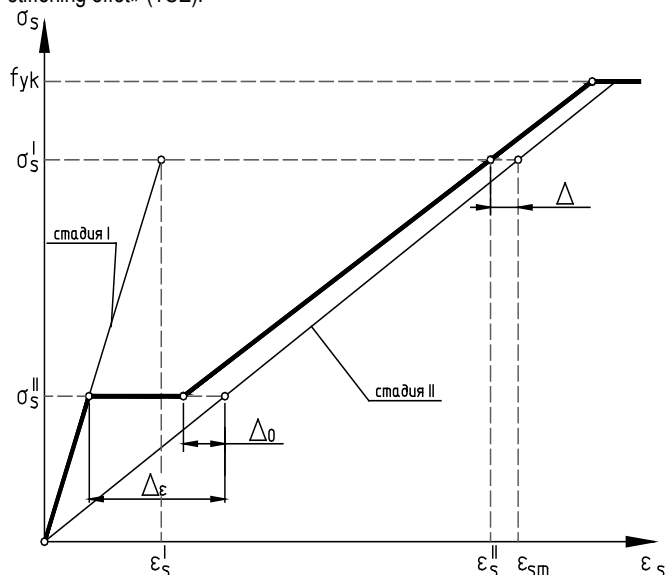


## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Введение.** В настоящее время железобетон остается одним из наиболее востребованных строительных материалов. Вместе с тем, наличие трещин в эксплуатируемых железобетонных конструкциях является весьма распространенным явлением. Образование трещины в железобетонном элементе может произойти еще задолго до начала его эксплуатации, на стадии формирования структуры материала. Причиной возникновения такого рода трещин являются физико-химические процессы, протекающие при твердении цементного камня (см. табл.1). Исключение или же уменьшение влияния трещин, обусловленных условиями твердения, осуществляется технологическими мероприятиями на стадии проектирования составов бетонной смеси и выбора рациональных методов укладки и формирования конструкций. Наиболее опасными являются так называемые силовые трещины, возникновение которых является причиной перегрузки элементов конструкций. Их образование и чрезмерное раскрытие приводит к снижению жесткости конструкции (увеличению прогибов), уменьшению долговечности (сколы защитного слоя бетона, коррозия стальной арматуры), ухудшению эстетического восприятия конструкции, что в целом снижает эксплуатационную пригодность конструкции. Помимо всего этого, образование трещины приводит к качественному изменению напряженно-деформированного состояния не только непосредственно вблизи берегов трещины, но всего элемента в целом. На основании всего вышеперечисленного в настоящее время особую актуальность приобретают исследования, направленные на развитие и совершенствование теории и методов расчета железобетонных конструкций.

**1. Механизм взаимодействия арматуры и бетона в растянутых элементах.** Предлагаемая расчетная модель строится на гипотезе о совместном восприятии внешнего усилия арматурой и бетоном. Очевидно, что в сечении с трещиной вся прикладываемая к элементу нагрузка будет восприниматься исключительно арматурным стержнем. По мере удаления от указанного сечения к центру элемента, часть усилия, воспринимаемого арматурой, за счет сил сцепления, возникающих в контактном слое, передается на окружающий бетон. Таким образом, бетон постепенно включается в работу на растяжение и тем самым разгружает арматурный стержень. Восприятие бетоном части растягивающего усилия приводит к повыше-

нию жесткости  $\Delta$  (уменьшению деформативности) растянутого железобетонного элемента по сравнению с жесткостью отдельного арматурного стержня (рис. 1). Данный эффект принято называть «tension stiffening effect» (TSE).



**Рис. 1.** Диаграмма деформирования арматуры для центрально растянутого железобетонного элемента [4]:

*I* – диаграмма, описывающая работу арматурного стержня, при допущении, что стержень работает совместно с бетоном без образования трещин в последнем; *II* – диаграмма деформирования отдельного арматурного стержня

В некотором сечении по длине элемента деформации арматуры и бетона становятся равными  $\varepsilon_s = \varepsilon_{ct}$ , и каждый из компонентов сечения (бетон и арматура) воспринимает усилие, соответствующее его жесткости, часть внешней нагрузки. Следовательно, напряженно-деформированное состояние растянутого железобетонного элемен-

**Таблица 1.** Классификация трещин в бетонных и железобетонных конструкциях [5]

№ п/п	Причины возникновения трещин	Характеристика трещин	Время возможного возникновения
1	2	3	4
1	Осадка бетонной смеси	продольные трещины вдоль и над арматурой	в течение первых часов после бетонирования
2	Пластическая усадка	беспорядочно расположенные, поверхностные трещины	в течение первых часов после бетонирования
3	Выделение энергии гидратации	поверхностные и нормальные трещины	в течение первых дней после бетонирования
4	Усадка	поверхностные и нормальные трещины	от нескольких недель до месяцев
5	Внешние температурные воздействия	поверхностные и нормальные трещины, трещины вдоль арматуры	на всем протяжении эксплуатации конструкции
6	Изменение условий опирания конструкции	нормальные, наклонные трещины	при изменении условия опирания конструкции
7	Внешняя нагрузка	нормальные, наклонные трещины	на всем протяжении эксплуатации конструкции
8	Коррозия арматуры	трещины вдоль арматуры	после нескольких лет эксплуатации конструкции

**Драган Алексей Вячеславович**, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

та неоднородно по длине, и в общем случае, можно однозначно выделить два участка, с позиции взаимодействия арматуры с бетоном. К первым относятся участки, расположенные у краев элемента, а при наличии в железобетонном элементе нормальных трещин и непосредственно у берегов трещин – это так называемые зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном. Данные участки характеризуются разницей в величинах деформаций компонентов сечения, которая выражается в проскальзывании арматурного стержня относительно бетона. Ко второй группе относятся центральные участки, на которых наблюдается совместное деформирование арматуры и бетона ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{ct}$ ) (рис. 4).

