



УДК 624.046.2

Антаков А.Б. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: antakof@mail.ru

Антаков И.А. – аспирант

E-mail: igor788@bk.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Анализ нормативных подходов к оценке прочности
нормальных сечений изгибаемых элементов,
армированных полимеркомпозитной арматурой**

Аннотация

В данной статье представлен анализ нормативных подходов к оценке прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных композитами. Рассмотрены методики расчета в соответствии с нормативными документами: США – ACI 440.1R-06 [1], Евросоюза – fib Bulletin 40 [2] и России – СП 63.13330.2012 [3]. Выявлены особенности и различия методик, их влияние на результаты проектирования и оценку работы конструкций.

Ключевые слова: полимеркомпозитная арматура, прочность нормальных сечений, бетонные конструкции, изгибаемые элементы.

Во многих странах изделия из полимеркомпозитных материалов вызывают большой интерес со стороны предприятий строительной отрасли. Полимеркомпозитная арматура (далее ПКА) обладает высокой прочностью на разрыв, в 3 раза выше, чем у стальной арматуры, малым удельным весом, высокой коррозионной стойкостью, низкой теплопроводностью. Одним из перспективных направлений применения ПКА является использование ее в качестве армирования бетонных конструкций. На сегодняшний день наиболее эффективная область применения композитов – конструкции, подверженные воздействию агрессивных сред.

В ряде стран существуют нормативные документы по применению и расчетам конструкций с полимеркомпозитной арматурой в строительстве (табл. 1).

Таблица 1

Перечень нормативных документов, регламентирующих применение композитной арматуры

Украина	ДСТУ-Н Композитная арматура, первая редакция 26.05.2011 г. (проект). «Руководство по проектированию и изготовлению бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой на основе базальтового и стеклянного ровингов».
США	ACI 440.3R-04 «Руководство по Методам Тестирования Композитной Арматуры для Армирования Бетонных Конструкций»; ASTM committee D30 «Свойства Арматурного Каркаса из Композитной Арматуры при Растяжении».
Канада	CAN/CSA-S806-02 «Проектирование и Разработка Строительных Конструкций с использованием Композитной Арматуры»; CAN/CSA-S6-06 «Канадский Кодекс Проектирование Мостов и Шоссе».
Евросоюз	fib Bulletin 40 «Армирование Бетонных Конструкций Композитной Арматурой».
Италия	CNR-DT 203/2006 «Руководство по Проектированию и Конструированию Бетонных Сооружений, Армированных Композитной Арматурой».
Япония	«Рекомендации по Проектированию и Конструированию Бетонных Сооружений, Армированных Композитными Материалами».

Далее рассмотрены методики расчета прочности нормальных сечений изгибаемых элементов по иностранным документам: США – ACI 440.1R-06 [1] и Евросоюза – fib Bulletin 40 [2].

На рис. 1 и 2 представлены блок-схемы методик определения прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА, согласно ACI 440.1R-06 [1] и fib Bulletin 40 [2].

