

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН, НОРМАЛЬНЫХ К ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Тур В.В., Драган А.В.

**Введение.** Как показывает практика оценки технического состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций, для большинства из них наступление предельного состояния связано не с потерей конструкцией несущей способности, а с образованием и чрезмерным раскрытием трещин (с потерей эксплуатационных качеств) при эксплуатационных уровнях нагрузках. Подобная ситуация заставляет более внимательно относиться к уточнению и совершенствованию теории и методов прогнозирования трещиностойкости железобетонных конструкций.

Необходимо отметить, что за последние несколько десятилетий в отечественной науке о железобетоне этой проблеме уделено незначительное внимание в то время как зарубежные ученые находятся в постоянном поиске более совершенных методик прогнозирования раскрытия трещин, о чем свидетельствуют многочисленные публикации по данной тематике [1–9 и др.] и достаточные существенные изменения и корректировки подходов к расчету данного параметра в последних редакциях нормативных документов [10, 11, 12]. Поэтому неудивительно, что в свое время при подготовке раздела, регламентирующего расчет по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, в СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции» [13], его разработчиками пришлось полностью основываться на исследованиях зарубежных исследователей и включить в национальные нормы расчетные зависимости, принятые в первых редакциях Eurocode 2 [10], без их доскональной проверки.

**Существующие подходы к оценке ширины раскрытия трещин.** Анализ существующих предложений к определению ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах позволяет выделить четыре основных подхода к построению аналитических моделей:

1. *Эмпирический подход* (ACI 224.2R; P.Gergely and L.A. Lutz; СНБ 2.03.01-84\*; Н.М. Мулин; Ю.П. Гуца и др.);

2. *Подход, основанный на теории механики разрушения* (Пирадов А.Б., Гвевесиани Л.О., Пирадов К.А., Гузеев Е.А., Oh В.Н., Kang Y.-J., Shah S.P., Swart S.E. и др.);

3. *Подход, основанный на теории «tension stiffening»* (CEB-fib Model Code 1978 1990, ENV-1991-1, СНБ 5.03.01-02, Мурашев В.И., Немировский Я.Н. и др.);

4. *Подход, основанный на теории «bond-slip»* (Holmberg A., Noakowski P. Alvares M., Balazs L., EN 1992-1, Тур В.В. и Драган А.В. [14], и др.).

Критический анализ представленных выше подходов к построению аналитических моделей и полученных с их применением расчетных зависимостей подробно изложен в работах [14, 15]. Более детально остановимся на рассмотрении различий в определении ширины раскрытия нормальных трещин в подходах, используемых и действующих в Беларуси нормах [13] (теория «tension stiffening») и в последней редакции европейских норм EN 1992-1 [11] (теория «bond-slip»).

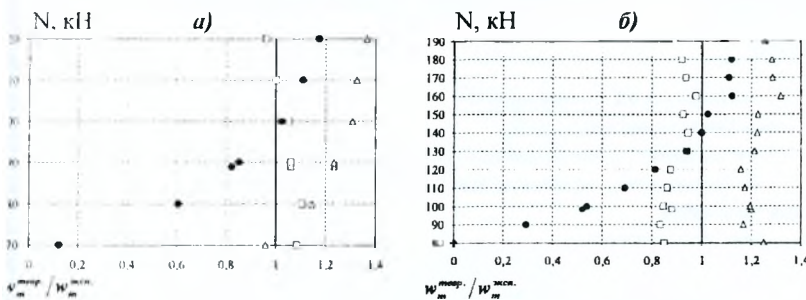
В соответствии с [13] расчет по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси железобетонного элемента следует производить на основании следующего выражения:

$$w_k = \beta \cdot (\varepsilon_s - \psi_s) s_{rm} / \quad (1)^*$$

Согласно представленной выше классификации данная зависимость относится к выражениям, полученным на основании теории «tension stiffening». Анализ результатов, получаемых в ходе практического применения расчетной зависимости (1), позволяет выявить существенный, на наш взгляд, недостаток, связанный с определением параметра  $\psi_s$ . Напомним, что параметр  $\psi_s$  представляет собой коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций растянутой арматуры на участке между трещинами, величину которого следует определять по формуле [13]:

$$\psi_s = 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_s} \right)^2; \quad (2)^*$$

