

3. Сидорович, Е.М. Динамика и устойчивость сооружений. Численные методы решения задач: учебное пособие / Е.М. Сидорович. – Мн.: БНТУ, 2006. – 246 с.

4. Безухов, Н.И. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах / Н. И. Безухов, О.В. Лужин, Н.В. Колкунов. – М.: Стройиздат, 1969. – 424 с.

5. Клейн, Г.К. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики (основы теории устойчивости, динамики сооружений и расчета пространственных систем) / Г.К. Клейн, В.Г. Рекач, Г.И. Розенблат. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1972. – 296 с.

УДК 691.328.43

## **АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН ИЗГИБАЕМЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ**

*ХОТЬКО А. А., АКБАР С. М.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В последние годы наблюдается активизация деятельности производителей и поставщиков стеклопластиковой арматуры, направленной на внедрение такой арматуры в производство несущих конструкций, в том числе стеклопластбетонных изгибаемых элементов. В нормативной базе Республики Беларусь отсутствуют действующие технические нормативные правовые акты (далее - ТНПА), позволяющие применять композитную арматуру в изгибаемых стеклопластбетонных несущих конструкциях. С учетом специфических особенностей стеклопластиковой арматуры, внедрение ее в производство несущих конструкций не возможно без соответствующих научных обоснований, основанных на имеющихся теоретических предпосылках и выполненных экспериментальных исследованиях.

Еще четыре десятка лет назад известным ученым Фроловым Н. П. было логически обоснована нецелесообразность армиро-

вания 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.

Даже при условии решения проблемы со сложностью создания предварительного напряжения композитной арматуры, является актуальным вопрос достоверной расчетной оценки ширины 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 ширины раскрытия трещин изгибаемых элементов с композитной арматурой изложены в разработанных НИПТИС рекомендациях [3], а также в разработанных НИИЖБ им. А.А.Гвоздева строительных правилах [4].

Расчет стеклопластбетонных конструкций согласно указанным методикам предлагается выполнять по аналогии с расчетом железобетонных конструкций со стальной арматурой с учетом специфических свойств арматуры из стеклопластиков и особенностей ее работы в бетоне. Проверку предельного состояния по ширине раскрытия трещин предлагается производить из известного условия:

$$w_k \leq w_{lim}, \quad (1)$$

где  $w_k$  – расчетная ширина раскрытия трещин;

$w_{lim}$  – предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

Учитывая коррозионную стойкость стеклопластиковой арматуры по отношению к агрессивным средам, в которых стальная арматура подвергается активной коррозии, предельно допустимая ширина раскрытия трещин для конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой принимается большей, чем для элементов со стальной арматурой. В основном, исследователи рекомендуют назначать предельно допустимую ширину раскрытия трещин для стеклопластбетонных элементов, равной 0,5 мм. При непродолжи-

тельном раскрытии трещин в нормальных условиях эксплуатации это значение принимают равным 0,7мм

В общем случае расчетную ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента ( $w_k$ ), принимают равной средним относительным деформациям продольной растянутой композитной арматуры на участке между трещинами, умноженным на расстояние между трещинами. Расстояние между трещинами следует определять из условия, по которому разности усилий в растянутой композитной арматуре в сечении с трещиной и в сечении по середине участка между трещинами уравниваются силами сцепления композитной арматуры с бетоном. При этом разность усилий в композитной арматуре на этом участке принимается равной усилию, воспринимаемому растянутым бетоном перед образованием трещин. Относительные деформации растянутой композитной арматуры в сечении с трещиной, нормальном к продольной оси элемента, определяются в общем случае из системы расчетных уравнений деформационной модели по заданным значениям изгибающих моментов и продольных сил.

Для изгибаемых элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, сосредоточенной у растянутой и сжатой граней элемента, определение относительных деформаций растянутой композитной арматуры в сечении с трещиной согласно [3] допускается производить по упрощенной схеме, рассматривая железобетонный элемент в виде сжатого пояса бетона и растянутого пояса композитной арматуры с равномерным распределением напряжений по высоте сжатого и растянутого поясов по формуле:

$$w_k = \frac{1}{2} \frac{\sigma_f}{\rho_{f,eff}} \frac{f_{ctm}}{\tau_{bm}} \left( \frac{\sigma_f - \beta \cdot \sigma_{cr,f} + \eta_r \cdot \varepsilon_r \cdot E_f}{E_f} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_f$  – напряжения в композитной арматуре в сечении с трещиной;

$\sigma_{cr,f}$  – максимальные напряжения в композитной арматуре в стадии формирования трещин, определяемые по формуле:

$$\sigma_{cr,f} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{f,eff}} (1 + \alpha_f \cdot \rho_f); \quad (3)$$

$$\rho_{f,eff} = \frac{A_f}{A_{c,eff}}; \quad (4)$$

$A_{c,eff}$  – эффективная площадь бетона растянутой зоны сечения;

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_{cm}}; \quad (5)$$

$\beta$  – эмпирический коэффициент, принимаемый для усреднения напряжений композитной арматуры на участке между трещинами;

$\eta_r$  – коэффициент, учитывающий вклад деформаций усадки.

