

Универсальный метод подбора композитной арматуры для изгибаемых элементов

П. П. Польской, Д. Р. Маилян

Донской государственный технический университет

Аннотация: Изложены основные положения подбора внешней композитной арматуры, основанные на использовании приведенных характеристик для размеров сечения конструкций и прочности традиционных и инновационных материалов для усиленных элементов прямоугольного профиля.

Ключевые слова: бетон, железобетон, композит, арматура, сталь, усиление, методика расчета, прочность, несущая способность.

Вышедший впервые в России свод правил СП 164.1325800 по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, анонсирован как свод правил проектирования. Проектирование железобетонных конструкций предполагает в первую очередь определение площади стальной рабочей арматуры, когда речь идет о новых конструкциях или подбор площади композитной арматуры, если речь идет об их усилении. Однако, приведенные в указанном СП формулы, основанные на классических уравнениях статики, либо на формулах деформационной модели, позволяют лишь проверить несущую способность усиленного сечения. В частности, расчетные формулы (6.6); (6.9) и др. не позволяют напрямую определять площадь внешней композитной арматуры. Поэтому расчеты таких конструкций, усиленных нетрадиционным методом, требуют особого внимания и подхода. Например при использовании классического метода расчета проблема подбора внешней арматуры усиления легко решается, если взять уравнения момента относительно центра тяжести сжатого бетона.

Поднятые в настоящей статье вопросы весьма насущны, поскольку кафедра железобетонных и каменных конструкций ДГТУ, начиная с 2012г., выполняет большой объем исследований по использованию композитных материалов при усилении железобетонных конструкций. Результаты этих

экспериментов уже были опубликованы на страницах журнала «Инженерный вестник Дона» [1-3] и других изданиях [4-6]. Во многом, полученные результаты хорошо согласуются с требованиями отечественных [7] и зарубежных [8, 9] источников. Однако, отдельные вопросы по теории расчета, а также требования по конструированию элементов усиления, требуют доработки. Рассмотрению очередного этапа исследований кафедры, связанного с прочностью наклонных сечений балок, посвящена очередная статья авторов на страницах данного журнала.

Рассмотренный ранее на страницах журнала «Инженерный вестник Дона» классический метод подбора площади сечения внешней композитной арматуры является итерационным, то есть требует нескольких попыток расчета. Концепция универсального метода расчета конструкций, усиленных внешним наращиванием сечений с использованием бетона и стали, в принципе, уже известна [10], однако она относилась к классическому методу усиления.

Версия этого метода расчета применительно к железобетонным элементам, усиленным внешним армированием композитными материалами - отсутствует и предлагается ниже. Его особенность состоит в том, что в расчетах используются приведенные характеристики, касающиеся размеров сечения элементов и прочности всех материалов в усиленном сечении.

Расчетная схема для изгибаемого элемента прямоугольного профиля, с внешней композитной арматурой, приклеенной на растянутой грани бетона, представлена на рис. 1

Согласно рекомендаций СП 164.1325800.2014, расчет нормальных сечений изгибаемых элементов, имеющих стальную рабочую арматуру в сжатой и растянутой зонах и дополнительную растянутую композитную арматуру, наклеенную на растянутой грани усиливаемых элементов, допускается

выполнять в зависимости от соотношений относительной высоты сжатой зоны бетона ξ

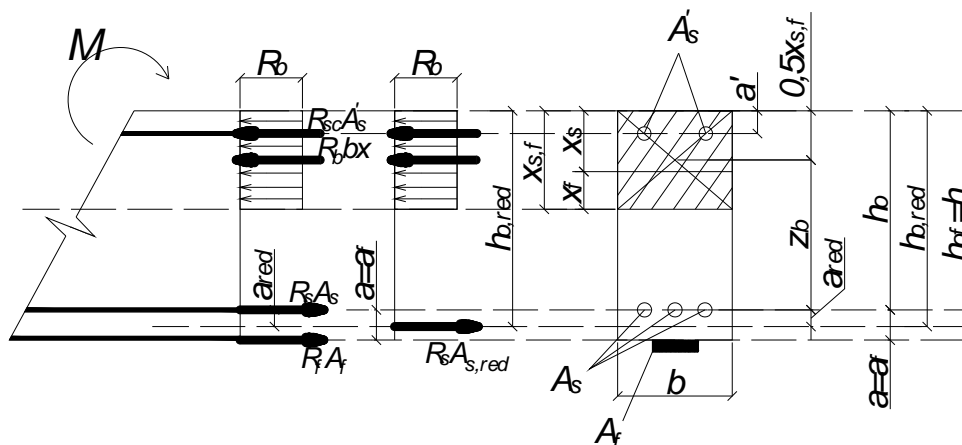


Рис.1. – Расчетная схема и эпюры напряжений в нормальном к продольной оси сечения изгибаемого элемента, усиленного внешней композитной арматурой применительно к универсальному методу расчета.

для усиленного сечения, определяемой из соответствующих условий равновесия, и его граничного значения, ξ_{RF} . Последнее определяется по формуле (6.2) СП 164.1325800.2014.

