

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗГИБУ НЕРАЗРЕЗНЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОМБИНИРОВАННЫМ  
АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ НАД  
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ**

*ГИЛЬ А. И., ЛАЗОВСКИЙ Е. Д.*

Полоцкий государственный университет

В современной строительной отрасли Республики Беларусь требуется непрерывный рост эффективности и технологичности производства строительных конструкций, снижения трудоемкости и экономических затрат, применения новых энергоэффективных материалов и изделий. Одной из задач по усовершенствованию отрасли является расширение области использования неметаллического композитного стержневого армирования в изгибаемых железобетонных элементах. Композитная неметаллическая арматура имеет ряд положительных физико-механических характеристик по сравнению с металлическим (стальным) аналогом: коррозионно стойкая, устойчива к воздействиям отдельных видов кислот, щелочей, солей и сернистых газов, диэлектрически проницаема, имеет малый удельный вес. Из отрицательных свойств отмечается следующее: низкий модуль упругости и низкая огнестойкость [1, 2].

Одной из основных проблем внедрения в строительную практику неметаллической композитной стержневой арматуры является низкое значение модуля упругости по сравнению со стальным аналогом и хрупкое разрушение при разрыве без значительных деформаций. Применение данного вида армирования в изгибаемых железобетонных элементах приводит к их хрупкой форме разрушения конструкции, вследствие повышенной деформативности и большой ширины раскрытия трещин.

Одним из решений названной проблемы является применение комбинированного армирования – введение в растянутую зону элемента, армированную неметаллическими композитными стержнями, изгибаемого железобетонного элемента некоторого количества металлической (стальной) стержневой арматуры.

Применение неметаллической композитной стержневой арматуры без предварительного напряжения в составе комбинированного армирования растянутой зоны сечений над опорами изгибаемых неразрезных железобетонных балок значительно расширит область применения данного вида армирования и позволит более рационально использовать ее физико-механические характеристики.

Для расширения области применения композитной неметаллической арматуры разработана методика расчета сопротивления изгибу статически неопределимых (неразрезных) железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой, которая учитывает особенности напряженно-деформируемого состояния растянутой зоны над промежуточной (неразрезной) опорой на основе методов строительной механики, общей деформационной модели и блочной модели сопротивления железобетона [3]. Для реализации методики расчета необходимо получить распределение относительных деформаций комбинированного армирования по длине элемента, для этого разработана расчетная модель напряженно-деформированного состояния поперечных сечений.

В предлагаемой расчетной модели напряженно-деформированного состояния поперечных сечений вводятся следующие предпосылки базовой блочной модели сопротивления, разработанной для изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок со стальным армированием с учетом конструктивных особенностей элемента:

– изгибаемый статически неопределимый (неразрезной) железобетонный элемент представляет собой элемент длиной  $L$ , разделенный на подэлементы конечной длины  $\Delta L$  (рис. 1), образованные двумя соседними трещинами нормального отрыва, которые возникают в поперечных сечениях, где растягивающие напряжения в бетоне достигают предельных значений. Подэлементы связаны между собой растянутой стальной, композитной стержневой арматурой и сжатым бетоном [4];

– бетон, композитная и стальная арматура работают совместно в соответствии с принятыми законами сцепления [5]. Касательные напряжения по площади контакта арматурного стального стрежня с бетоном и их взаимное смещение связаны по зависимости  $\tau_{bs} = f_{ym(0.2m)}(s_s)$ , касательные напряжения по площади контакта арма-

турного композитного стержня с бетоном и их взаимное смещение связаны по зависимости  $\tau_{bf} = f_{jm}(s_{ij})$ ;

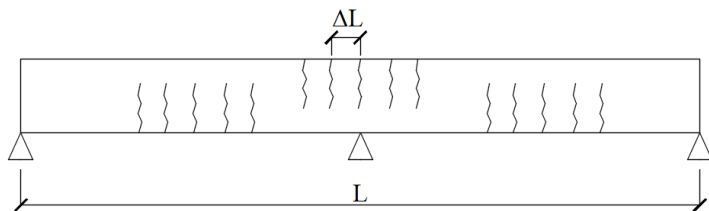


Рисунок 1. Схема разбиения железобетонного элемента на подэлементы

– растягивающие напряжения в бетоне распределяются равномерно от стальной и композитной неметаллической стержневой арматуры по эффективной площади вокруг стержней, высотой равной глубине эффективной площади бетона  $h_{ct,eff}$  (мм) (рис. 2), деформации на растяжение бетона предполагаются постоянными по всей площади [6];