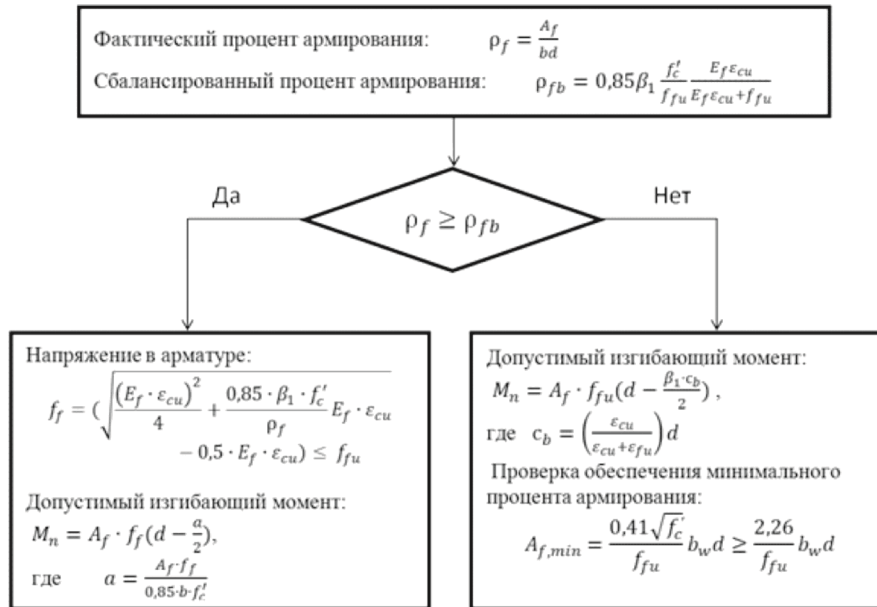


Рис. 1. Блок-схема методики определения несущей способности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА, АСІ 440.1R-06

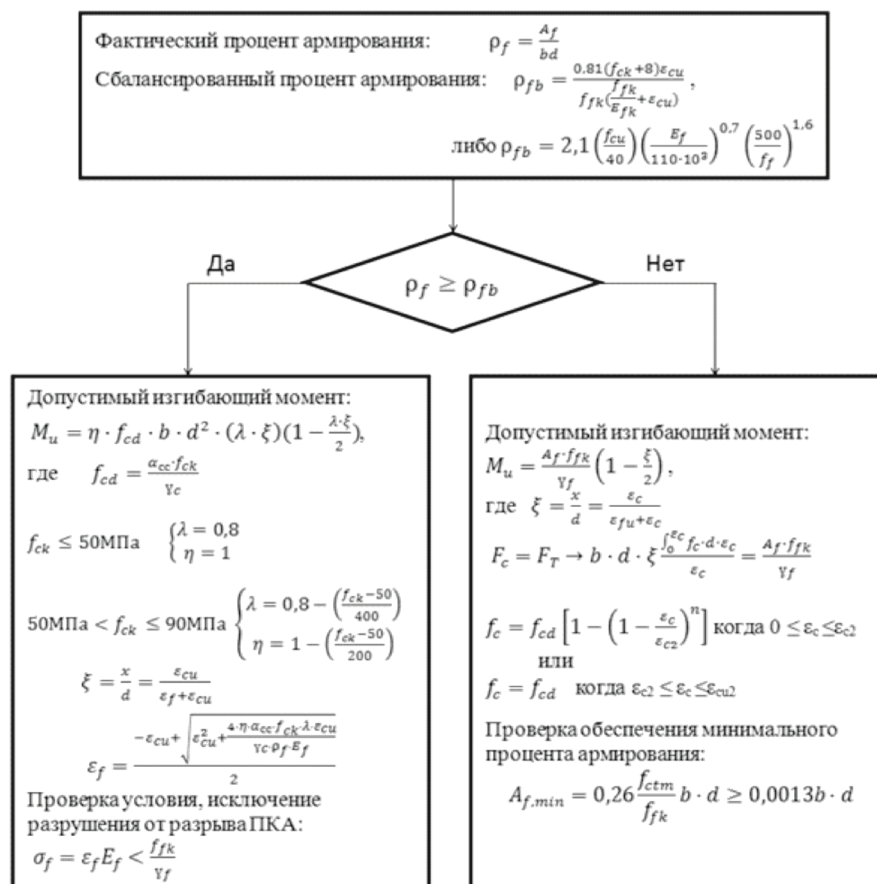


Рис. 2. Блок-схема методики определения прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА, fib Bulletin 40

В иностранных документах [1, 2] при расчете нормальных сечений изгибаемых элементов приняты три возможных механизма разрушения: в результате дробления бетона в сжатой зоне, разрыва растянутой арматуры и одновременное разрушение по бетону и арматуре. Алгоритм действий при расчете в обеих методиках схож, но

расчетные выражения различны. Характер разрушения определяется из отношения величин фактического и сбалансированного процентов армирования – ρ_f и ρ_{fb} соответственно. Значение ρ_{fb} с увеличением прочности бетона возрастает.