При соотношении $\xi \leq \xi_{RF}$, предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в растянутой стальной и композитной арматуре расчетного сопротивления. Относительную высоту сжатой зоны бетона ξ предлагается определять по формуле $\xi = x_{s,f} / h_{0,red}$ (1), где $x_{s,f}$ – высота сжатой зоны бетона железобетонного элемента, для усиленного композитными материалами сечения.

$h_{0,red}$ – приведенное значение рабочей высоты усиленного сечения, равное расстоянию от сжатой грани усиленного элемента до общего центра тяжести для стальной - A_s и внешней композитной - A_f арматуры.

$$\text{Величина } h_{0,red} \text{ определяется по формуле } h_{0,red} = h_{0,s} + a_{red}, \quad (2)$$

где $h_{0,s}$ – расстояние от наиболее удаленной сжатой грани бетона до центра тяжести стальной рабочей арматуры;

a_{rsd} – расстояние от центра тяжести стальной растянутой арматуры усиленного элемента до общего центра тяжести между стальной и композитной арматурой ($A_s + A_f$);

$h_{0,rsd}$ – рабочая высота сечения для композитной арматуры, численно равная полной высоте сечения, ввиду малой толщины композита.

Учитывая различия в значениях расчетных сопротивлений стальной и композитной арматуры, положение их центра тяжести a_{rsd} определяется с учетом приведенной площади всей растянутой арматуры $A_{s,f,red}$.

$$A_{s,f,red} = A_s + A_f * \frac{R_f}{R_s} \quad (3)$$

$$a_{rsd} = \frac{R_f A_f (h_{0,f} - h_{0,s})}{R_s A_s + R_f A_f} \quad (4)$$

В этих формулах: A_s и A'_s – соответственно площадь растянутой и сжатой стальной арматуры;

A_f – площадь сечения композитной арматуры усиления;

R_s и R_{sc} – соответственно расчетные сопротивления стальной арматуры на растяжение и сжатие в усиленном элементе. Их значения определяются согласно рекомендаций СП.63.13330.

R_f – расчетное сопротивление композитной арматуры усиления, которое определяется по формуле (5.1) СП 164.1325800.2014.

При выполнении первого расчетного условия, а именно $\xi \leq \xi_{Rf}$ значение ξ определяется по формуле (5), а ξ_{Rf} по формуле (21).

$$\xi = \frac{(R_s * A_{s,f,red} - R_{sc} * A'_s)}{R_y * b * h_{0,rsd}}, \quad (5)$$

в которой величина b – ширина усиливаемого элемента; R_b – расчетное сопротивление бетона усиливаемого элемента, принимаемого по материалам натурного обследования конструкции в зависимости от класса бетона.

Проверка прочности балки, усиленной внешним наращиванием композитной арматурой со стороны растянутой зоны выполняется по условию:

$$M_{f,ult} = R_b b x_{s,f} (h_{0,red} - 0,5x_{s,f}) + R_{sc} A'_s (h_{0,red} - a') \quad (6)$$

где a' – расстояние от сжатой грани бетона до центра сжатой арматуры A'_s в усиливаемом элементе;

$x_{s,f}$ – полная высота сжатой зоны бетона в усиленном композитными материалами элементе, состоящая из двух слагаемых $x_{s,f} = x_s + x_f$ (7). В этом выражении величина x_s – часть высоты сжатой зоны бетона, соответствующая работе стальной арматуры; x_f – часть высоты сжатой зоны бетона, приходящаяся на долю работы внешней композитной арматурой.

$$x_{s,f} = \frac{(R_s A_{s,red} - R_{sc} A'_s)}{R_b \cdot b} \quad (8)$$

Сечение внешней композитной арматуры усиления определяется по формуле:

$$A_f = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (9)$$

где A и B – численные значения в см^2 , получаемые из адаптированных к композитным материалам выражений;

$$A = [R_s A_s - R_{sc} A'_s - R_b b (h_0 + a)] / 0.5 R_f \quad (10)$$

$$B = \{ 2[M + (R_{sc} A'_s a' - R_s A_s h_0)] R_b b + [R_s A_s - R_{sc} A'_s]^2 \} / R_f^2 \quad (11)$$

При отсутствии сжатой рабочей арматуры A'_s в усиливаемом элементе, или при высота сжатой зоны бетона $x \leq 2a'$, когда эта арматура не учитывается в расчете выражения (10) и (11) соответственно примут вид.

$$A = \frac{R_s A_s - R_b b (h_0 + a)}{0.5 R_f} \quad (12)$$

$$B = \frac{2(M - R_s A_s h_0) R_b b + R_s^2 A_s^2}{R_f^2} \quad (13)$$

Полная высота сжатой зоны бетона в усиленном элементе определяется по формуле:

$$x_{s,f} = \frac{R_s A_s + R_f A_f}{R_b b} \quad (14)$$

Для расчетного случая №1 высота сжатой зоны бетона не должна превышать своей граничной величины, определяемой из выражения:

$$x_{s,f} \leq x_{Rf} = \xi_{R,f} * h_{0,red} \quad (15)$$

В случае, когда условие (15) не выполняется из-за того, что площадь внешней композитной арматуры принята по конструктивным соображениям и окажется больше расчетной, предельный момент, воспринимаемый усиленным сечением, вычисляется по формуле (16):

$$M_{ult} = R_b b \tilde{x} (h_{0,red} - 0.5 \tilde{x}) + R_{sc} A'_s (h_{0,red} - a') + \sigma_f A_f a_f \quad (16)$$

В данной формуле предельное значение высоты сжатой зоны бетона \tilde{x}_{Rf} и напряжения в композитной арматуре σ_f определяются в зависимости от расчетных условий.