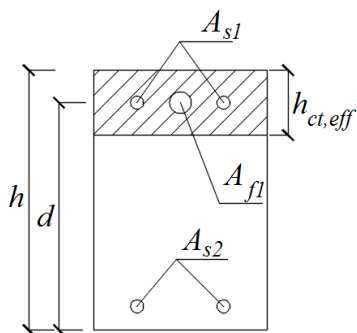


Рисунок 2. Эффективная высота  $h_{ct,eff}$  растянутого бетона в сечении на промежуточной опоре балок с комбинированным армированием

– образование трещин нормального отрыва в растянутой зоне с комбинированным армированием на промежуточной опоре происходит при достижении относительных деформаций бетона на уровне центра тяжести стальной и композитной неметаллической растянутой арматуры значений, соответствующих значению предельной растяжимости бетона сечения на изгиб [7];

– в процессе деформирования под нагрузкой выделяют две стадии трещинообразования: неустановившееся трещинообразование,

т. е. появление новых трещин нормального отрыва возможно, и установившееся – появление новых трещин нормального отрыва невозможно, т. е. количество трещин не изменяется;

– ширина раскрытия трещин нормального отрыва  $w_m$  в растянутой зоне на промежуточной опоре изгибаемой статически неопределимой (неразрезной) железобетонной балки обусловлена взаимным смещением арматурных стальных и композитных неметаллических стержней относительно бетона в уровне его центра тяжести по обе стороны от краев трещины по длине участка перераспределения растягивающих напряжений.

Для определения относительных деформаций стальной, композитной неметаллической арматуры и бетона растянутой зоны по длине подэлемента на основе принятых предпосылок и зависимостей между касательными напряжениями и взаимными смещениями конкретных стальных и композитных стержней с бетоном, выделяется участок бетона со стороны центральной трещины нормального отрыва высотой равной высоте эффективной растянутой зоны бетона, площадью поперечного сечения  $A_{ct,eff} = h_{ct,eff}b_w$  с площадью композитных стержней  $A_f$ , стальных  $A_s$  и длиной  $dx$  (рис. 3).

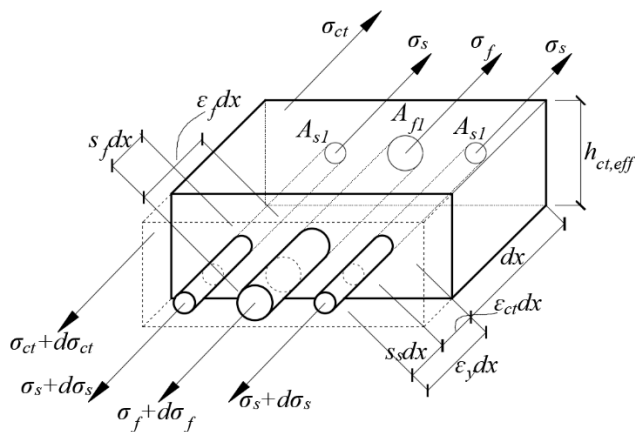


Рисунок 3. Участок бетонного подэлемента с комбинированным армированием

Для получения распределения относительных деформаций растянутого бетона, стальной и композитной неметаллической арматуры бетонный подэлемент, образованный центральной и ближайшей от нее трещинами нормального отрыва в растянутой зоне над про-

