

УДК 666.972:691.620.192

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-65-71](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-65-71)

К РАСЧЕТУ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА С ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

TO THE CALCULATION OF CONCRETE STRUCTURES WITH POLYMER COMPOSITE REINFORCEMENT

Т. А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук

Рассмотрены вопросы расчета конструкций из бетона, армированных полимерной композитной арматурой. Представлены предложения по нормированию относительных деформаций в базовой точке двухлинейной диаграммы бетона при осевом растяжении, используемой для расчета железобетонных элементов по второй группе предельных состояний. Даны рекомендации по назначению коэффициента, учитывающего неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения элементов при расчете момента образования трещины. Представлены предложения по расчету переармированных конструкций таврового или двутаврового сечений с полкой в сжатой зоне и по подбору рабочей арматуры таких конструкций.

Ключевые слова:

Конструкции, методы расчета, момент образования трещин, полимерная композитная арматура, свойства бетона

The issues of calculation of concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement are considered. The paper presents proposals for the normalization of relative deformations at the base point of a two-line diagram of concrete under axial tension, used for calculating reinforced concrete elements for the second group of limit States. Recommendations on a coefficient that takes into account the inelastic properties of concrete of the stretched section zone of elements when calculating the moment of crack formation are given. The paper presents proposals for calculating perforated structures of t-shaped or l-shaped cross-sections with a shelf in the narrow zone and for selecting the working armature of such structures.

Key words:

Calculation methods, concrete properties, polymer composite reinforcement, moment of crack formation, structures

В статье изложены результаты НИР по совершенствованию метода расчета момента образования трещин в нормальных сечениях конструкций с полимерной композитной арматурой (АКП), выполненной НИИЖБ им. А. А. Гвоздева в 2019 году.

Актуальность выполнения такой работы была вызвана следующим. Действующие нормы проектирования СП 295.1325800-2017 [1] при расчете армированных АКП конструкций по образованию трещин в нормальном к продольной оси сечении требуют учитывать неупругие свойства бетона в растянутой зоне сечения. При этом, как и для железобетонных конструкций, нормы допускают учитывать нелинейные свойства бетона, используя двухлинейную диаграмму осевого растяжения бетона, а для элементов с прямоугольной и тавровой формами сечения – упрощенным способом, с использованием поправочного коэффициента.

Благодаря своей простоте последний способ расчета момента образования трещин широко применяют в практике проектирования железобетонных конструкций. До введения в действие СНиП 52-01-2003 [2], когда область действия нормативных документов ограничивалась проектированием конструкций из бетона класса по прочности на сжатие не выше В60, значение поправочного коэффициента было установлено исходя из прямоугольной эпюры напряжений в растянутой зоне сечения элемента. Оно было принято одинаковым для всех классов бетона и для элементов с прямоугольной формой поперечного сечения составляло 1,75.

Действие СП 63.13330-2018 [3] распространяется на проектирование конструкций из высокопрочных бетонов – до класса В100 включительно. Поскольку неупругие свойства высокопрочного бетона с ростом его класса снижаются, использование принятого в предшествующих нормах единого значения поправочного коэффициента для элементов из высокопрочных бетонов приводило к недопустимой переоценке момента образования трещин. В связи с этим в СП 63.13330 значение поправочного коэффициента для бетонов всех классов было принято равным его значению, установленному для элементов, выполненных из бетона класса по прочности на сжатие В100. Для элементов с прямоугольной формой поперечного сечения оно составляет 1,3. Такое значение поправочного коэффициента приводит к погрешности расчета момента трещинообразования элементов из бетона обычных классов, увеличивающейся со снижением класса бетона. Так, для железобетонных элементов с прямоугольной формой поперечного сечения, выполненных из бетона наиболее широко используемых классов (В15-В30), недооценка момента образования трещин в сравнении с более точными методами расчета составляет более 20%. Такое же занижение расчетного значения момента образования трещин в нормальном сечении наблюдается и для конструкций с полимерной композитной арматурой.

Особенностью физико-механических свойств АКП является ее низкий в сравнении со стальной арматурой модуль упругости. Поэтому после образования трещин в нормальном сечении конструкция с АКП в сравнении с железобетонной сильнее деформируется, а трещины в ней интенсивнее раскрываются, и конструирование таких элементов часто определяется условиями обеспечения требований второй группы предельных состояний. В связи с этим для конструкций с АКП задача более точного определения их трещиностойкости, от которой зависят расчетные значения прогибов и ширины раскрытия трещин, становится особенно актуальной.