Величины первых из выделенных нами участков играют решающую роль в механизме трещинообразования железобетонного элемента и полностью определяют его основные параметры – ширину раскрытия трещин ( $W_k$ ) и расстояние между трещинами ( $l_{cr}$ ). Данный параметр аккумулирует в себе влияние на процесс образования трещин основных факторов. Так, достаточно очевидным и не требующим, на наш взгляд, дополнительных доказательств является тот факт, что при лучших условиях сцепления (которые определяются профилем арматуры, прочностью бетона и арматуры) длина зон перераспределения будет уменьшаться; что увеличение коэффициента армирования (соответственно увеличение контакта арматуры с бетоном) также приведет к уменьшению данной длины и т.д.

**2. Основные предпосылки и допущения, принятые в модели.** Процесс трещинообразования в элементах железобетонных конструкций – явление достаточно сложное и зависящее от большого числа факторов, таких как:

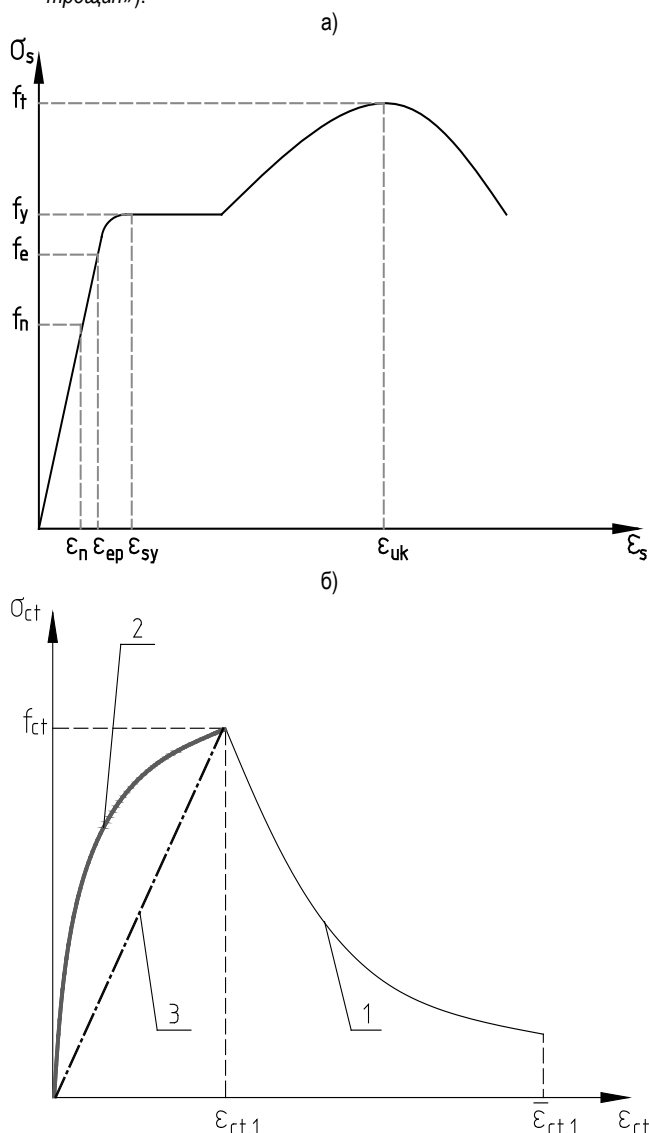
- параметры арматуры (диаметр, количество стержней, профиль, состояние поверхности, механические свойства арматурной стали ( $f_{yk}, E_s$ ));
- параметры бетона (прочность бетона на растяжение ( $f_{ctm}$ ), модуль упругости бетона ( $E_{cm}$ ), возраст бетона);
- длина железобетонного элемента и параметры сечения (площадь поперечного сечения ( $A_c$ ), расположение арматуры в сечении, коэффициент армирования ( $\rho$ ));
- напряженно-деформированное состояние железобетонно элемента и т.д.