В случае использования арматуры периодического профиля ( $\beta_1=1,0$ ) и действии рассматриваемый железобетонный элемент кратковременной нагрузки ( $\beta_2=1,0$ ), при наступлении расчетного случая, т.е. при  $\sigma_s = \sigma_{cr}$ , согласно выражению (2) значение коэффициента  $\psi_s$  становится равным нулю, что в свою очередь приводит к нулевой ширине раскрытия трещины (выражение (1)). Таким образом, возникает парадоксальная ситуация – трещина образовалась, однако её ширину нельзя рассчитать (рисунок 1). С увеличением внешнего растягивающего усилия ширина раскрытия трещин увеличивается, однако вплоть до верхнего уровня эксплуатационных нагрузок ширина раскрытия трещин все же имеет несколько заниженные значения по сравнению с величинами, зарегистрированными опытным путем [15]. Необходимо отметить, что данная особенность наиболее четко проявляется для железобетонных элементов, имеющих низкие коэффициенты армирования, т.е. для случаев, когда  $\sigma_{cr} \rightarrow \sigma_{ult}$  ( $\sigma_{ult}$  – предельные напряжения в растянутой арматуре). При длительных действующих нагрузках методика СНБ 5.03.01-02 дает более достоверную оценку ширины раскрытия трещин, но при этом значения рассчитываемого параметра все же ниже, получаемых по методике EN1992-1[11].



Методики: • – СНБ 5.03.01-02 [13]; Δ – EN 1992-1 [11]; □ – предлагаемая методика.

а) – 1Ø20S400,  $\rho_{eff} = 0,01$ ; б) – 1Ø25S400;  $\rho_{eff} = 0,015$ .

Рисунок 1 – Сопоставление значений средней ширины раскрытия трещин для случая осевого растяжения кратковременной нагрузкой

\* - обозначения в формуле приняты согласно СНБ 5.03.01-02 [13].

Если проанализировать эволюцию подходов к расчету трещиностойкости железобетонных конструкций в Европе, то можно отметить, что в редакциях Eurocode 2 (как отмечалось выше, послуживших основой для ряда белорусских национальных норм) расчетные зависимости также базируются на концепции «tension stiffening». Однако в последней и актуальной редакции евроноrm [11] был произведен переход к, так называемой, концепции «bond-slip» (англ. «сцепление – проскальзывание»). Основными причинами для столь кардинального изменения в подходах к определению ширины раскрытия трещин, по-видимому, и явился весьма упрощенный способ учета неравномерного деформирования арматуры на участке между трещинами по среднему расстоянию  $\psi_s$ . Усреднение относительных деформаций в [11], используемое при расчете ширины раскрытия трещин, производится на основании комплексного подхода, учитывающего законы деформирования арматуры и бетона, а также законы, характеризующие совместную работу двух материалов под нагрузкой (законы сцепления):

$$\varepsilon_{s,m} - \varepsilon_{c,m} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} (1 + \alpha_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s},$$

где  $k_t$  – коэффициент, учитывающий продолжительность приложения нагрузки;  
 $f_{ct,eff}$  – прочность бетона на растяжение;  
 $\rho_{eff}$  – эффективный коэффициент армирования;  
 $\alpha_e$  – коэффициент, характеризующий соотношение модулей упругости арматуры и бетона.

Вместе с тем, существенных отличий в расчетных зависимостях, применяемых при определении среднего расстояния между трещинами, в сопоставимых методиках расчета нет. Обе методики для определения  $s_{rm}$  используют одинаковое выражение, которое в общем виде может быть записано как:

$$s_{rm} = k_0 \cdot c + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \frac{\phi_s}{\rho_{eff}},$$

где  $k_0$  – эмпирический коэффициент;  
 $c$  – толщина защитного слоя;  
 $k_1$  – коэффициент, учитывающий условия сцепления арматуры с бетоном;  
 $k_2$  – коэффициент, учитывающий вид напряженно-деформированного состояния элемента;  
 $\phi_s$  – диаметр арматуры.

Единственное различие, имеющее место при определении среднего расстояния между трещинами согласно [13] и [11], заключается в назначении параметра  $k_0 \cdot c$  в выражении (4). Так в [13] параметр  $k_0 \cdot c$  принимается равным постоянному значению 50мм, в то время как в [11] предусматривается непосредственный учет толщины защитного слоя с коэффициентом  $k_0 = 2$ . Необходимо заметить, до настоящего времени по вопросу учета толщины защитного слоя при определении ширины раскрытия трещин нет однозначного мнения,

впрочем, и о физическом смысле параметра  $k_0 c$  в формуле (4). В работе [1] введением параметра  $k_0 c$  предполагают учитывать, что ширина раскрытия трещины на уровне арматуры меньше, чем на растянутой грани железобетонного элемента. Изменение ширины раскрытия трещины по высоте защитного слоя учитывается введением эмпирического коэффициента  $k_0$ . Экспериментальные данные, представленные в работе [3], подтверждают тот факт, что ширина раскрытия трещины изменяется в пределах толщины защитного слоя ввиду деформации поверхности бетона в сечении с трещиной. Однако при этом делается одно существенное уточнение – отношение поверхностной ширины раскрытия трещины к соответствующей величине на уровне арматуры не зависит от величины защитного слоя и изменяется в пределах (2,34÷2,66). В работе [16] параметр  $k_0 c$  в формуле (4) определяет длину зоны релаксации напряжений, формирующейся у грани железобетонного элемента после образования трещины, в пределах которой напряжения в растянутом бетоне убывают до нуля, что и определяет невозможность появления здесь очередной трещины.