Для двух случаев, когда $\rho_f \geq \rho_{fb}$ – разрушение произойдет в результате дробления бетона в сжатой зоне, и $\rho_f < \rho_{fb}$ – в результате разрыва растянутой арматуры, имеются отдельные выражения для определения величины допустимого изгибающего момента.

При $\rho_f \geq \rho_{fb}$ в ACI 440.1R-06 [1] определяется напряжение в арматуре, затем величина допустимого изгибающего момента. В fib Bulletin 40 [2] значение допустимого изгибающего момента определяется исходя из прочности сжатой зоны бетона, с последующей проверкой условия исключения разрушения от разрыва арматуры.

При $\rho_f < \rho_{fb}$ в обеих методиках допустимая величина изгибающего момента определяется исходя из прочности арматуры. В fib Bulletin 40 [2] предварительно необходимо определить деформацию сжатия бетона, при котором происходит разрыв арматуры, исходя из которой определяется относительная высота сжатой зоны бетона. Затем в обеих методиках производится проверка обеспечения минимального процента армирования. Данная проверка обусловлена тем, что при значении процента армирования меньше определенной величины разрушение элемента может произойти по бетону, при напряжениях в арматуре меньше предельных, то есть при нагрузках меньше проектных значений. Причиной этому является достаточно низкий модуль упругости композитной арматуры порядка $(41-60) \times 10^3$ МПа.

В нашей стране в 2013 году был выпущен проект документа СП 63.13330.2012 [3] по проектированию конструкций с данным армированием. На рис. 3 представлена блок-схема методики определения прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА. Расчет по прочности нормальных сечений производится аналогично методике, существующей для железобетонных конструкций, – в зависимости от соотношения значений относительной высоты сжатой зоны бетона ξ_R и граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R .

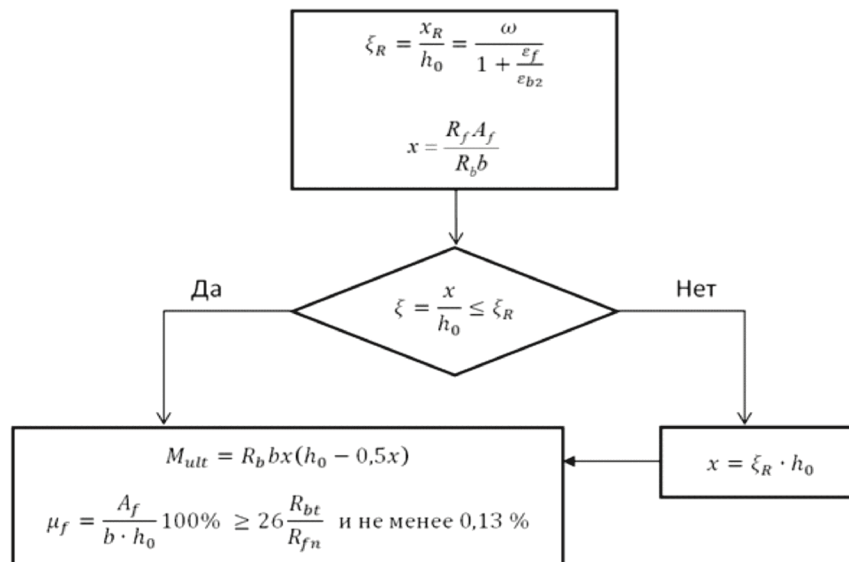


Рис. 3. Блок-схема методики определения несущей способности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА, СП 63.13330.2012

Величина ξ_R выполняет роль ρ_{fb} в иностранных методиках. Величины ρ_{fb} , определенные по методике fib Bulletin 40 [2], превышают ACI 440.1R-06 [1], при различных классах бетона, на 70-100 %. Для сравнения величин сбалансированного процента армирования по методикам СП [3] и ACI [1] необходимо определить $\rho_f = \frac{A_f}{b d}$, для соответствующей площади армирования A_f , определенной при соблюдении условия

$\xi = \xi_R A_f = \frac{\omega R_b b h_0}{\left(1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{b2}}\right) R_f}$. В результате величины сбалансированного процента армирования,

вычисленные по методике СП [3], превышают значения АСІ [1], при различных классах бетона, на 50-60 %. По результатам экспериментальных исследований [5], авторами была предложена величина $0,56\rho_{fb}$ в качестве критерия определения характера разрушения, где ρ_{fb} – сбалансированный процент армирования по АСІ.