Учет всех факторов и параметров, определяющих механизм трещинообразования, не возможен без привлечения ряда гипотез, допущений и предпосылок. В предлагаемой аналитической модели приняты следующие предпосылки:

- к рассмотрению принимается цилиндрический железобетонный элемент, армированный одним арматурным стержнем, который располагается в центре сечения (центрально армированный железобетонный элемент);
- процесс трещинообразования рассматривается для случая центрального растяжения;
- внешняя нагрузка прикладывается непосредственно к арматуре;
- механические свойства (прочностные и деформативные) арматуры принимаются в соответствии с принятой диаграммой деформирования (рис. 2,а). В аналитической модели рассматривается работа арматуры в упругой стадии;
- прочностные характеристики бетона принимаются в соответствии с диаграммой деформирования бетона на растяжение (рис. 2,б), при этом могут использоваться три варианта диаграмм: полная диаграмма; только восходящая ветвь диаграммы; линейная аппроксимация диаграммы деформирования (хрупкое разрушение при достижении предельной растяжимости бетона). Выбор в пользу полной диаграммы деформирования, очевидно, приведет более точному описанию механизма трещинообразования и влиянию на него работы растянутого бетона. Однако при этом значительно усложняется процедура расчета. Кроме того, необходимо отметить, что до настоящего времени не сложилось единого мнения, как об аналитическом описании полной диаграммы деформирования бетона при растяжении, так и о значениях ее параметрических точек. Таким образом, в пользу диаграмм деформирования, описываемых лишь восходящей ветвью

(криволинейной или прямолинейной), могут быть приведены следующие аргументы [1, 3]:

- ✓ отсутствие нормализованного методического подхода при определении полных диаграмм деформирования;
- ✓ неопределенность в выборе класса конструкций, где возможна работа бетона в расчетном сечении во всем диапазоне диаграммы деформирования, включающем и нисходящую ветвь;
- прочность сцепления арматуры с бетоном, характеризуется величиной условных касательных напряжений сцеплений, определяемых исходя из принятого закона, описывающего зависимость касательных напряжений от величины взаимных смещений арматуры и бетона:  $\tau_{bi} = f(\delta_{si})$ ;
- разрушение бетона (образование трещины) происходит при достижении относительными деформациями бетона значения, соответствующего величине предельной растяжимости бетона ( $\bar{\varepsilon}_{ct1}$ ) («деформационный критерий образования нормальных трещин»).



**Рис. 2.** Диаграммы деформирования материалов:  
 а) диаграмма деформирования арматурной стали [4];  
 б) диаграммы деформирования бетона при осевом растяжении:  
 (1 – полная диаграмма; 2 – диаграмма, описываемая восходящей ветвью; 3 – линейная)

**3. Основные положения аналитической модели.** Остановимся более подробно на рассмотрении основных положений предлагаемой аналитической модели. Для этого рассмотрим центрально

армированный железобетонный элемент длиной  $L$ , м, к которому приложено растягивающее усилие  $N_{cr}$ , кН. При этом возможны два варианта перераспределения усилий между арматурой и бетоном:

**Вариант 1.** Длина зоны перераспределения усилий  $l_1 \leq L/2$ .

Данный случай может наблюдаться при относительно плохих условиях сцепления арматуры, в частности для гладкой арматуры. В таком случае зоны перераспределения усилий «перехлестываются» – образование трещин невозможно, происходит проскальзывание арматурного стержня по всей длине элемента.

**Вариант 2.** Длина зоны перераспределения усилий  $l_1 < L/2$

(рис. 4,а). Для данного случая можно однозначно установить протяженности всех, выделяемых нами зон (рис. 4,а). В соответствии с принятым деформационным критерием, первая трещина может образоваться в области наибольших относительных деформаций бетона, т.е. в пределах участка II (рис. 4,б). Очевидно, что если после образования первой трещины сохранились области совместного деформирования ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{ct}$ ), то возможно образование новых трещин. Как только зоны перераспределения усилий  $l_1$  «перехлестнутся», образование новых трещин произойти не может (рис. 4,в). Во всех точках по длине элемента наблюдается разница в деформациях арматуры и бетона, которая результируется в смещениях арматуры относительно бетона (проскальзывании). Таким образом, железобетонный элемент находится в *стадии установившегося трещинообразования*, которая характеризуется следующими признаками:

- образование новых трещин не происходит;
- во всей длине наблюдается проскальзывание арматуры относительно бетона;
- увеличение внешней растягивающей нагрузки приводит к росту ширины раскрытия трещин.

На основании всего вышесказанного, можно утверждать, что расстояние между трещинами в стадии установившегося трещинообразования находится в следующих пределах:

$$l_1 \leq l_{cr} < 2 \cdot l_1, \quad (1)$$

где  $l_1$  – длина участка проскальзывания арматуры относительно бетона;

$l_{cr}$  – расстояние между трещинами в стадии установившегося трещинообразования.

При выводе зависимости, пригодной для расчета ширины раскрытия трещины, рассмотрим фрагмент эпюры распределения относительных деформаций арматуры ( $\varepsilon_s$ ) и растянутого бетона ( $\varepsilon_{ct}$ ) на участке вблизи сечения с трещиной (рис. 3). Ширина раскрытия трещины, нормальной к продольной оси растянутого железобетонного элемента, в общем случае складывается из:

- накопленных взаимных смещений (проскальзывания) арматуры и бетона в пределах зон перераспределения;
- собственных деформаций арматуры, вызванных приложением к ней растягивающей нагрузки.

