность развития неупругих деформаций в бетоне.

Оправданность использования столь упрощенного подхода при расчете по образованию наклонных трещин объясняли в свое время тем, что ширина их раскрытия считалась незначительной, и их влияние на напряженно-деформированное состояние элемента в целом невелико. Однако рядом исследователей четко установлено, что при определенных, но вполне реальных условиях наклонные трещины могут появляться раньше нормальных, ширина их раскрытия может быть значительной, а в предварительно напряженных тонкостенных элементах вслед за появлением наклонных трещин может даже произойти хрупкое разрушение.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы и постановка задачи. Существующие на сегодняшний день приемы расчета по образованию наклонных трещин по существу основываются также на предположениях об упругой работе бетона и сводятся, главным образом, к уточнению нормативного метода или за счет учета ряда дополнительных факторов, или за счет введения поправочных эмпирических коэффициентов.

Для определения действительного напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций возникает необходимость в определении полной картины трещинообразования в процессе нагружения. При этом важно располагать не только различными уровнями трещинообразования нормальных трещин, но и иметь полную картину вееров наклонных трещин. Определение расстояний и уровней появления наклонных трещин третьего типа было рассмотрено в работе [2].

Что же касается последующих уровней трещинообразования наклонных трещин первого и второго типов, то вопрос остался открытым. Ниже рассмотрено решение этой задачи.

Основной материал и результаты. После определения опасной кривой трещины по критерию образования или наибольшей ширины их раскрытия [2, 3] необходимо нанести весь веер наклонных трещин первого и второго типов.

При этом расстояние между наклонными трещинами первого уровня $l_{cr,1}$, расположенными вдоль продольной арматуры, определяются из соотношения (рис.1)

$$\frac{a}{a-l_{cr,1}} = \frac{M_I}{M_{cr}} \quad (1)$$

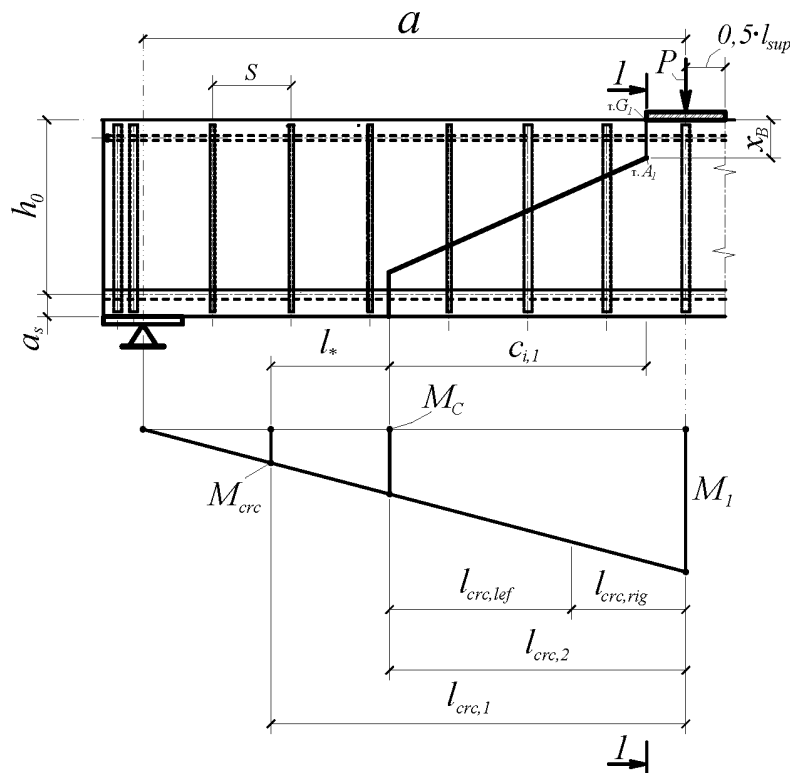


Рис. 1. К определению следующего уровня появления трещин

Отсюда следует, что

$$l_{cr,1} = \frac{a \cdot (M_I - M_{cr})}{M_I} \quad (2)$$

Для определения расстояния между трещинами второго уровня используется соотношение между изгибающим моментом в сечении I-I и в сечении с опасной наклонной трещиной, отыскиваемой по критерию максимальной ширины их раскрытия.