Сравнительный анализ результатов расчета по двум нормативным методикам (СНБ 5.03.01-02 [13] и EN 1992-1 [11]), выполненный в работах [14 и 15], показывает выгодное преимущество европейского подхода, что, в первую очередь, связано с более достоверным прогнозированием ширины раскрытия трещин.

**Инженерная методика расчета ширины раскрытия трещин в центрально растянутых элементах.** В рамках выполнения работ по подготовке редакции ТКП 45/OP-5.03 «Конструкции бетонные и железобетонные. Часть 2. Правила проектирования ненапрягаемых конструкций из тяжелого бетона» авторами статьи была разработана собственная методика расчета ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента. Предлагаемая методика прошла апробацию на центрально растянутых железобетонных элементах – результаты, полученные с её применением, показали хорошую сходимость с экспериментальными данными и оказались более достоверными по сравнению со значениями, рассчитанными по методике [13]. В настоящее время ведется проверка возможности применения предлагаемой методики для расчета трещиностойкости изгибаемых элементов.

Аналитическое выражение для средней ширины раскрытия нормальных трещин было получено на основании анализа изменяемого по длине элемента напряженно-деформируемого состояния арматуры и растянутого бетона, с учетом особенностей взаимодействия различных типов арматурных профилей с бетоном:

$$w_m = k_p \cdot k_t \cdot \varepsilon_{s,II} \cdot \frac{f_{ctm}}{(1 + \rho_{eff} \cdot \alpha_E)} \cdot \psi \cdot 0,375 \cdot \frac{\sigma_s}{\rho_{eff}}, \quad (5)$$

где  $k_p$  – эмпирико-аналитический коэффициент, характеризующий условия сцепления арматуры с бетоном, мм<sup>2</sup>/Н, определяемый в соответствии с положениями, изложенными в [14, 15];

$k_t$  – коэффициент, учитывающий продолжительность приложения нагрузки, принимаемый равным: при действии кратковременных нагрузок – 0,6; при действии длительно действующих нагрузок – 0,8;

$\varepsilon_{s,II}$  – относительная деформация арматуры в сечении с трещиной;

$f_{ctm}$  – средняя прочность бетона при осевом растяжении, Н/мм<sup>2</sup>;

$\psi$  – коэффициент, характеризующий соотношение между усилием от расчетной комбинации нагрузок с усилием трещинообразования. Значение коэффициента  $\psi$  следует определять по формуле:

$$\psi = \sqrt{\beta \cdot \rho_{eff}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_{cr}}{N}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{6} \sqrt{\frac{N_{cr}}{N}} \right) \right). \quad (6)$$

Здесь  $\beta = f_{yk} / f_{ctm}$  – отношение нормативного сопротивления арматуры к средней прочности бетона при осевом растяжении.

Результаты верификации предлагаемой инженерной методики определения ширины раскрытия трещин, которые подробно изложены в [15], дают основание утверждать, что данная методика позволяет производить достоверную оценку ширины раскрытия трещин, а изменение данного параметра с увеличением внешней нагрузки в наиболее полной мере соответствует характеру изменения ширины раскрытия трещин, зарегистрированному при проведении испытаний центрально растянутых железобетонных элементов.

**Заключение.** Представленные в статье результаты позволяют заключить следующее:

1. Расчетные зависимости для определения ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, используемые в действующих нормах [13] не совсем корректно производят усреднение относительных деформаций арматуры на участках между трещинами, пренебрегая при этом деформациями растянутого бетона, что в итоге приводит к существенной недооценке ширины раскрытия трещин на этапах нагружения, соответствующих начальным уровням трещинообразования.

2. Предлагаемая инженерная методика дает хорошую сходимость рассчитанных и опытных значений ширины раскрытия нормальных трещин, что позволяет рекомендовать её для практического использования при выполнении расчетов по второй группе предельных состояний.