В общем виде ширина раскрытия трещины составит:

$$w_k = \int_0^{l-l_1} \varepsilon_s(x) dx + \int_{l-l_1}^l \delta(x) dx, \quad (2)$$

где  $\delta(x)$  – функция, описывающая распределение проскальзывания по длине:

$$\delta(x) = \varepsilon_s(x) - \varepsilon_{ct}(x). \quad (3)$$

Следовательно, можно записать:

$$w_k = \int_0^{l-l_1} \varepsilon_s(x) dx + \int_{l-l_1}^l (\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)) dx. \quad (4)$$

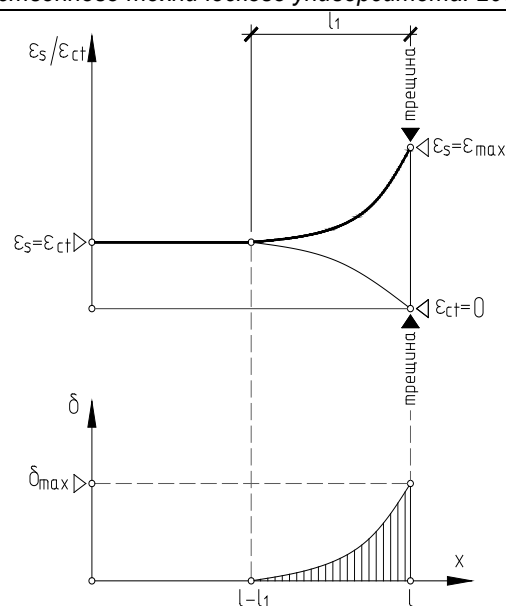


Рис. 3. К выводу зависимости для расчета ширины раскрытия трещины

Таким образом, единственным вопросом, который остается открытым – каким же образом определить длину зоны перераспределения усилий между арматурой и бетоном  $l_1$  (длину зоны проскальзывания)? Для определения длины зоны проскальзывания может быть предложен следующий расчетный алгоритм.

Предположим, что для центрально армированного железобетонного элемента необходимо определить длину участка перераспределения усилий между арматурой и окружающим ее бетоном  $l_1$ . Так как данная величина интересует нас с точки зрения трещинообразования, то будем рассматривать случай, при котором прикладываемое к железобетонному элементу усилие равняется усилию трещинообразования  $N_{cr}$ , величину которого можно определить из следующего выражения:

$$N_{cr} = \varepsilon_s \cdot A_s \cdot E_s + \varepsilon_{ct.1} \cdot A_{c,netto} \cdot E_{ctm} = \varepsilon_{ct.1} \cdot A_{c,netto} \cdot E_{ctm} (1 + \rho \cdot \alpha), \quad (5)$$

где  $\alpha = \frac{E_s}{E_{ct}}$  – отношение модулей упругости;

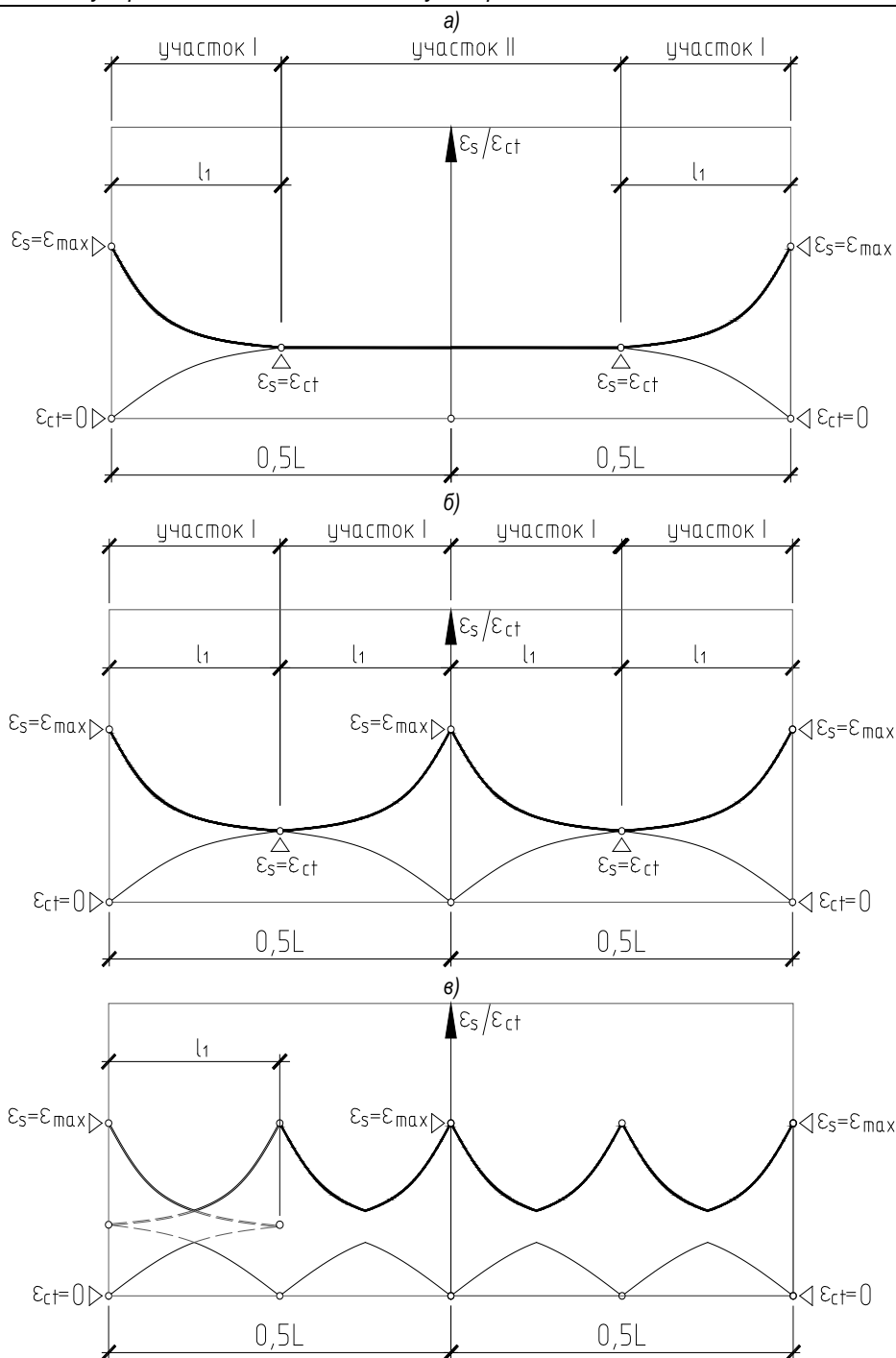
$\rho = \frac{A_s}{A_{c,netto}}$  – коэффициент армирования сечения;

