

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластобетонные конструкции / Н. П. Фролов – М. : Стройиздат, 1980.
2. Рекомендации по проектированию конструкций из напрягающего бетона с композитной арматурой : утв. М-вом архитектуры и строительства Респ. Беларусь 28.11.2014. – Минск : ГП «Института жилища – НИИПТИС им. Атаева С.С.», 2014.
3. Семенюк, О. С. Собственные деформации и самонапряжения элементов из напрягающего бетона при его расширении в условиях осевого ограничения: дис ... канд. техн. наук: 2017 / О. С. Семенюк. – Брест, 2017.
4. Талецкий, В.В. Увеличение модуля упругости стеклопластиковой арматуры / В. В. Талецкий // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сборник научно-технических статей (материалы научно-технического семинара), 22-23 мая 2013 г. В 2 ч. Ч. 1 / ред. колл.: В.Ф. Зверев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 130-136.

УДК 624.046.02

### **ОБЗОР МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*ПОЧЕБЫТ А. А.*

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы  
Гродно, Беларусь

Вопросами армирования бетонных конструкций стержнями из композитной арматуры занимаются исследовательские центры по всему миру: Институт бетона Америки (The American Concrete Institute), Японское сообщество гражданских инженеров (Japan Society for Civil Engineers) и другие исследовательские группы, например, в Канаде, Италии и др. На основании комплексных исследований, проведенных к настоящему времени, разработаны и совершенствуются нормативные документы по вопросам проектирования

и расчета бетонных строительных конструкций, армированных композитными стержнями: АСІ 440.1R-15 (США) [1], fibBulletin 40 (Евросоюз) [2], CAN/CSA-S806-02 (Канада) [3], СП 63.133320.2012 (Россия) [4], ДСТУ-Н (Украина) [5], CNR-DT 203/2006 (Италия) [6]. В Беларуси отсутствуют нормативные документа, регулирующие производство и применение композитных материалов. Применение осуществляют на основе данных испытаний производителей данной арматуры.

Высокая деформативность композитной рабочей арматуры фактически не позволяет производить большинство конструкций, которые привычно выполняются в железобетоне. Фактически, для композитной арматуры отношение прочности к жесткости на порядок больше, чем у стали, и это влияет на распределение напряжений вдоль рабочей высоты.

Если учесть, что в качестве сжатой композитную арматуру использовать невозможно, то расчет и конструирование композитобетонных конструкций не могут выполняться по методикам, справедливым в отношении железобетона. Уравнения равновесия, действительные в отношении сечений со стальной арматурой, совершенно не работают в отношении сечений с арматурой, имеющей значительно более низкий модуль упругости [1].

В настоящее время предлагаются рекомендации, регулирующие проектирование композитобетонных конструкций главным образом, в виде модификаций существующих документов для железобетонных конструкций. Основные гипотезы, заложенные в основу расчета композитобетонных изгибаемых элементов для рассматриваемых норм и рекомендаций [1 – 6].

- гипотеза плоских сечений выполняется на всех этапах работы сечения;
- присутствует совместная работа композитной арматуры и бетона;
- бетон в растянутой зоне не учитывается;
- композитная арматура работает по линейно-упругой диаграмме до разрушения.

В мировой практике композитобетонные конструкции рассчитываются по предельным состояниям несущей способности и эксплуатационной пригодности. При расчете по предельному состоянию несущей способности, как и для железобетонных конструкций,

выделяют два основных расчетных случая: разрушение по растянутой арматуре и разрушение по сжато-бетону. Расчетный случай разрушения в нормативных документах [1 – 6] определяется при сопоставлении величин фактического ( $\rho_f$ ) и сбалансированного ( $\rho_{fb}$ ) процента армирования.

**Расчет в соответствии с ACI 440.1R-06 [1].** Основные принципы расчета прочности в соответствии с ACI 440.1R-06 [1] указывают на то, что расчетная прочность на изгиб в сечении конструктивного элемента должна превышать расчетный момент.

$$\varphi M_n \geq M_u \quad (1)$$

Расчетная прочность на изгиб определяется как номинальная прочность на изгиб конструктивного элемента, умноженная на коэффициент понижения прочности ( $\varphi$ ). Расчетный момент определяется как момент, рассчитанный посредством использования расчетных нагрузок.

Ввиду того, что композитная арматура не обладает пластичными свойствами, сбалансированный коэффициент армирования рассчитывается с использованием расчета прочности на разрыв.

$$\rho_{fb} = 0,85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2)$$

Если коэффициент армирования меньше, чем сбалансированный коэффициент армирования ( $\rho_f < \rho_{fb}$ ), происходит разрушение по композитной арматуре. В противном случае ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ) происходит разрушение по бетону.