Значения напряжений сцепления  $\tau_{bm}$ , коэффициентов  $\beta$  и  $\eta_r$ , предлагается определять по табличным данным в зависимости от вида нагружения и стадии трещинообразования.

В формуле (2) выражение перед скобками отражает среднее расстояние между трещинами, а выражение в скобках – разность относительных деформаций бетона и арматуры.

Ширину раскрытия нормальных трещин изгибаемых элементов согласно методике [4] определяют по формуле:

$$w_k = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi_3 \cdot \psi_f \cdot \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot l_f; \quad (6)$$

$l_f$  – базовое расстояние между смежными нормальными трещинами, определяемое согласно формуле:

$$l_f = 0.5 \cdot \frac{A_{c,eff}}{A_f} \cdot \varnothing_f; \quad (7)$$

и принимают не менее  $10\varnothing_f$  и 10 см и не более  $40\varnothing_f$  и 40 см. Причем, значение  $A_{c,eff}$  принимают равным площади сечения растянутой зоны при ее высоте в пределах не менее  $2c$  и не более  $0,5h$ .

$\psi_f$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами.

Допускается принимать коэффициент  $\psi_f = 1$ ; если при этом условие (1) не удовлетворяется, то значение  $\psi_f$  для изгибаемых элементов допускается определять по формуле:

$$\psi_f = 1 - 0.8 \cdot \frac{M_{crc}}{M}, \quad (8)$$

где  $M_{crc}$  – момент образования трещин.

$\varphi 1$  – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки;

$\varphi 2$  – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры;

$\varphi 3$  – коэффициент, учитывающий характер нагружения.

Значения напряжения  $\sigma_f$  в растянутой арматуре изгибаемых элементов определяют по формуле:

$$\sigma_f = \left[ \frac{M(h_0 - y_c)}{I_{red}} \pm \frac{N}{A_{red}} \right] \cdot \alpha_{f1}, \quad (9)$$

где  $A_{red}$ ,  $y_c$  - площадь приведенного поперечного сечения элемента и расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести приведенного сечения, определяемые по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов, принимаемая коэффициент приведения арматуры к бетону  $\alpha_{f1}$  равным:

$$\alpha_{f1} = \frac{E_f}{E_{b,red}} \quad (10)$$

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

$$E_{b,red} = \frac{f_{cn}}{\varepsilon_{b,red}} \quad (11)$$

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

С целью оценки достоверности описанных выше методик, нами был выполнен расчет ширины раскрытия трещин по указанным зависимостям, для изгибаемого элемента, армированного в растяну-

той 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 арматуры 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 А.Р. Волик [7] и А.А. Почебыт [8].

Кроме методик, предложенных в документах [3] и [4] был выполнен расчет ширины раскрытия трещин с использованием общего деформационного метода, реализованного в программном продукте ВЕТТА+. Данный программный продукт в его части, предназначенной для научных исследований, позволяет в качестве исходных данных задавать произвольные диаграммы деформирования материалов (полученных по опытным данным), что ставит возможным расчет бетонных сечений, армированных стеклопластиковой арматурой (рис.1).