$\varepsilon_{ct.1}$  – относительные деформации бетона, соответствующие ее предельной растяжимости.

Предположим, что в некоторой точке, удаленной на расстоянии  $l_1$  от края элемента (искомая величина) относительные деформации арматуры и бетона выравниваются, т.е.  $\varepsilon_s = \varepsilon_{ct.1}$ . Примем данное сечение за начало координат, назовем локальную ось  $ox$  вдоль оси арматурного стержня. Разделим зону передачи усилия на  $n$  равных отрезков длиной  $\Delta x$ , с номерами концов отрезков  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ . В соответствии с описанным механизмом перераспределения усилий между арматурой и окружающим ее бетоном, на каждом элементарном участке длиной  $\Delta x$  имеет место некоторое приращение относительных деформаций арматуры  $\Delta \varepsilon_{s,i}$ , и, соответственно, определенный спад относительных деформаций бетона  $\Delta \varepsilon_{ct,i}$  (рис. 5):

$$\varepsilon_{s,i} = \varepsilon_{s,i-1} + \Delta \varepsilon_{s,i}; \quad \varepsilon_{ct,i} = \varepsilon_{ct,i-1} - \Delta \varepsilon_{ct,i}. \quad (6)$$

Разница в относительных деформациях арматуры и бетона на каждом элементарном отрезке выражается во взаимных смещениях арматуры и бетона, величина которых определяется следующим кинематическим выражением:



**Рис. 4.** Распределение относительных деформаций арматуры и бетона по длине: а) до образования трещин; б) после образования первой трещины; в) в стадии установившегося трещинообразования

$$\delta_{s i} = X \cdot (\varepsilon_{s i} - \varepsilon_{c t i}), \quad (7)$$

$$\tau_{b i} = f(\delta_{s i}). \quad (9)$$

где  $X$  – расстояние от начала координат до соответствующей точки, в которой определяется смещение арматуры относительно бетона.

Зная относительные деформации арматуры и бетона на концах элементарных отрезков, в соответствии с диаграммами деформирования материалов (рис. 2), в указанных точках определяются значения напряжений:

$$\sigma_{s i} = f(\varepsilon_{s i}); \quad \sigma_{c t i} = f(\varepsilon_{c t i}). \quad (8)$$

Распределение касательных напряжений при проскальзывании определяется исходя из принятого закона, описывающего зависимость касательных напряжений от величины взаимных смещений арматуры и бетона:

Для каждого элементарного участка длиной  $\Delta X$  условия равновесия записываются для арматуры и бетона по отдельности (рис. 7):

$$\Delta_1 i = \sigma_{s i} - \sigma_{s i-1} - \Delta X \cdot \frac{\tau_{b i} + \tau_{b i-1}}{2} \cdot \frac{4}{\varnothing_s} = 0, \quad (10)$$

$$\Delta_2 i = \sigma_{c t i-1} - \sigma_{c t i} - \Delta X \cdot \frac{\tau_{b i} + \tau_{b i-1}}{2} \cdot \frac{4 A_s}{\varnothing_s A_{c t, netto}} = 0. \quad (11)$$