Кроме этого, в работе был рассмотрен вопрос нормирования двухлинейных диаграмм деформирования бетона при осевом растяжении, используемых при расчете конструкций по образованию трещин с учетом нелинейных свойств бетона растянутой зоны. Этот вопрос встал в связи с тем, что для двухлинейных диаграмм деформирования бетона класса В90 – В100, используемых для расчета по второй группе предельных состояний, значение

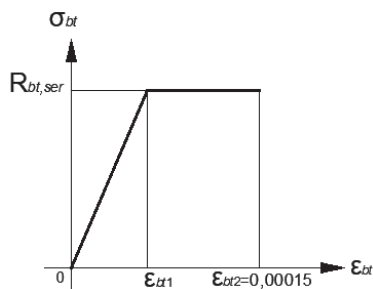


Рис. 1. Нормативная диаграмма деформирования бетона при осевом растяжении для расчета момента трещинообразования

только упругой составляющей деформации ε_{bt1} (рис. 1) уже превышает принятое в нормах ее полное значение.

При проведении НИР были решены следующие задачи:

- проведен анализ научно-технической и нормативной базы и методики расчета трещиностойкости конструкций из бетона, в том числе с композитной полимерной арматурой, принятой в зарубежных и отечественных нормативных документах;

- выполнены расчетно-теоретические исследования и предложена уточненная зависимость для коэффициента учета неупругих деформаций бетона растянутой зоны при расчете трещиностойкости конструкций упрощенным способом;

- предложено уточнение нормирования двухлинейных диаграмм деформирования бетона при осевом растяжении для расчетов конструкций по второй группе предельных состояний;
- разработаны предложения по изменению указаний СП [1] по расчету момента образования трещин в нормальных сечениях бетонных конструкций с композитной полимерной арматурой.

Предложение по определению поправочного коэффициента γ , учитывающего неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения, разработали по результатам численных исследований конструкций прямоугольной формы сечения, выполненных из бетона классов В15 – В100. Численные исследования выполнили путем расчета момента образования трещин в нормальном сечении конструкций с АКП с использованием двухлинейной диаграммы состояния при осевом растяжении. Расчеты выполняли исходя из следующих положений:

- эпюру напряжений в сжатой зоне бетона принимали треугольной формы (как для упругого тела);

- эпюру напряжений в растянутой зоне бетона принимали трапециевидной формы (рис. 2) с напряжениями, не превышающими расчетных значений сопротивления бетона растяжению $R_{bt,ser}$;

- относительную деформацию крайнего растянутого волокна бетона принимали равной ее предельному значению при кратковременном действии нагрузки ($\varepsilon_{bt2} = 0,00015$);

- относительную деформацию бетона ε_{bt1} в точке перелома двухлинейной диаграммы осевого растяжения принимали по формуле (5).

В связи с тем что влияние работы арматуры на момент образования трещин в нормальном сечении опытных образцов незначительно, ее работу в расчетах не учитывали, и расчетные значения момента образования трещин M_{crc} в нормальном сечении опытных образцов с прямоугольной формой поперечного сечения определяли по формуле

$$M_{crc} = R_{bt,ser} b(h-x) \left[(1-k) \left(\frac{1}{2}(h-x) \cdot (1+k) + \frac{2}{3}x \right) + \frac{2}{6}k \cdot [x \cdot (1-k) + k \cdot h] \right], \quad (1)$$

в которой высоту сжатой зоны сечения в момент образования трещин определяли из решения квадратного уравнения равновесия внутренних усилий (см. рис. 2)

$$x = \frac{2dh - \sqrt{4d^2h^2 - 4(d-1)dh^2}}{2(d-1)}, \quad (2)$$

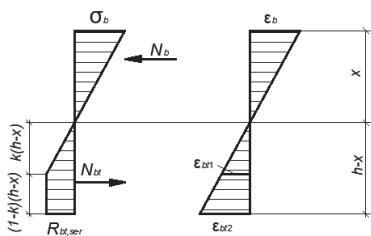


Рис. 2. Расчетная схема напряженно-деформированного состояния сечения элемента при расчете момента трещинообразования

где

$$d = 2 \cdot v_{bt1} \cdot k \cdot (1 - 0,5k); \tag{3}$$

$$k = \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}. \tag{4}$$

По результатам расчетов устанавливали значение поправочного коэффициента учета неупругих свойств различных классов бетона растянутой зоны сечения при образовании трещин в нормальном сечении конструкций с АКП.

На основании полученных результатов была предложена зависимость для определения поправочного коэффициента,

учитывающего неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения с учетом класса бетона.

Предложения по уточнению упрощенного метода расчета момента образования трещин в нормальных сечениях были проверены результатами экспериментальных исследований конструкций, армированных композитной арматурой. Из собранной экспериментальной базы были рассмотрены только те опытные образцы, для которых были представлены опытные значения моментов образования трещин в нормальном сечении.