В отличие от методик АСІ 440.1R-06 [1] и fib Bulletin 40 [2] в СП [3] рекомендуется соблюдать условие $x \leq \xi_R \cdot h_0$, то есть данное условие обеспечивает разрушение элемента от разрыва арматуры. В CAN/CSA-S806-02 [4] и АСІ 440.1R-06 [1] рекомендовано выполнять расчеты, исходя из разрушения бетона сжатой зоны.

Кроме расчетных выражений, немаловажными особенностями в методиках расчета являются различия в величинах коэффициентов надежности.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов надежности рассматриваемых норм проектирования [1, 2, 3].

Таблица 2

Коэффициенты надежности, используемые в методиках АСІ 440.1R-06, fib Bulletin 40 и СП 63.13330.2012

Наименование документа	Коэффициенты надежности		
	по арматуре	по бетону	по величине допустимого изгибающего момента
АСІ 440.1R-06	$C_E = 0,7; 0,8$. Коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкций. $\frac{f_{f,s}}{f_{f,u}} \leq 0,2$. $f_{f,s}$ – предел ползучести напряжения разрыва.	–	$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{при } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{при } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{при } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases}$ Коэффициент понижения прочности
fib Bulletin 40	$\frac{1}{\gamma_m}$; $\gamma_m = 1,425$. Коэффициент «материала». $\frac{1}{\gamma_f}$; $\gamma_f = 1,25$. Коэффициент надежности. $\frac{1}{\gamma_m}$; $\gamma_m = 3,6$. Коэффициент ограничения напряжения в арматуре.	$\gamma_c = 1,5; 1,2$. Частный коэффициент надежности для бетона*.	–
СП 63.13330.2012	$\gamma_f = 1,5; 1$. Коэффициент надежности по материалу. γ_{f1} : АСП= 0,7; 0,8; АБП= 0,8; 0,9. Коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции. γ_{f2} : АСП= 1; 0,3; АБП= 1; 0,4. Коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки.	$\gamma_b = 1,3; 1$. Коэффициент надежности по бетону при сжатии*.	–

Примечание: * – коэффициенты принимаются по нормам железобетонных конструкций.

В таблице 3 представлено сопоставление приведенных коэффициентов надежности в методиках ACI 440.1R-06 [1], fib Bulletin 40 [2] и СП 63.13330.2012 [3], в зависимости от вида нагрузки.

Таблица 3

Сопоставление приведенных коэффициентов надежности в методиках ACI 440.1R-06, fib Bulletin 40 и СП 63.13330.2012, в зависимости от вида нагрузки

Наименование документа	Вид нагрузки	
	кратковременная	длительная
ACI 440.1R-06	0,39-0,65	0,14-0,16
fib Bulletin 40	0,56	0,195
СП 63.13330.2012	0,46-0,6	0,14-0,24

Таким образом, использование коэффициентов надежности приводит к существенному занижению величин расчетного сопротивления арматуры и значений воспринимаемых сечениями моментов при кратковременных нагрузках до 0,4-0,6, а при длительных до 0,14-0,36.

В рассматриваемых методиках расчета имеются различия в принципах введения коэффициентов надежности. В СП 63.13330.2012 и fib Bulletin 40 предельный изгибающий момент определяется исходя из прочностей материалов, умноженных на коэффициенты надежности, в ACI 440.1R-06 используется коэффициент снижения прочности ϕ , применяемый к величине допустимого (номинальный) изгибающего момента M_n .

В отличие от ACI 440.1R-06 и fib Bulletin 40 в СП 63.13330.2012 при определении расчетного сопротивления растяжению арматуры вводится коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки γ_{f2} . В иностранных методиках он учитывается в расчете ограничения напряжений в материалах по второй группе предельных состояний.