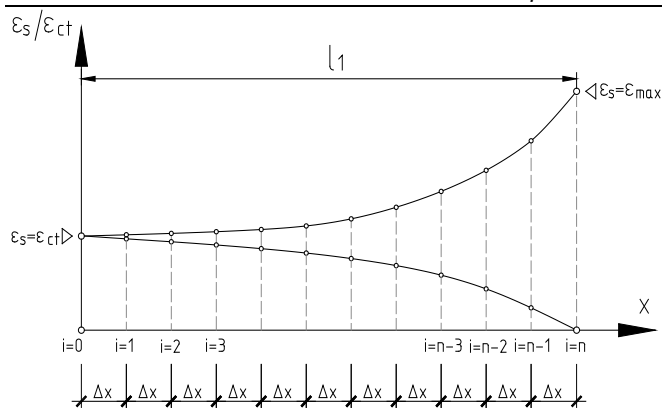


Рис. 5. К алгоритму расчетной модели

Для реализации записанного в выражениях (6)-(11) алгоритма необходимо для каждого элементарного участка в первом приближении задаваться значениями параметров  $\Delta \epsilon_{s i}$  и  $\Delta \epsilon_{ct i}$ . Затем поэтапно определить все величины, необходимые для составления условий равновесия (10) и (11). В случае если  $\Delta_1 i \neq 0$  либо  $\Delta_2 i \neq 0$ , то необходимо произвести уточнение принятых значений  $\Delta \epsilon_{s i}$  и  $\Delta \epsilon_{ct i}$ , и заново выполнить все этапы расчета. Данная процедура производится до тех пор, пока не будут найдены такие величины  $\Delta \epsilon_{s i}$  и  $\Delta \epsilon_{ct i}$ , которые обращают выражения (11) и (12) в нуль. Затем переходят к следующему отрезку, и все процедуры алгоритма выполняются заново.

Для определения значений параметров  $\Delta \epsilon_{s i}$  и  $\Delta \epsilon_{ct i}$  может использоваться один из методов приближенного вычисления действительных корней уравнений.

Процедуры, входящие в алгоритм, следует выполнять до тех пор, пока не будет найдена точка, в которой деформации бетона достигнут нулевого значения, при этом деформации арматуры примут максимальное значение, т.е.:

$$\begin{cases} \epsilon_{ct i} = 0; \\ \epsilon_{s i} = \epsilon_s \max = \frac{N_{crc}}{A_s \cdot E_s}. \end{cases} \quad (12)$$

В выражениях (12) записаны деформации, соответствующие деформациям арматуры и бетона в крайнем сечении элемента. Расстояние  $l_1$  от начала координат в т.О ( $\epsilon_s = \epsilon_{ct}$ ), до точки, в

которой выполняются условия (12) соответствуют длине зоны проскальзывания:

$$l_1 = n \cdot \Delta x. \quad (13)$$

Следует отметить, что в результате выполнения всех процедур расчетной модели, для принятого уровня нагружения, помимо длины зоны перераспределения могут быть получены эпюры изменения по длине следующих параметров:

- относительных деформации бетона и арматуры;
- внутренних усилий в арматуре и бетоне, вызванных действием внешней нагрузки;
- напряжений в арматуре и бетоне;
- касательных напряжений сцепления;
- взаимных смещений арматуры и бетона (проскальзывания).

Все описанные выше процедуры предлагаемой аналитической модели представлены в виде блок-схемы (рис. 7, см. стр. 33).

**Заключение.** Представленная аналитическая модель, учитывая эффект «tension-stiffening», позволяет моделировать механизм образования трещин в растянутых железобетонных элементах. Использование модели дает возможность однозначно определить напряженно-деформированное состояние арматуры и бетона по всей длине растянутого элемента. С помощью модели можно достоверно определить такие параметры трещинообразования как:

- момент образования трещины;
- ширину раскрытия трещины на различных стадиях нагружения элемента;
- расстояние между нормальными трещинами;
- а также определить предельное состояние, при котором образование новых трещин не происходит.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Бабич Е.М., Крусъ Ю.А. К вопросу построения диаграмм деформирования бетона и расчета прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов // Перспективы развития новых технологий в строительстве. – Брест, 2000. – с.94–100.
2. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М.: Издательство «Наука», 1968. – 551с.
3. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформативность бетона в расчетах конструкций. – Брест, 2003. – 250с.
4. Тур В.В., Пецольд Т.М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования. – Брест, Издательство БГТУ, 2003. – 379с.
5. Zement-Merkblatt. Begrenzung der Rissbildung in Stahlbeton- und Spannbetonbau. – Deutscher Beton-Verein e.V., Weisbaden, 1996 – 6р.

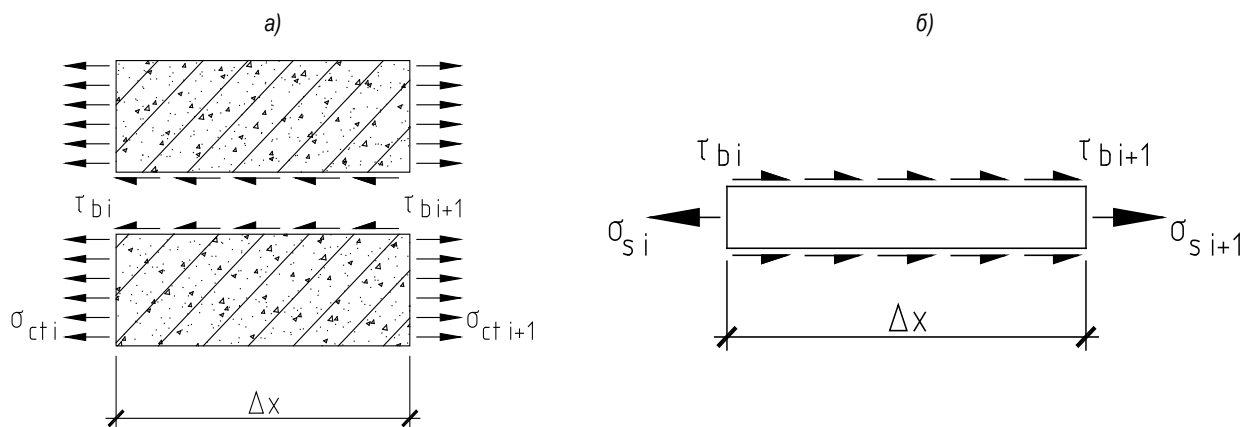


Рис. 6. К составлению условий равновесия на элементарном участке Δx: а) для бетона; б) для арматуры

