

10. Тур, В. В. Новое в проектировании конструкций из бетона: второе поколение Еврокодов и Национальных норм / В. В. Тур, Т. М. Пецольд // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. Строительные конструкции. – 2018. – № 8. – С. 131–146.

11. Ignatiadis, A. Eurocode 2 – analysis of National Annex / A. Ignatiadis [et al.] // Structural Concrete. – 2015. – № 1.

УДК 691.328.43

## **АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОГИБОВ ИЗГИБАЕМЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ**

*ХОТЬКО А. А., АКБАР С. М.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

С учетом специфических особенностей стеклопластиковой арматуры, внедрение ее в производство несущих конструкций невозможно без соответствующих научных обоснований, основанных на имеющихся теоретических предпосылках и выполненных экспериментальных исследованиях.

Известным ученым Фроловым Н. П. было логически обоснована нецелесообразность армирования изгибаемых элементов стеклопластиковой арматурой без ее предварительного напряжения [5]. Многочисленные экспериментальные исследования подтверждали значительные прогибы и ширину раскрытия трещин конструкций армированных стеклопластиковой арматурой по сравнению с аналогичными конструкциями со стальной арматурой. Поэтому использование всех преимуществ композитной арматуры при армировании изгибаемых элементов возможно только при условии ее предварительного напряжения, способного повысить трещиностойкость и уменьшить прогибы конструкций при эксплуатационных нагрузках.

Однако, даже при условии решения проблемы со сложностью создания предварительного напряжения композитной арматуры, является актуальным вопрос достоверной расчетной оценки шири-

ны раскрытия трещин и величины прогибов. Исследования в этом направлении проводятся как в Республике Беларусь, под руководством профессоров Т. М. Пецольда, В. В. Тура, так и в Российской Федерации и в других странах [1–8]. Методики расчета прогибов изгибаемых элементов с композитной арматурой изложены в разработанных НИПТИС рекомендациях [3], а также в разработанных НИИЖБ им. А. А. Гвоздева строительных правилах [4].

Принцип расчета прогибов по методике, предлагаемой учеными РБ и по методике, предлагаемой Российскими учеными, идентичен. Прогибы (перемещения) конструкций с композитной арматурой по указанным методикам рассчитываются по аналогии с расчетами прогибов железобетонных конструкций со стальной арматурой, по общим правилам строительной механики, используя значения продольных деформаций, поперечных деформаций и кривизн по длине конструкций от расчетных воздействий и их сочетаний. В тех случаях, когда прогибы железобетонных элементов в основном зависят от изгибных деформаций, значения прогибов определяют по жесткостным характеристикам.

Кривизну железобетонных элементов для участков элементов с трещинами определяют как разность средних относительных деформаций крайнего волокна сжатого бетона и средних относительных деформаций крайнего растянутого арматурного стержня на этом участке, деленную на расстояние между крайним волокном сжатого бетона и центром тяжести крайнего растянутого арматурного стержня.

Средние относительные деформации крайнего сжатого волокна бетона определяются по относительным деформациям крайнего сжатого волокна в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси, умноженным на коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций сжатого бетона по длине между трещинами.

Средние относительные деформации крайнего растянутого арматурного стержня определяются по относительным деформациям крайнего растянутого арматурного стержня в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси элемента, умноженным на коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры по длине между трещинами.

Относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси элемен-

та, в общем случае определяются из расчета системы уравнений деформационной модели железобетонных конструкций по заданным значениям изгибающего момента и продольной силы от соответствующего сочетания внешних нагрузок.

Допускается определять деформации в сжатом бетоне и растянутой арматуре исходя из условно упругого расчета сечения с трещиной, нормального к продольной оси элемента, принимая условно упругую работу бетона с приведенным модулем упругости и упругую работу композитной арматуры со своим модулем упругости.

Относительные деформации  $\varepsilon_{cc}$  и  $\varepsilon_f$  согласно разработанным в НИПТИС рекомендациям [3] допускается определять по формулам:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{\sigma_{cc}}{E_{c,red}}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \leq 0,3 \frac{f_{fk}}{E_f}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{cc}$  – напряжение в крайнем сжатом волокне бетона в сечении с трещиной;

$\sigma_f$  – напряжение в крайнем растянутом стержне продольной арматуры в сечении с трещиной.

Для изгибаемых элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, сосредоточенной у растянутой и сжатой граней элемента, определение относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры допускается производить по упрощенной схеме, рассматривая железобетонный элемент в виде сжатого пояса бетона и растянутого пояса арматуры с равномерным распределением напряжений по высоте сжатого и растянутого поясов:

$$\sigma_{cc} = \frac{M_{Ed}}{A_{cc} \cdot z}; \quad (3)$$

$$\sigma_f = \frac{M_{Ed}}{A_f \cdot z} \leq 0,3 f_{fk}, \quad (4)$$

где  $A_{cc}$  – площадь сжатого бетона в сечении с трещиной;

$A_f$  – площадь растянутой арматуры в сечении с трещиной;

$z$  – расстояние между центрами тяжести площади сжатого бетона и растянутой арматуры.