С учетом приведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований в области прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных ПКА. Целью исследований ставится определение точного критерия, характеризующего вид разрушения изгибаемых бетонных элементов, армированных ПКА. В задачи входит проведение комплексных экспериментальных исследований и компьютерного моделирования для уточнения значений коэффициентов надежности, характера трещинообразования, разрушения и деформативности.

В результате приведенного анализа существующих методик расчета сделаны следующие выводы:

1. Вопрос определения точного критерия, характеризующего вид разрушения изгибаемых бетонных элементов армированных ПКА, является актуальным. В различных методиках расчета величины сбалансированного процента армирования различны, в зависимости от класса бетона разница между ними колеблется в интервале от 13 % до 100 %.

2. Использование коэффициентов надежности в рассмотренных нормативных методиках СП 63.13330.2012, ACI 440.1R-06 и fib Bulletin 40 приводит к существенному занижению величин расчетного сопротивления арматуры и значений воспринимаемых сечениями моментов в интервале 0,14-0,6, нивелирующих экономический эффект от использования композитов.

3. Вопросы расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных ПКА, и их разрушения от разрыва арматуры недостаточно изучены, так как методиками CAN/CSA-S806-02 и ACI 440.1R-06 рекомендовано выполнять расчеты, исходя из разрушения бетона сжатой зоны.

Список библиографических ссылок

1. ACI 440.1R-06. Руководство для проектирования и конструирования бетона с армированием композитной арматурой. Американский институт бетона, 2006. – 44 с.
2. fib Bulletin 40. Армирование бетонных конструкций композитной арматурой. Международная федерация по железобетону, Лозанна, 2007. – 147 с.

3. СП 63.13330.2012. Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования. – М.: Минрегион России, 2013. – 94 с.
4. CAN/CSA-S806-02. Проектирование и конструирование строительных конструкций с использованием композитной арматуры, Канадская Ассоциация Стандартов, Торонто, Онтарио, Канада, 2002.
5. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Экспериментальное исследование поведения прочности при изгибе бетонных балок армированных ПКА и сравнение предельного момента нагрузки с АСІ // Журнал гражданского строительства и строительных технологий, Том 1(2), Декабрь, 2010. – С. 27-42.

Antakov A.B. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: antakof@mail.ru

Antakov I.A. – post-graduate student

E-mail: igor788@bk.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Analysis of normative approaches to strength assessment of normal section bending members with fiber-reinforced polymer reinforcement

Resume

From the analysis of normative approaches to strength assessment of normal section of fiber-reinforced polymer (FRP) reinforced bending structures in SP 63.13330.2012, ACI 440.1R-06 and fib Bulletin 40 guidelines, a range of relevant study issues was developed. Also features and differences were found in the considered methods of design.

A certain criterion for defining the mode of failure of bending concrete members has not been formulated. The values of balanced reinforcement ratio different in various design guidelines. Depending on the grades of concrete, the difference between the values ranges from 13 % to 100 %. As distinct from SP 63.13330.2012 in CAN/CSA-S806-02 and ACI 440.1R-06 guidelines is recommended to design constructions based on the failure of the member is initiated by crushing of the concrete. Considering the safety factor leads to sufficient reduction of reinforcement resistance estimated values and of respective cross sections timing values: for short duration loads – up to 0,4-0,6 and for permanently acting loads – up to 0,14-0,36.

Keywords: fiber-reinforced polymer, strength of normal sections, concrete structures, bending members.

Reference list

1. ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute, 2006. – 44 p.
2. fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2007. – 147 p.
3. SP 63.13330.2012. Construction of concrete with non-metallic composite reinforcement. Rules for design. – М.: Ministry of Regional Development of Russia, 2013. – 94 p.
4. CAN/CSA-S806-02. Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2002.
5. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. An experimental study on the flexural behavior of FRP RC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI // Journal of Civil Engineering and Construction Technology, Vol. 1(2), December, 2010. – P. 27-42.