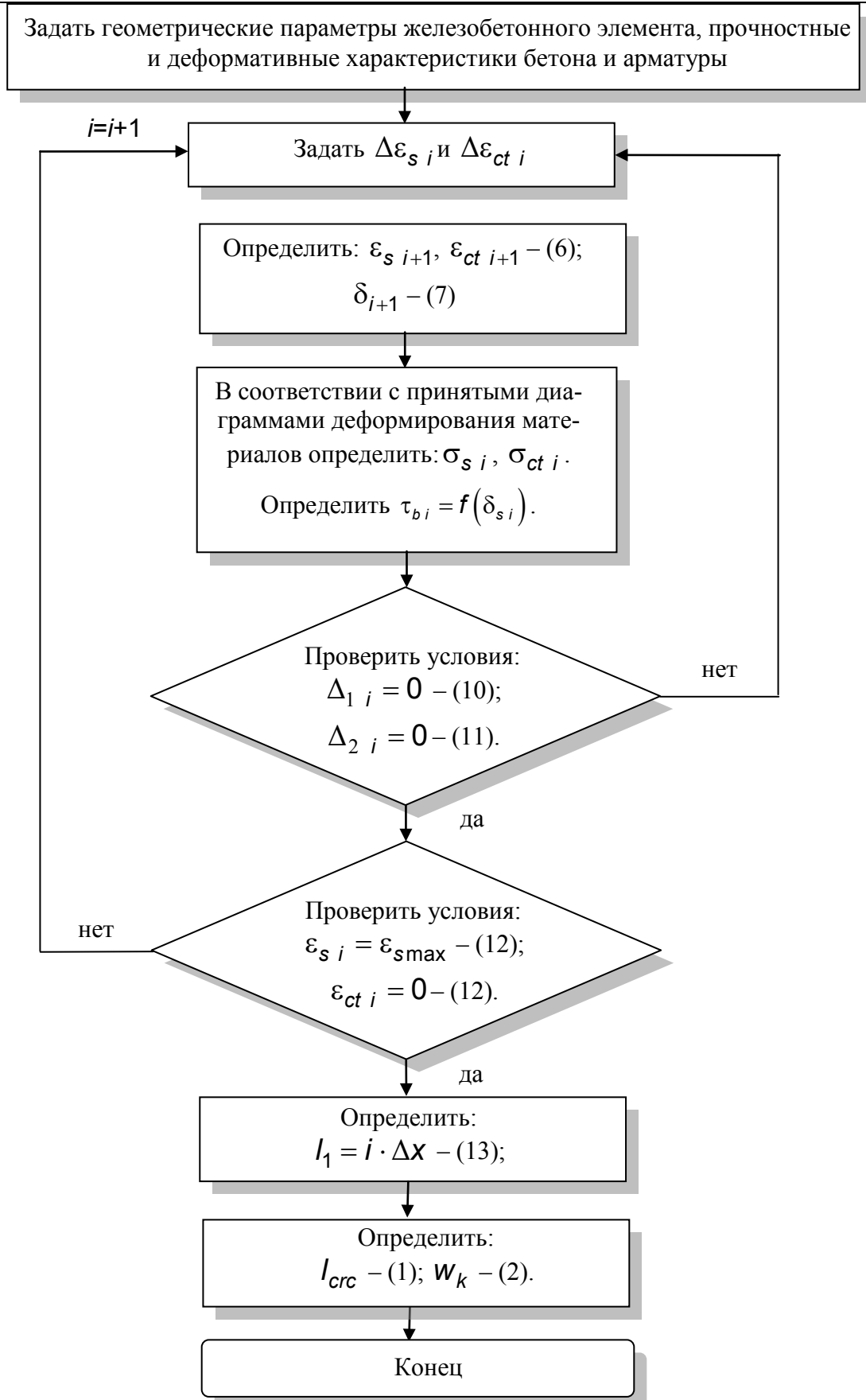


Рис. 7. Блок-схема к алгоритму расчета согласно предлагаемой расчетной модели

**DRAGAN A.V. Analytical model for cracking behaviour of RC- tension-element simulation**

In this paper, an analytical model which can simulate cracking behavior and tension stiffening effect in reinforced concrete tension member is proposed. Using of this model gives the possibility to determine the reinforcement and concrete deflected mode along the whole length of tension-element. According to proposed model such parameters of cracking as a moment of crack formation, crack opening on the different loading stages, crack spacing can be defined.

УДК 624.012.46

**Драган А.В.**

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Введение.** Несмотря на значительный объем экспериментальных исследований, выполненных за многолетний период изучения железобетона, к настоящему времени не сформирован общепринятый методологический подход исследования процесса трещинообразования в железобетонных элементах и оценке сопротивления растянутого бетона на участках между трещинами. В этой связи, при сопоставлении и анализе результатов должно учитываться, что они были получены при использовании различных экспериментальных методик (а это означает, что в опытах использовались образцы различных форм и размеров, применялись различные способы их изготовления и хранения, испытания производились при различных режимах нагружения, отличными являются и методы измерений).