Значения  $A_{cc}$  и  $z$  допускается определять из расчета изгибаемых элементов по предельным усилиям в сечении, нормальном к продольной оси.

Согласно методике РФ правил СП 63.13330-2012 [4] для элементов с нормальными трещинами в растянутой зоне напряжение в арматуре, пересекающей трещины, определяют по формуле:

$$\sigma_{fj} = \frac{E_{fj} \cdot v_{fj} \cdot \varepsilon_{fj}}{\psi_{fj}}, \quad (5)$$

где:

$$\psi_{fj} = 1 - \frac{1}{1 + 0.8 \cdot \frac{\varepsilon_{fj.crc}}{\varepsilon_{fj}}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{fj.crc}$  – относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

$\varepsilon_{fj}$  – усредненная относительная деформация растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии расчета.

Согласно рекомендациям НИПТИС [3] при использовании упрощенных методов расчета для определения деформаций железобетонных изгибаемых элементов, работающих с трещинами, окончательное значение проверяемого параметра следует определять по формуле:

$$\chi = \psi_f \cdot \chi_{II} - (1 - \psi_f) \cdot \chi_I, \quad (7)$$

где  $\chi$  – анализируемый параметр, в качестве которого могут рассматриваться кривизна, угол поворота или прогиб;

$\chi_I$ ,  $\chi_{II}$  – соответственно значения параметра, определенные для сечения без трещины и с трещиной;

$\psi_f$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения относительных деформаций растянутой арматуры на участках между трещинами, определяемый в общем случае по формуле:

$$\psi_f = 1 - \beta \left( \frac{\sigma_{f,cr}}{\sigma_f} \right)^2, \quad (8)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий длительность нагружения;

$\sigma_f$  – напряжения в растянутой композитной арматуре, рассчитанные для сечения с трещиной;

$\sigma_{f,cr}$  – напряжения в растянутой композитной арматуре, рассчитанные для сечения с трещиной для условий нагружения, приводящих к появлению трещин.

В соответствии с рекомендациями [3] изгибную жесткость элемента с трещинами в общем случае следует определять по формуле:

$$B_{m,cr} = \frac{M_{Sd}}{(1/r)_{cr}}. \quad (9)$$

Допускается определять изгибную жесткость железобетонного элемента с трещинами по формуле:

$$B(\infty, t_0) = \frac{E_{c,eff} \cdot I_{II}}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{f,r}}{\sigma_f} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{I_{II}}{I_I} \right)}, \quad (10)$$

где  $E_{c,eff}$  – эффективный модуль упругости бетона;

$I_{II}$ ,  $I_I$  – соответственно момент инерции сечения с трещиной и без трещины, определяемый с учетом отношения:

$$\alpha_e = \frac{E_f}{E_{c,eff}}. \quad (11)$$

Значения эффективного модуля упругости бетона  $E_{c,eff}$  согласно рекомендациям [3] определяются:

- при действии кратковременной нагрузки:  $E_{c,eff} = E_{cm}$ ;
- при действии длительной нагрузки:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \Phi(\infty, t_0)}, \quad (12)$$

где  $\Phi(\infty, t_0)$  — предельное значение коэффициента ползучести для бетона.

В случае же расчета по методике Российских правил [4] изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента определяется по формуле:

$$B = E_{bl} \times I_{red}, \quad (13)$$

где  $E_{bl}$  — модуль деформаций сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия или отсутствия трещин;

$I_{red}$  — момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия или отсутствия трещин.

Значения модуля деформаций бетона принимают равными:

– при непродолжительном действии нагрузки:

$$E_{bl} = 0,85 \times E_b; \quad (14)$$

– при продолжительном действии нагрузки:

$$E_{bl} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}. \quad (15)$$

При определении момента инерции приведенного поперечного сечения, значения коэффициентов приведения растянутой арматуры к бетону принимают:

$$\alpha_{f1} = \frac{E_{f,red}}{E_{b,red}}, \quad (16)$$

где  $E_{b,red}$  — приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации сжатого бетона и определяемый по формуле:

$$E_{b,red} = \frac{f_{cn}}{\varepsilon_{b,red}}. \quad (17)$$

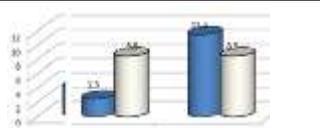
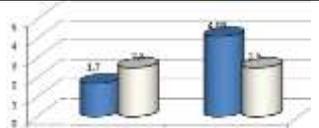
Относительную деформацию бетона  $\varepsilon_{b,red}$  принимают 0,0015.