#### Список цитированных источников

1. Beeby, A.W. The influence of the parameter  $\emptyset/\rho_{eff}$  on crack widths / A.W. Beeby // *Structural Concrete*. – 2004. – Vol. 5, № 4. – P. 72–83.
2. Discussion: The influence of the parameter  $\emptyset/\rho_{eff}$  on crack widths / A.W. Beeby [et al] // *Structural Concrete*. – 2005 – Vol. 6, №4. – P.155–165.
3. Crack opening near reinforcement bars in concrete structures / K. Tammo [et al] // *Structural Concrete*. – 2006 – Vol. 7, № 4. – P.137–143.
4. Flexural Crack Widths at the Bars in Reinforced Concrete Beams: Research Report / Center for Highway Research, The University of Texas at Austin; S.I. Husain. – Texas, 1968. – № 102,1F
5. Logt-term cracking in reinforced concrete beams / J.M. Illston [et al] // *Proceedings of the Institute of Civil Engineering*. Part II. Research and Theory. – 1972. – № 53. – P. 445–459.
6. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art / A. Borosnyoi [et al] // *Structural Concrete*. – 2005 – Vol. 6, № 2. – P. 53–62.
7. Prediction of Cracking in Reinforced Concrete Structures: Research Report / Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology; N. J. Carino – Gaithersburg, 1995. – 51 с. – NISTR 5634.
8. Cracking analysis of RC members using polynomial strain distribution function / H.-G. Kwak [et al] // *Engineering Structures*. – 2002 – № 24. – P. 455–468.
9. Pedziwiatr, J. Tension stiffening effect a przykladzie osiowo rozciaganych elementow zelbetowych / J. Pedziwiatr // *Krynica 2008: Problemy naukowo-badawcze budownictwa* : monografia 54 konferencji naukowej, Krynica, 21–26 wrzesnia 2008 r.: w 6 t. / Komitet inzynierii ladowej i wodnej PAN, Komitet nauki PZITB; redakcja : A. Lapko [et al.]. – Bialystok: Wydawnictwo Politechniki Bialostockiej, 2008. – T. VI: Badawczo-projektowe zagadnienia w budownictwie. – S. 241–248.



10. Design of Concrete Structure. General Rules and Rules for Building: ENV 1992-1:1991. – Introduced Dec. 1991 – Brussel: European Committee for Standardization, 1991. – 230 p.

11. Design of Concrete Structure. General Rules and Rules for Building: EN 1992-1: 2001 (Eurocode 2). – Introduced Oct. 2001 – Brussel: European Committee for Standardization, 2001. – 230 p.

12. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Bemessung und Konstruktion: DIN 1045-1. Berlin, 1998. – 178 p.

13. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01–02. – Введ. 01.07.2003. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2003. – 139 с.

14. К расчету ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах при осевых растягивающих усилиях / В.В. Тур [и др.] // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1. – С.40–53.

15. Драган, А.В. Трещиностойкость железобетонных элементов при действии осевых растягивающих усилий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Драган. – Брест, 2008. – 169 с.

16. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: учебное пособие / Т.М. Пецоляда [и др.]; под ред. Т.М. Пецоляда, В.В. Тура. – Брест: Изд-во БГТУ, 2003. – 216 с.

УДК 624.012

## К НАЗНАЧЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОСТ-НАПРЯЖЕННЫХ ПЛОСКИХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ

Тур В. В., Карабанюк С. А.

**Введение.** Как следует из анализа, выполненного в работе [1], пост-напряженные монолитные плиты с напрягаемой арматурой, не имеющей сцепления с бетоном, обладают рядом преимуществ, которые особенно важно принимать во внимание при разработке проектов высотных зданий.

К этим важнейшим преимуществам следует отнести [1]:

- улучшенные технико-экономические показатели, включая снижение расхода материалов по сравнению с традиционными железобетонными и даже стальными конструкциями;
- возможность создания больших пролетов при обеспеченных требованиях жесткости перекрытия. При этом увеличение размеров пролетов позволяет осуществлять более гибкую планировку площадей перекрытия;
- возможность повышения архитектурной выразительности проектируемых зданий. Свободная трассировка напрягаемых элементов по траекториям силовых потоков (линия опор) позволяет использовать конструктивные системы с нерегулярным размещением опор (стен, колонн), отверстиями и консольными фрагментами плит;
- снижение нагрузок от собственного веса перекрытий, что создает благоприятный эффект для наиболее нагруженных колонн нижних этажей и фундаментов;
- обеспечение высоких эксплуатационных показателей при действии нагрузок, что повышает долговечность конструктивных систем;
- резервирование прочности при постановке дополнительных внутренних горизонтальных связей, повышающих надежность конструктивной системы и обеспечивающих устойчивость против прогрессирующего обрушения;
- обеспечение высокой прочности на местный срез (продавливание) при соответствующем размещении напрягаемых арматурных элементов;
- сокращение сроков строительства.