$$\frac{a}{a-l_{crc,2}} = \frac{M_I}{M_C}, \quad (3)$$

отсюда

$$l_{crc,2} = \frac{a \cdot (M_I - M_C)}{M_I}. \quad (4)$$

При этом, располагая напряжениями в продольной арматуре в сечении с опасной наклонной трещиной, представляется возможным также определить функциональное расстояние между трещинами l_{crc} [4]

$$l_{crc} = \frac{2(\ln B_4 - Bt_*)}{-B}, \quad (5)$$

где

$$B_4 = 1 + \frac{\sigma_{bt,c}}{(K-1)B_{3,*}v_b E_b} + \frac{\varepsilon_{bt,u}}{B_{3,*}(K-1)}; \quad (6)$$

$$B_3 = \varepsilon_s + \frac{\Delta T}{E_s A_s} - \frac{\sigma_{bt,s}}{v_b E_b} - B_2; \quad B_2 = \frac{\delta Q}{t B}; \quad (7),$$

B – параметр сцепления арматуры с бетоном, принимаемый равным

$$B = \frac{S_s \cdot G}{K \cdot A_s \cdot E_s}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{K} = 1 + 2\mu\alpha. \quad (9)$$

В выражении (9) принято

$$t = \frac{A_s E_b}{2\mu}, \quad (10)$$

где $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$, $\mu = \frac{A_s}{b \cdot h_0}$.

Необходимо отметить, что для области действительных чисел на параметр B_4 накладываются следующие ограничения

$$0 < B_4 < e^{B \cdot t_b}. \quad (11)$$

Сравнивая функциональные и уровневые значения l_{crc} , выполняют анализ возможной реализации появления последующих уровней трещинообразования.

Анализ соотношения (5) показывает, что увеличение деформаций в арматуре при росте нагрузки вызывает уменьшение расстояния между трещинами. При этом появление нового уровня трещинообразования соответствует уровню нагрузки, при котором соблюдается следующее неравенство

$$l_{crc,i} \leq \eta \cdot l_{crc,i-1}, \quad (12)$$

где η справа от опасной наклонной трещины определяется из соотношений (рис. 1)

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_I}{M_C} = \eta, \quad (13)$$

при этом

$$l_{crc,lef} + l_{crc,rig} = l_{crc,2}. \quad (14)$$

Двигаясь влево от опасной косо́й трещины, сравниваем l_{crc} функциональное и l_* (рис. 1) и в случае необходимости используем аналогичные соотношения:

$$\frac{l_{crc,lef,*}}{l_{crc,rig,*}} = \frac{M_C}{M_{crc}} = \eta_*; \quad (15)$$

$$l_{crc,lef,*} + l_{crc,rig,*} = l_*, \quad (16)$$

но за пределы участка, где $M < M_{crc}$, не выходим.

В случае наличия обрывов продольной арматуры на участке наклонных трещин соотношения (13) и (15) несколько видоизменяются, а именно, кроме отношения моментов, учитываются также отношения площадей продольной арматуры (до и после обрыва). В итоге эти формулы примут вид:

$$\frac{l_{crc,lef}}{l_{crc,rig}} = \frac{M_I}{M_C} = \frac{A_{S,lef}}{A_{S,rig}} = \eta; \quad (17)$$

$$\frac{l_{crc,lef,*}}{l_{crc,rig,*}} = \frac{M_C}{M_{crc}} = \frac{A_{S,lef,*}}{A_{S,rig,*}} = \eta_*. \quad (18)$$

При появлении последующих уровней трещинообразования уравнения (17), (18) принимают вид:

$$\frac{l_{crc,lef,i}}{l_{crc,rig,i}} = \frac{M_{rig,i}}{M_{lef,i}} = \frac{A_{S,lef,i}}{A_{S,rig,i}} = \eta_i; \quad (19)$$

$$\frac{l_{crc,lef,*i}}{l_{crc,rig,*i}} = \frac{M_{rig,*i}}{M_{lef,*i}} = \frac{A_{S,lef,*i}}{A_{S,rig,*i}} = \eta_{*i}. \quad (20)$$

Таким образом, трещинообразование продолжается до момента разрушения. При этом выделяется не один (как это принято в ряде известных методик), а несколько уровней трещинообразования:

$$\left. \begin{aligned} & l_{crc} > l_{crc,1} - \text{трещин нет;} \\ & l_{crc,1} \geq l_{crc} > l_{crc,2} - \text{первый уровень;} \\ & l_{crc,2} \geq l_{crc} > l_{crc,3} - \text{второй уровень;} \\ & \dots \dots \dots \\ & l_{crc} \geq 6t_* - \text{последний уровень.} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Расстояние между трещинами является важнейшим параметром, необходимым для определения ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях. Из физических соображений в формуле для определения ширины раскрытия трещин логично использовать уровневое (дискретное) значение l_{cr} в соответствии с неравенствами (12) и (21).