$E_{f,red}$  – приведенный модуль деформаций стеклопластиковой арматуры, определяемый с учетом влияния работы растянутого бетона между трещинами:

$$E_{f,red} = \frac{E_f}{\psi_f} \quad (18)$$

Таблица 1

Сравнение расчетных данных по различным методикам с экспериментальными данными по прогибам

	Экспериментальные данные согласно [8]	Экспериментальные данные согласно [7]
Размеры поперечного сечения образца, мм	100×180 мм	120×220 мм
Класс бетона	C25/30	C25/30
Арматура в растянутой зоне	Стеклопластиковая 4Ø8 $f_t = 960$ МПа E = 45200 МПа	Стеклопластиковая 1Ø10 $f_t = 960$ МПа E = 45660 МПа
Предельный опытный изгибающий момент, кНм	7,0	5,625
Максимальные прогибы в опытах, мм	8,5	2,5
Результаты сравнения расчетных данных с опытными	 <p>(темной заливкой – согласно методике [3], светлой – согласно методике [4])</p>	 <p>(темной заливкой – согласно методике [3], светлой – согласно методике [4])</p>

С целью оценки достоверности описанных выше методик, нами был выполнен расчет ширины раскрытия трещин по указанным зависимостям, для изгибаемого элемента, армированного в растянутой зоне стеклопластиковой арматурой и сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований.

К сожалению, нами не было найдено результатов экспериментальных данных с предварительно напряженной стеклопластиковой арматурой, что вероятно связано со сложностью захвата такой ар-

матуры при создании предварительного напряжения. Из опубликованных данных по испытаниям предварительно напряженных изгибаемых элементов с композитной арматурой известны исследования профессора Тура В. В. [6]. Однако эти исследования проводились с комбинированным армированием. Поэтому, с целью расчетной оценки рассматриваемых методик, нами были использованы опытные данные, полученные на изгибаемых элементах со стеклопластиковой арматурой без предварительного напряжения и описанные в работах Волик А. Р. [7] и Почебыт А. А. [8].

В качестве исходных данных для первого численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [8]: изгибаемый элемент, прямоугольного сечения, с размерами 100×180 мм, армированный в растянутой зоне 4Ø8 мм стеклопластиковой арматуры (в два ряда, с расстоянием 30 мм) с характеристиками:  $f_t = 960$  МПа,  $E_f = 45\,200$  МПа, в сжатой зоне 2Ø6 S500. В качестве исходных данных для второго численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [7]: изгибаемый элемент, прямоугольного сечения, с размерами 120×220 мм, армированный в растянутой зоне 1Ø10мм стеклопластиковой арматуры с характеристиками:  $f_t = 962$  МПа,  $E_f = 45\,660$  МПа. Бетон класса С25/30.

Анализ численного эксперимента показал, что методика расчета прогибов, описанная в строительных правилах [4] дает большее значение прогибов по сравнению с опытными данными, в то время как методика, изложенная в рекомендациях [3] дает заниженные значения по сравнению с опытами (табл. 1).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ACI 440.1R-03, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. – American Concrete Institute, 2003.
2. CNR-DT 203/2006, Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. – Rome, Italy, 2006.
3. Рекомендации по проектированию конструкций из напрягающего бетона с композитной арматурой. – Минск, НИПТИС, 2014. (1-ая редакция).

4. СП 63.13330-2012 «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования». – Москва, 2013.

5. Фролов, Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н. П. Фролов. – Москва: Стройиздат, 1980. – 107 с.

6. Тур, В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В. Тур, В. В. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.

7. Волик, А. Р. К вопросу замены металлической арматуры на стеклопластиковую в изгибаемых бетонных балках / А. Р. Волик, Е. К. Волик // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: материалы XX междунар. науч. – метод. семинара / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 19–22.

8. Почебыт, А. А. Железобетонные балки с комбинированным армированием / А. А. Почебыт // Наука – 2017: сборник научных статей. В 2 ч. Ч. 1/ Учреждение образования «Гродненский гос. ун-т им. Я. Купалы». – Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2017. – С. 328–330.

УДК 69.006.05

## **О РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ТНПА В ОБЛАСТИ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА**

*ШЕВКО В. В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Одной из приоритетных задач развития строительной отрасли является совершенствование нормативной правовой и нормативно-технической базы в области изысканий, проектирования и строительства. На решение этой задачи направлена реструктуризация Национального комплекса технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства. Целью реструктуризации является оптимизация и сокращение ТНПА.