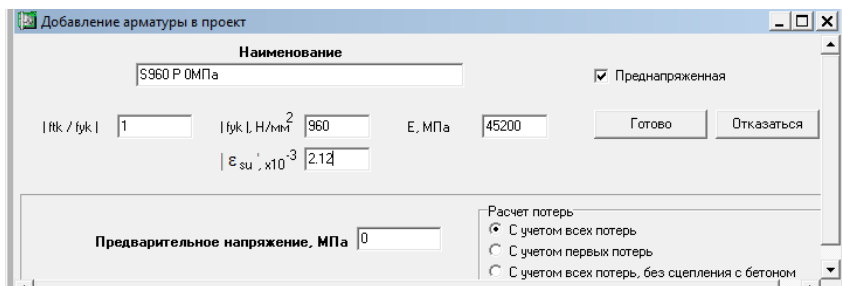


Рис.1. Задание параметров диаграммы деформирования стеклопластиковой арматуры

## ПРОТОКОЛ

*Расчет по сечению, нормальному к продольной оси элемента*

Проектная прочность

MRd <sub>x</sub> , кНм	MRd <sub>y</sub> , кНм	NRd, кН
	9.34	0.00

I группа предельных состояний

Момент трещинообразования

Mcr <sub>x</sub> , кНм	Mcr <sub>y</sub> , кНм	Ncr, кН
	1.18	0.00

II группа предельных состояний

Заданные усилия от нормативной нагрузки

MSd <sub>x</sub> , кНм	MSd <sub>y</sub> , кНм	NSd, кН
	9.30	0.00

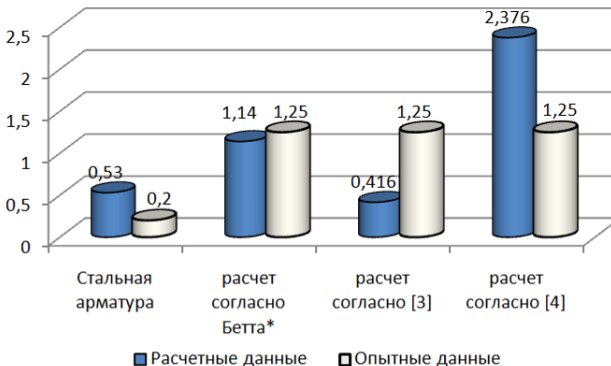
Ширина раскрытия нормальной трещины

w <sub>k</sub> , мм
1.14

II группа предельных состояний

Рис. 2. Протокол результатов расчета сечения для СПА в программе BETTA+

В качестве исходных данных для первого численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [8]: изгибаемый элемент, прямоугольного сечения, с размерами 100×180мм, армированный в растянутой зоне 4Ø8мм стеклопластиковой арматуры (в два ряда, с расстоянием между ними 30мм) с характеристиками:  $f_i=960\text{МПа}$ ,  $E_f=45200\text{МПа}$ , в сжатой зоне 2Ø6S500. Бетон класса C25/30. Результаты расчета ширины раскрытия трещин по рассматриваемым методикам показаны на рис. 3.



\* - расчет в программном продукте Betta+

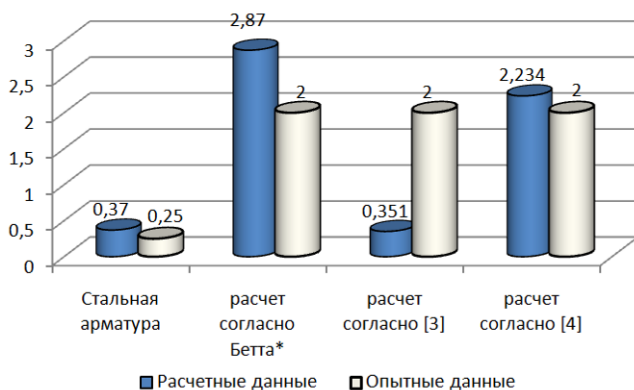
Рис. 3. Сравнение результатов расчета с опытными данными [8]

В качестве исходных данных для второго численного эксперимента использованы данные, соответствующие экспериментальным условиям, описанным в [7]: изгибаемый элемент, прямоугольного

сечения, с размерами 120×220мм, армированный в растянутой зоне 1Ø10мм стеклопластиковой арматуры с характеристиками:  $f_t=962\text{МПа}$ ,  $E_f=45660\text{МПа}$ . Бетон класса С25/30. Результаты расчета ширины раскрытия трещин по рассматриваемым методикам показаны на рис. 4.

Анализ численного эксперимента показал, что методика расчета ширины раскрытия трещин, описанная в строительных правилах [4] дает большее приближение к опытным данным по сравнению с методикой, изложенной в рекомендациях [3].

Наибольшее приближение к экспериментальным данным по трещиностойкости изгибаемых стеклопластбетонных элементов без предварительного напряжения дает общий деформационный метод расчета, реализованный в программном комплексе BETAPLUS. Ширина раскрытия трещин, рассчитанная в данном программном комплексе отличалась от опытных данных на величину, не более 30%



\* - расчет в программном продукте Betta+

Рис. 4. Сравнение результатов расчета с опытными данными [7]

## 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. (1ая 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.