При наличии расстояний между трещинами вдоль продольной арматуры в пролете «среза» на различных уровнях их трещинообразования и усилиями в продольной арматуре в местах ее пересечения трещинами несложно перейти к определению напряжений в продольной арматуре $\sigma_{s,x}$, а также деформаций в бетоне $\varepsilon_{bt}(x)$ и относительных взаимных смещений арматуры и бетона $\varepsilon_g(x)$ в произвольном сечении x [4]. Для составления соответствующих условий равновесия вырезаемый железобетонный элемент в окрестности трещины (рис. 3) в первом приближении может рассматриваться как центрально растянутый.

Располагая уровнями трещинообразования вдоль продольной арматуры в пролете «среза», строят вероятный веер трещин первого и второго типов, прилегающий к сосредоточенной силе. Степень реализации трещин веера I (пересекут ли эти трещины поперечную арматуру, либо ее будет пересекать только опасная наклонная трещина) определяется из рассмотрения напряженно-деформированного состояния вдоль хомутов на основании расчетной схемы, приведенной на рис. 4, которая соответствует расчетной модели (рис. 2).

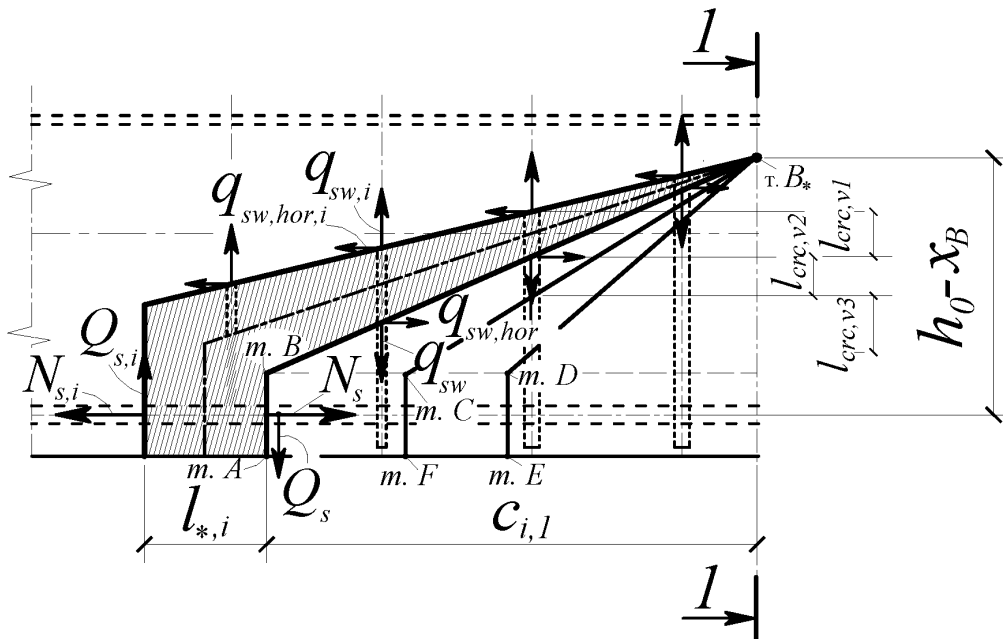


Рис. 2. Расчетная модель для определения усилий в продольной и поперечной арматуре в трещинах, образующих веер 1, прилегающий к сосредоточенной силе