При наличии расчетного условия №2, т. е. $\xi_{Rf} < \xi < \xi_R$, величина \tilde{x} принимается равной $\tilde{x} = \xi_{Rf} h$, а напряжение σ_f – определяется по формуле

$$\sigma_f = [\varepsilon_{b2} (\frac{\omega h}{\tilde{x}} - 1)] E_f \quad (17)$$

Для расчетного условия №3, когда $\xi_{Rf} < \xi_R < \xi$, значение $\tilde{x} = \xi_R h_0$ (18), а напряжение в композитной арматуре - по формуле (18).

$$\sigma_f = [\varepsilon_{b2} (\frac{\omega^* h}{\tilde{x}} - 1) - \varepsilon_{bt}^0] * E_f \quad (18)$$

В формулах (17) и (18) характеристика сжатой зоны бетона ω принимается равным 0,8 или 0,7, соответственно для конструкций из бетона класса до В60 и В70 – В100.

$\varepsilon_{b2} = 0.0035$ – для тяжелого бетона класса В60.

ε_{bt}^0 – начальные деформации растянутой грани сечения определяемые по формуле:

$$\varepsilon_{bt}^0 = \frac{\varepsilon_s^0 h + \varepsilon_b^0 a}{h_0} \quad (19)$$

где ε_s^0 и ε_b^0 – начальные относительные деформации в стальной арматуре и бетоне, принимаемые согласно СП 164.1325800.2014 по П.6.2.4., формулы (6.3) и (6.4).

ξ_R – граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона для обычного железобетонного элемента определяется согласно СП.63.13330. Для бетонов прочностью до класса В60 и стальной арматуры, имеющей площадку текучести:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{R_s}{700}} \quad (20)$$

Используемая в расчетных условиях №1, 2 и 3, величина ξ_{Rf} – это граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона для железобетонного элемент, усиленного внешней композитной арматурой.

$$\xi_{Rf} = \frac{x_{Rf}}{h} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{f,ult} + \varepsilon_b^0}{\varepsilon_{b2}}}, \quad (21)$$

где $\varepsilon_{f,ult} = R_f/E_f$ – расчетное значение предельных относительных деформаций для композитных материалов.

Примечания: 1) Сжатая арматура во всех выражениях учитывается в случае, когда высота сжатой зоны бетона $x \geq 2a'$; 2) В формулах (10) – (11) выраже-



ния (h_0+a) и h_0 используются только при расчете в первом приближении. Во втором и, если потребуется, в третьем приближении в расчетных формулах вводится величина $h_{0,ред}$, определяемая по формуле (2), т.к. площадь композитной арматуры уже известна.

Литература

1. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2)
URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
2. Польской П.П., Георгиев С.В. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона, 2013, №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134
3. Польской П.П., Маилян Д.Р. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675
4. Маилян Д.Р., Польской П.П. О расчете ширины нормальных трещин балок, усиленных стекло и углепластиком. // Научное обозрение, 2014, №12, ч.2. С.490-492.
5. Польской П.П., Маилян Д.Р. Об уточнении расчетов прогибов балок, усиленных композитными материалами. // Научное обозрение, 2014, №12, ч.2. С.493-495.
6. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение, 2014, №10, ч.2. С.415-418.
7. В.А. Клевцов и др. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами // НИИЖБ, 2006. 48с.

8. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 // General rules and rules for buildings, 2004, p.229.
9. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures // ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008, p. 76.
10. Польской П.П., Проектирование и расчет железобетонных конструкций, усиленных наращиванием сечений. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2011. 164 с.

References

1. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4/2
URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307
2. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134
3. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4/2
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675
4. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P. Nauchnoe obozrenie, 2014, №12/2, pp.490-492.
5. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Nauchnoe obozrenie, 2014, №12/2, pp.493-495.
6. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10/2, pp.415-418.
7. V.A. Klevcov and others Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [Guide to strengthening reinforced concrete structures by composite materials]. NIIZhB, 2006, p.48
8. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 General rules and rules for buildings, 2004, p.229.
9. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI 440.2R-08. American Concrete Institute, 2008, p. 76.



10. Pol'skoj P.P. Proektirovaniye i raschet jelezobetonnyh konstrukciy, usilennyh naraschivaniyem secheniy [Design and construction of reinforced concrete structures of the enhanced build-up sections]. RSUCE, 2011, p. 164.