В основу предлагаемой методики положена следующая концепция – трещинообразование в железобетонных элементах определяется и зависит от условий взаимодействия арматуры с бетоном и от напряженно-деформированного состояния в зоне их контакта. В большинстве известных методик для оценки трещиностойкости железобетонных элементов используются параметры, которые достаточно просто регистрируются в процессе проведения испытаний:

- расстояние между трещинами в стадии установившегося трещинообразования [1];
- ширина раскрытия трещины на поверхности элемента [1, 2];
- продергивание арматурного стержня относительно бетона торцевой грани элемента [2];
- уровень нагружения,

и на основании полученных данных выдвигаются гипотезы о механизмах взаимодействия арматуры с бетоном. В предлагаемой методике производится попытка зарегистрировать причинные процессы и явления, следствием которых являются все перечисленные ранее параметры.

**Описание предлагаемой методики применительно к исследованию трещиностойкости железобетонных элементов.** Для исследования трещиностойкости железобетонных элементов в предлагаемой методике испытаний в качестве экспериментальных образцов используются бетонные цилиндры ( $\varnothing = 200 \text{ мм}$ ,  $L = 1000 \text{ мм}$ ), армированные одиночным арматурным стержнем ( $\varnothing_s = 20 \text{ мм}$ ), расположенным в центре сечения. Длина арматурного стержня составляет  $l_s = 2000 \text{ мм}$ , таким образом, длина выпусков арматуры из бетона с обеих сторон составляет 500 мм. Выбор в пользу указанного диаметра арматурных стержней был произведен исходя из необходимости их дальнейшей доработки:

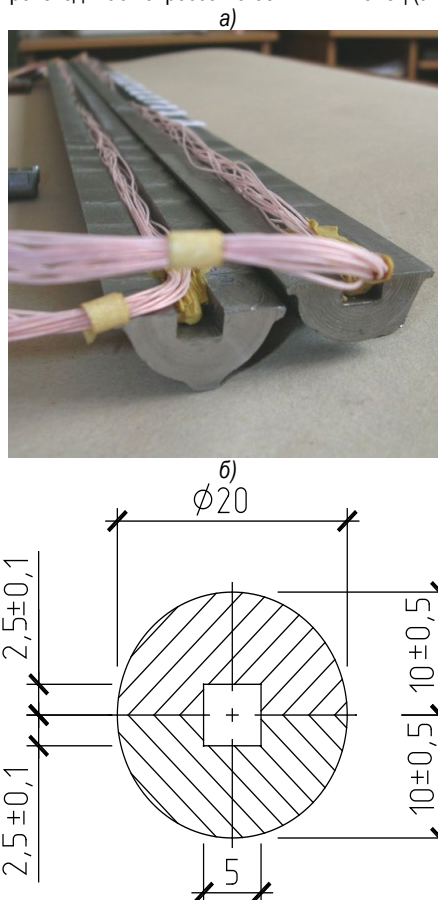
- стержни фрезеровались вдоль до размера  $\frac{\varnothing_s}{2} \pm 0,5 \text{ мм}$ ;
- в каждой из оставшихся после фрезеровки частей пропиливался продольный паз глубиной 2,5 мм и шириной 5,0 мм с чистотой поверхности Rz 20 (рис. 1).

К недостатку подобного технического решения однозначно можно отнести то, что изготовление паза приводит к ослаблению поперечного сечения стержня. Однако необходимо отметить, что размеры поперечного сечения пазов принимались минимально возможными для обеспечения прокладки проводов от тензорезисторов к измерительной аппаратуре. При этом, величина ослабления для стержней  $\varnothing_s = 20 \text{ мм}$  составляет 7-8% от площади поперечно-

го сечения стержня, что дает возможность проведения испытаний в достаточно большом диапазоне нагрузок. При выполнении паза внутри арматуры не нарушаются форма и параметры поверхности стержня, что позволяет обеспечить реальные условия его зацепления, а, следовательно, и условия работы арматуры с бетоном.

Для регистрации деформаций арматурного стержня по длине его заделки использовались тензорезисторы с базой 5,0 мм, которые наклеивались с шагом 50 мм. Таким образом, каждый арматурный стержень оборудовался 41 тензорезистором. Используемые в эксперименте тензорезисторы позволяют измерять относительные деформации в диапазоне от  $-3000 \cdot 10^{-6}$  до  $+3000 \cdot 10^{-6}$ . Схема наклейки тензорезисторов приведена на рис. 2. Для герметизации пазов и исключения возможного попадания влаги на тензорезисторы при бетонировании, вся полость паза заполнялась силиконом.

Для обеспечения совместной работы двух половин составного арматурного стержня после затвердевания силикона предусматривается их склеивание при помощи клея на эпоксидной основе, обеспечивающего высокую прочность клеевого шва ( $\sim 20 \text{ Н/мм}^2$ ). Для дополнительной фиксации половин составного стержня, а также для последующего крепления его в испытательном стенде, на каждом его конце производилась опрессовка обжимных колец (анкеров).



**Рис. 1.** Составной арматурный стержень:

а) половины стержня с наклеенными тензорезисторами; б) поперечное сечение