Из расчетной модели (рис. 2) следует, что, располагая усилиями в продольной и поперечной арматуре в опасной наклонной трещине, несложно получить такие усилия и в соседней наклонной трещине веера I. Для заштрихованной на рис. 2 арки составляются уравнения равновесия моментов относительно точки B_* ($\sum M_{B_*} = 0$) и уравнения равновесия проекций всех сил на ось OY ($\sum OY = 0$):

$$N_{S,i}(h_0 - x_B) - N_S(h_0 - x_B) + Q_{S,i}(l_{*i} + c_{i,1}) - Q_S c_{i,1} + q_{sw,i} \cdot 0,5(l_{*i} + c_{i,1})^2 - q_{sw} \cdot 0,5c_{i,1}^2 + q_{sw,i,hor} \cdot 0,5(l_{*i} + c_{i,1})^2 - q_{sw,hor} \cdot 0,5c_{i,1}^2 = 0; \quad (22)$$

$$Q_{S,i} - Q_S + q_{sw,i}(l_{*i} + c_{i,1}) - q_{sw} \cdot c_{i,1} = 0. \quad (23)$$

В этих уравнениях неизвестными являются $N_{S,i}$ и $q_{sw,i}$. При этом $Q_{S,i}$ равняется $0,2 N_{S,i}$, а $q_{sw,i,hor}$ равняется $0,2 q_{sw,i}$.

В рассматриваемой расчетной модели в точке B_* безусловно созданы идеализированные условия (предполагаем, что площадь бетона в этой точке стремится к нулю). Однако, если даже положить, что эта площадь имеет место и в точке B_* , появится шарнирно-неподвижная опора с соответствующими реакциями $N_{B,*}$ и $Q_{B,*}$, то на моментном уравнении (22) это никак не отразится, а в уравнение проекций (23) войдет лишь $Q_{B,*}$. При этом, учитывая, что поперечная сила в сечении I-I распределяется большей своей частью над наклонной трещиной и под наклонной трещиной, то ее часть, прилегающая к окрестности точки B_* , будет весьма незначительной, что вполне оправдывает принятую расчетную модель (рис. 2).

Последовательно перемещаясь от одной трещины к другой, используемая расчетная модель (рис. 2) позволяет определить усилия в продольной и поперечной арматуре в любой трещине из веера I из уравнений, аналогичных уравнениям (21) и (22).

Следует заметить, что расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ вдоль поперечной арматуры между наклонными трещинами первого, второго и третьего типов (рис. 4) железобетонной составной конструкции может быть значительно упрощена применительно к трещинам первого и второго типов в соответствии с рис. 5. При составлении соответствующих условий равновесия вырезаемый железобетонный элемент в окрестности трещины в первом приближении может рассматриваться как центрально растянутый стержень.

Допускается учет лишь средних касательных напряжений в поперечных сечениях между соответствующими трещинами, вырезающими блок S между хомутами. Эпюры касательных напряжений применительно

к сечению I–I для железобетонных составных конструкций приведены на рис. 6. Аналогичные эпюры могут быть использованы и в поперечных сечениях в зоне веера I (в зоне наклонных трещин первого и второго типов) при вырезании блоков S между соответствующими хомутами.

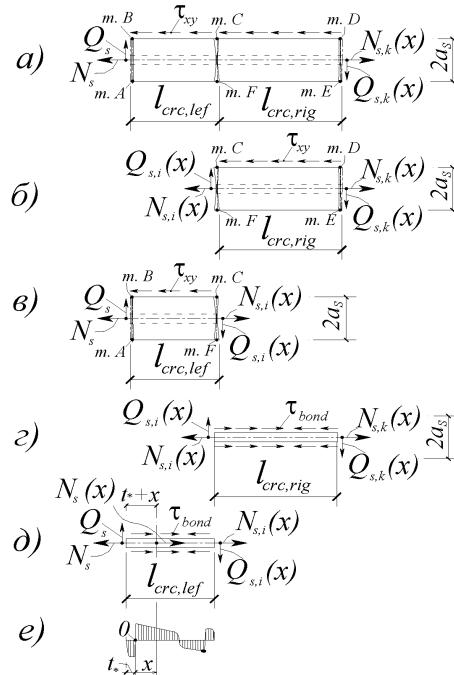


Рис. 3. К составлению условий равновесия для определения деформаций растянутого бетона между трещинами и равновесия продольного арматурного стержня для соответствующего уровня образования трещин