На рис. 3 для примера представлено сравнение опытных значений момента образования трещин с расчетными для группы образцов, армированных стеклопластиковой арматурой.

Сравнение показало, что при расчете по уточненной упрощенной методике с использованием зависимости (3) наблюдается более высокая сходимость опытных и расчетных значений момента образования трещин в нормальном сечении образцов.

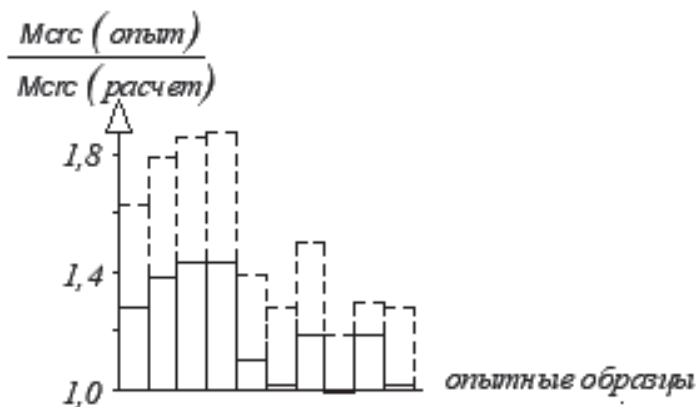


Рис. 3. Сравнение опытных значений момента образования трещин в нормальном сечении опытных образцов с расчетными, вычисленными по указаниям [1] (- - -) и по уточненной методике (—)

В результате выполненной НИР были сформулированы следующие предложения по изменению указаний нормативных документов по нормированию двухлинейных диаграмм деформирования бетона при осевом растяжении и по расчету момента образования трещин в нормальных сечениях конструкций, армированных полимерной композитной арматурой:

1. При расчете момента образования трещин в нормальном сечении конструкций с АКП с использованием двухлинейной диаграммы состояния при осевом растяжении значения

относительных деформаций ε_{bt1} (см. рис. 1) для тяжелого, мелкозернистого и напрягающего бетонов рекомендовано принимать равными

$$\varepsilon_{bt1} = \frac{R_{bt,ser}}{E_b \cdot \nu_{bt1}}, \quad (5)$$

где коэффициент упругости ν_{bt1} в вершине двухлинейной диаграммы осевого растяжения бетона рекомендовано определять по формуле

$$\nu_{bt1} = 0,6 \cdot (1 + 0,1 \cdot R_{bt,ser}), \quad (6)$$

здесь $R_{bt,ser}$ принимают в МПа.

2. Значение поправочного коэффициента, учитывающего неупругие свойства бетона растянутой зоны сечения прямоугольной формы, рекомендовано определять в зависимости от класса бетона:

$$\gamma = 1,73 - 0,005 \cdot (B - 15), \quad (7)$$

где B – числовая характеристика класса бетона по прочности на осевое сжатие.

Помимо предложений по нормированию диаграмм деформирования бетона и по расчету момента образования трещин целесообразно уточнить и указания СП [1] по расчету прочности нормальных сечений изгибаемых конструкций таврового или двутаврового сечений с полкой в сжатой зоне. Согласно этим указаниям в случае, когда площадь растянутой арматуры принята большей, чем это требуется для соблюдения условия $x \leq \xi_R \cdot h_0$, т. е. когда сечение переармировано, расчет по прочности таких конструкций следует выполнять по деформационной модели. По этой модели можно выполнять только проверочные расчеты прочности конструкций, т. е. сечение конструкции должно быть уже подобрано. Предварительный подбор сечения конструкции выполняют по зависимостям, устанавливаемым на основе упрощенной методики расчета по предельным усилиям. Однако для переармированных конструкций таврового или двутаврового сечений с полкой в сжатой зоне такие зависимости установить невозможно, поскольку для них в СП [1] отсутствуют указания по расчету по предельным усилиям.

Предлагаются следующие правила расчета таких конструкций по предельным усилиям и установленные на их основе зависимости для предварительного подбора сечения рабочей арматуры.

При расчете по предельным усилиям предельный изгибающий момент M_{ult} для изгибаемых конструкций таврового и двутаврового сечения с полкой в сжатой зоне и высотой сжатой зоны $x > \xi_R \cdot h_0$ определяют в зависимости от положения границы сжатой зоны.