При разрушении по сжато-бетону распределение нагрузок в бетоне приближено к эпюре с равномерным распределением напряжений по высоте сжатой зоны. Композитная арматура обладает линейно-упругим поведением при разрушении бетона, поэтому напряжения в композитной арматуре, не достигнут своих предельных значений.

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'} \right) b d^2 \quad (3)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + 0,85 \frac{\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}}. \quad (4)$$

При разрушении по растянутой арматуре бетон не достигает максимальных деформации, в этом случае прямоугольная эпюра распределения напряжений бетона не применяется. В данном случае, понадобится использовать эквивалентную эпюру напряжений, которая описывает распределение напряжений в бетоне при достижении определенного уровня деформации.

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 C_b}{2} \right), \quad (5)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d. \quad (6)$$

В указанных руководствах рекомендуется проектировать конструкции с разрушением по бетону.

**Расчет в соответствии с fib Bulletin 40.** В основе расчета несущей способности используется EN 1992.

$$M_n \geq M_u. \quad (7)$$

Как и в ACI [1], характер разрушения определяется в зависимости от величин фактического и сбалансированного коэффициента армирования. Величина сбалансированного процента армирования зависит от механических свойств композитной арматуры и бетона и рассчитывается из выражений, полученных с учетом уравнения равновесия внутренних сил.

$$\rho_{fb} = \frac{0,81(f_{ck} + 8) \varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left( \frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)}. \quad (8)$$

В случае разрушения по сжатому бетону значение предельного разрушающего изгибающего момента определяется исходя из прочности бетона сжатой зоны с последующей проверкой условия исключения разрушения от разрыва арматуры.

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left( 1 - \frac{\lambda \xi}{2} \right), \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_f} \quad (10)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu}}{\gamma_c\rho_f E_f}}}{2} \quad (11)$$

В случае разрушения по растянутой арматуре, предварительно необходимо определить величину деформации сжатого бетона, исходя из этого, определяется относительная высота сжатого бетона.

$$M_n = \frac{A_f \cdot f_{fk}}{\gamma_f} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right), \quad (12)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{fu}} \quad (13)$$

**Расчет в соответствии СП 63.13330.2012.** Существующие нормы расчета в РФ по структурному содержанию не отличаются от европейских норм. Расчет конструкций без предварительного напряжения композитной арматуры по предельным состояниям первой группы выполняют по указаниям для железобетонных конструкций, при этом в расчетные зависимости вместо характеристик и параметров стальной арматуры подставляют соответствующие характеристики и параметры композитной. Значение граничной относительной высоты сжатой зоны, при котором предельное состояние конструкции наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре, напряжения равного расчетному сопротивлению определяется по формуле:

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult}}{\varepsilon_{b2}}} \quad (14)$$

При  $x > \xi_R h_0$  высота сжатой зоны определяется по следующим формулам:

$$x = \sqrt{(0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0)^2 + \mu_f\alpha_{f2}\omega h_0^2} - 0,5\mu_f\alpha_{f2}h_0, \quad (15)$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{bh_0}; \alpha_{f2} = \frac{E_f}{E_{b2}}; E_{b2} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b2}} \quad (16)$$

В противном случае:

$$x = \frac{R_f A_f}{R_b b} , \quad (17)$$

$$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) . \quad (18)$$

Проект украинских норм ДСТУ [5] и действующие итальянские нормы CNR [6] предлагают выполнять расчеты согласно действующих норм расчета железобетонных конструкций, заменяя характеристики стальной арматуры на неметаллическую. Специальных расчетных зависимостей нормами не вводится. В итальянских нормах введено дополнительное условие надежности – ограничение предельных деформаций композитной арматуры.

Основное отличие существующих методик расчета композитобетонных изгибаемых элементов заключается в принципах обеспечения надежности. Так в американских стандартах понижающий коэффициент  $\phi$  применяется к моменту, в стандартах, по Еврокоду, с помощью частных коэффициентов надежности по материалу и нагрузкам.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guide for the Design and Construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars: ACI 440.1R-15 – Farmington Hills: MI. ACI, 2015. – 88 p
2. FRP reinforcement in RC structures. Technical report TG9.3: fib bul. 40 – Lausanne, Switzerland: fib, 2007 – 151 p.
3. Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers: CAN/CSA–S806–02 – Toronto, Ontario, Canada: CSA, 2002
4. Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования: СП 63.13330.2012 – М.: Минрегион России, 2013 – 94 с.
5. Настанова з проектування та виготовлення бетонних виробів і конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальтового і скло ровінгів: ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 – Киев, Минрегион Украины, 2011 – 28 с.