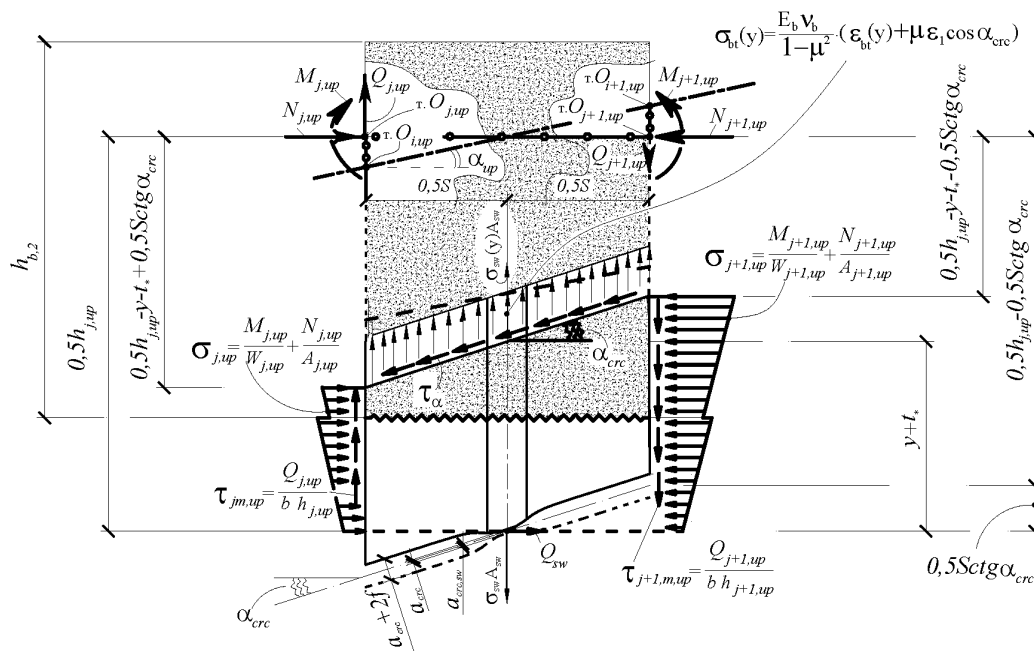


Рис. 4. Расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $\epsilon_{bt}(y)$ между наклонными трещинами первого, второго и третьего типов в железобетонной составной конструкции

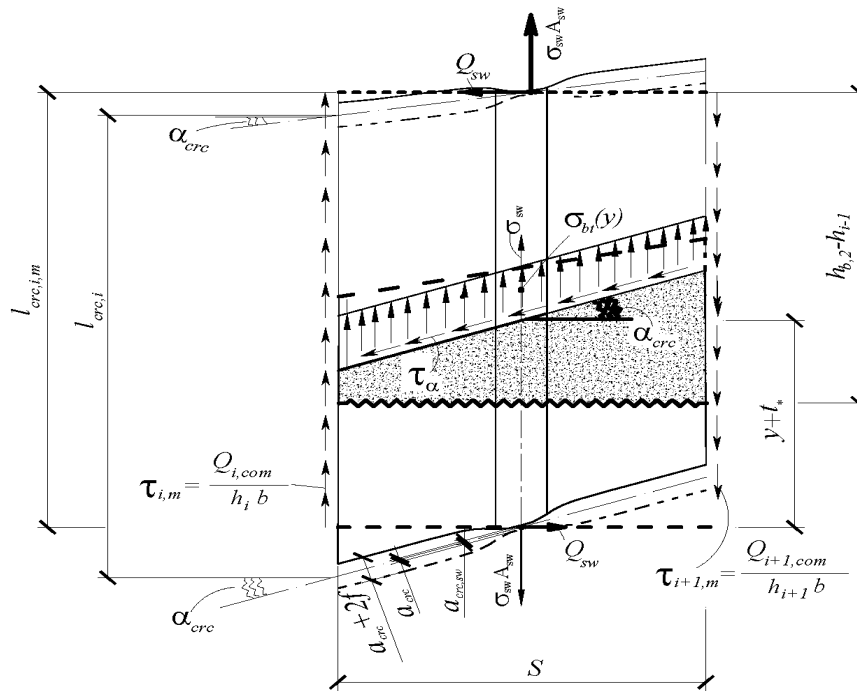


Рис. 5. Упрощенная расчетная схема к определению деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ между наклонными трещинами первого и второго типов в железобетонной составной конструкции

Следует заметить, что наклонная трещина, пересекающая поперечное сечение, рассматривается в этом сечении так же, как шов между бетонами. При этом жесткость этого шва определяется с учетом напряженно-деформированного состояния пересекаемой арматуры в этой трещине. Если поперечное сечение пересекает несколько трещин, то на эпюре τ будет иметь место не один скачок с $\Delta\tau_b$ (как это имеет место на рис. 6), а несколько скачков с $\Delta\tau_{b,i}$.