Если граница сжатой зоны сечения проходит в ребре (рис. 4,б), то предельный изгибающий момент определяют по формуле

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x) + R_b (b'_f - b) \cdot h'_f \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h'_f), \quad (8)$$

в которой высоту сжатой зоны рекомендуется принимать равной

$$x = \sqrt{(0,5(\mu_f \alpha_2 + \mu'_f) \cdot h_0)^2 + \mu_f \alpha_2 h_0^2 \cdot \omega} - 0,5 \cdot (\mu_f \alpha_2 + \mu'_f) \cdot h_0, \quad (9)$$

где

$$\mu_f = \frac{A_f}{b \cdot h_0}; \quad \mu'_f = \frac{(b'_f - b) \cdot h'_f}{b \cdot h_0}; \quad \alpha_2 = \frac{E_f}{E_{b2}}; \quad E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}}; \quad (10)$$

ε_{b2} – предельное значение относительной деформации бетона при сжатии, принимаемое согласно 3.1.20 СП 63.13330;

ω – характеристика сжатой зоны бетона, принимаемая равной 0,8 для тяжелого бетона классов до В60 включительно и 0,7 для тяжелого бетона классов В70 – В100.

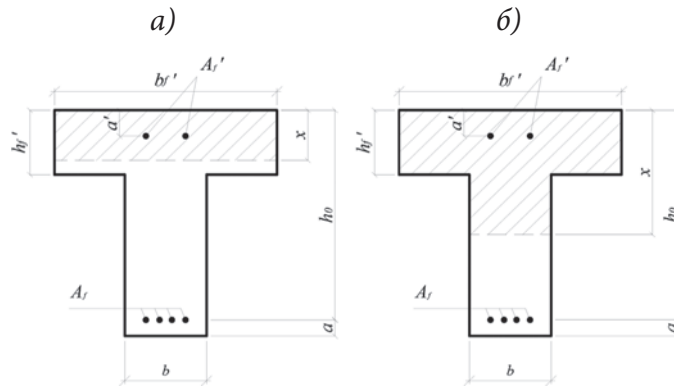


Рис. 4. Положение границы сжатой зоны в сечении изгибаемой конструкции

Если граница сжатой зоны сечения проходит в полке (рис. 4, а), т. е. выполняется условие

$$M \leq R_b \cdot b_f' \cdot h_f' \cdot (h_0 - 0,5h_f'), \tag{11}$$

то сечение рассматривается как прямоугольное шириной b_f' , и формулы (8), (9) при $b = b_f$ и $\mu_f' = 0$ примут вид:

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x), \tag{12}$$

$$x = \sqrt{(0,5\mu_f\alpha_2h_0)^2 + \mu_f\alpha_2h_0^2\omega} - 0,5\mu_f\alpha_2h_0. \tag{13}$$

Если граница сжатой зоны сечения проходит в ребре, то требуемую площадь сечения продольной растянутой арматуры изгибаемых конструкций таврового и двутаврового сечения с полкой в сжатой зоне при $\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$ можно определить по формуле

$$A_f = \frac{b \cdot x^2 - (b_f' - b) \cdot h_f' \cdot x}{\alpha_2 \cdot (h_0 \cdot \omega - x)}, \tag{14}$$

где высота сжатой зоны x принимается равной

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2(M - R_b(b_f' - b) \cdot h_f' \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_f'))}{R_b \cdot b}}. \tag{15}$$

Если граница сжатой зоны сечения проходит в полке, т. е. выполняется условие (11), то требуемую площадь сечения продольной растянутой арматуры определяют как для изгибаемых конструкций прямоугольного сечения шириной b_f' , при этом формулы (14), (15) при $b = b_f$ и $\mu_f' = 0$ примут вид:

$$A_f = \frac{b \cdot x^2}{\alpha_2 \cdot (h_0 \cdot \omega - x)}; \tag{16}$$

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2M}{R_b \cdot b}}. \tag{17}$$

Формулы (14) и (16) для подбора требуемой площади сечения продольной растянутой арматуры относятся к перearмированным сечениям, поэтому при их использовании следует контролировать условие перearмирования: $x > \xi_R \cdot h_0$. В противном случае требуемую площадь сечения продольной растянутой арматуры определяют по формулам:

при $x \leq h'_f$

$$A_f = \frac{R_b \cdot b \cdot x}{R_f}, \quad (18)$$

при $x > h'_f$

$$A_f = \frac{R_b \cdot b \cdot x + R_b \cdot (b'_f - b) \cdot h'_f}{R_f}. \quad (19)$$

Зависимости (8) – (10) можно использовать для оценки по предельным усилиям прочности нормальных сечений перearмированных изгибаемых конструкций с композитной полимерной арматурой с поперечным сечением тавровой и двутавровой формы с полкой в сжатой зоне, а (14) – (17) – для предварительного подбора сечения растянутой арматуры при расчете их прочности по деформационной модели.

Библиографический список

1. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования.
2. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры.
3. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

Автор

Тахир Абдурахманович МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Takhir MUKHAMEDIYEV, D. Sci (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures of NIIZHБ named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: takhir50@rambler.ru

тел.: +7 (499) 174-76-95