межуточной опорой высотой  $h_{ct,eff}$ , разделяется  $n$  поперечными сечениями на  $(n - 1)$  интервалов длиной  $\Delta x$ . Разделение на интервалы производят таким образом, чтобы границы интервалов на концах бетонного подэлемента совпадали с границами трещин нормального отрыва рассматриваемой балки. Уравнения равновесия и совместности деформирования для подэлемента, выделенного трещинами нормального отрыва, представляются в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} s_s = \varepsilon_y(\sigma_s) - \varepsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_s A_s}{A_{ct,eff}} \right) \\ \frac{d}{dx} s_f = \varepsilon_f(\sigma_f) - \varepsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_f A_f}{A_{ct,eff}} \right), \\ \frac{d}{dx} \sigma_s = \frac{4}{\varnothing} \tau(s_s) \\ \frac{d}{dx} \sigma_f = \frac{4}{\varnothing} \tau(s_f) \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $N$  – растягивающее усилие на рассматриваемом этапе нагружения, Н.

Из решения системы уравнений (2) определяется распределение относительных деформаций стальной, композитной неметаллической арматуры и растянутого бетона и вычисляют значение кривизны в  $i$ -том сечении по длине рассматриваемого подэлемента:

$$\frac{1}{r_{c,i}} = \frac{\varepsilon_{y(f),i}}{d - x_{c,i}}; \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{y(f),i}$  – относительные деформации в стальной и композитной неметаллической арматуре;

$d$  – рабочая высота сечения балки, мм;

$x_{c,i}$  – высота сжатой зоны бетона в  $i$ -том сечении, мм.

Для дальнейших расчетов по определению прочности изгибаемого элемента в целом, необходимо получить зависимость «изгибающий момент – угол поворота» на всех этапах нагружения. При

этом угол поворота  $\theta$  можно определить из следующего интегрального уравнения (при известном распределении кривизны по длине участка балки  $l_p$ , включающего один или несколько подэлементов, с началом у центральной трещины нормального отрыва справа или слева):

$$\theta = \int_{l_p} \frac{1}{r_c} (x) dx \quad (3)$$

Для расчета изгибаемых статически неопределимых (неразрезных) железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой предполагается применение метода сосредоточенных деформаций, с учетом полученных зависимостей «изгибающий момент – угол поворота».

На основе блочной модели сопротивления изгибаемых железобетонных элементов, зависимостям «касательные напряжения – взаимное проскальзывание» для металлической (стальной) и композитной неметаллической стержневой арматуры с бетоном предложены расчетная модель, уравнения напряженно-деформированного состояния по длине бетонного подэлемента, выделенного трещинами нормального отрыва в растянутой зоне над промежуточной опорой и алгоритм их решения. Предложенная расчетная модель позволяет получить распределение относительных деформаций металлической (стальной), композитной неметаллической стержневой арматуры и растянутого бетона по длине бетонного подэлемента с учетом соотношения суммарной величины предельного растягивающего усилия композитной и стальной арматуры в составе комбинированного армирования, необходимые для дальнейших расчетов прочности.

#### Список использованных источников:

1. Зак, А. Ф. Физико-химические свойства стеклянного волокна / А. Ф. Зак. – М.: Ростехиздат, 1962. – 224 с.
2. Коррозионная стойкость стеклянного волокна и стеклопластиковой арматуры для бетона / Ю. В. Кондратьева [и др.] // Строво и архитектура Белоруссии. – 1972. – № 2. – С. 39 – 40.
3. Hil, A.I. Analysis of the bending continuous rc-beams with hybrid reinforcement in the tensile zone under intermedia support / A.I. Hil,

Y.D. Lazouski // Vestnik of Brest State Technical University – 2021. – №3. – P. 5 – 8.

4. Mantredi G. A refined R.C. beams elements including bond-slip relationships for the analysis of continuous beams / Mantredi G., Pecce M. // Computer and Structures, Volume 69, Issue 1, October 1998 – p.p. 53 – 62.

5. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Germany. – 402 p.

6. Тур В. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием стеклопластиковыми и металлическими стержнями / В. В. Тур, В. В. Малыха // Ресурсо-економі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наукових праць. – Рівне, 2012. – Вип. 24. – С. 271 – 281.

7. Тур, В. В. Прочность и деформации бетона в расчетах железобетонных конструкций / В. В. Тур, Н. А. Рак. – Брест: БрГТУ, 2003. – 252 с.