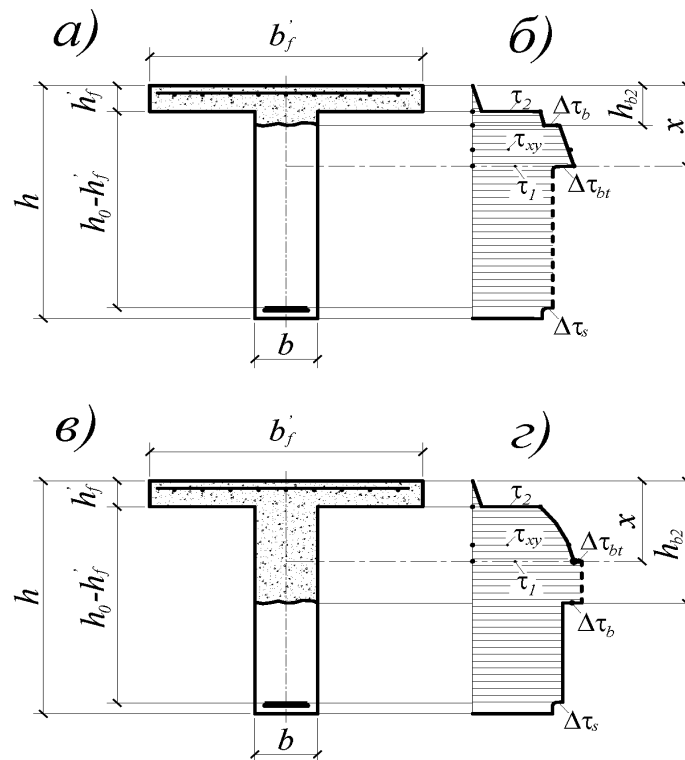
В итоге общий алгоритм расчета сводится к следующему:

1. В соответствии с разработанной методикой определяют параметры напряженно-деформированного состояния опасной наклонной трещины по критерию их наибольшей ширины раскрытия.

2. Вычисляют функциональное значение l_{crc} по формуле (5). Затем, пользуясь соотношениями (13) – (20) и неравенствами (12), (21), находят уровневое значение l_{crc} .

3. В пролете «среза» железобетонного составного стержня наносится вероятный веер I наклонных трещин первого и второго типов.

4. Проверяется реализация веера I (пересекает ли трещина этого веера поперечную арматуру) с использованием предложенной расчетной модели для определения усилий в продольной и поперечной арматуре в трещинах и расчетной схемы для определения деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ между наклонными трещинами первого и второго типов в железобетонных составных конструкциях.



**Рис. 6. Поперечные сечения (а, в) и упрощенные эпюры касательных напряжений (б, г) в зоне наклонных трещин первого и второго типов для железобетонных составных конструкций:
а, б – случай 1; в, г – случай 2**

Выводы. В итоге представляется возможным получение полного напряженно-деформированного состояния и картины трещинообразования с учетом их истории (количество уровней трещинообразования) в пролете «среза» железобетонных составных конструкций.

Литература

1. Голышев, А.Б. Сопротивление железобетона: монография / А.Б. Голышев, В.И. Колчунов. – К. : Основа, 2009. – 432 с.
2. К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным сечениям / [Х.З. Баширов, А.А. Дородных, В.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Н.В. Усенко] // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 6(245). – С. 2 – 7.
3. Усенко, Н.В. Образование наклонных трещин третьего типа в железобетонных составных конструкциях / Н.В. Усенко, И.А. Яковенко, В.И. Колчунов // Будівництво України. – 2013. – Вип. 2. – С. 24 – 28.
4. Колчунов, В.И. Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций / В.И. Колчунов, И.А. Яковенко // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2009. – № 4(21). – С. 160 – 163.

Надійшла до редакції 25.10.2013
© В.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Н.В. Усенко