

УДК 624.012.45

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ ПРИКЛЕИВАНИЕМ ПЛАСТИН ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Е.Н. БАДАЛОВА

(Полоцкий государственный университет)

Исследование вопроса усиления изгибаемых конструкций приклеиванием дополнительной арматуры в виде пластин из углеродных волокон напрямую связано с расчетом для обеспечения безопасной работы конструкции в течение всего периода эксплуатации. Для изгибаемых конструкций, усиленных приклеиванием внешней дополнительной арматуры в растянутой зоне, расчет прочности, кроме расчета нормального сечения, включает также расчет прочности контактного шва между бетоном и дополнительной арматурой. В статье представлены некоторые из существующих подходов к данным видам расчетов. Рассмотрена деформационная модель для расчета нормального сечения с использованием уравнений напряженно-деформированного состояния и диаграмм деформирования материалов усиленной конструкции. Представлен расчет прочности контактного шва, а также длины анкеровки дополнительной арматуры по некоторым методикам. Проведен сравнительный анализ теоретического исследования прочности контактного шва, длины анкеровки и данных, полученных в результате проведенных экспериментов.

Введение. Расчет конструкций, усиленных увеличением поперечного сечения, следует производить с учетом наличия напряженно-деформированного состояния основного сечения конструкции до включения в работу элементов усиления [1]. Разработка рациональных рекомендаций по расчету усиленных конструкций предполагает учет характера их разрушения. Проведенные нами ранее экспериментальные исследования многослойных плит, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры в виде пластин из углеродных волокон (табл. 1), показали, что разрушение конструкций происходит в большинстве случаев в результате отслоения пластин усиления от поверхности бетона [2]. Поэтому существует необходимость ограничения работы усиленной конструкции предельными напряжениями сцепления по контакту бетон – дополнительная арматура.

Таблица 1

Геометрические размеры сечений и характеристики материалов опытных плит

Шифр опытных плит	Поперечное сечение, $b \times h$, мм	Бетон плит	Арматура плит			Арматура усиления			Вид разрушения плиты
			f_{pk} , МПа	f_{tk} , МПа	E_s , МПа	поперечное сечение, $b \times h$, мм	f_{tk} , МПа	E_s , МПа	
П-2	710 × 220	$f_{cm} = 35,4$ МПа	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50 × 1,4	1715	$2,8 \cdot 10^5$	По контактному шву
П-3	700 × 220	$f_{cm} = 37,3$ МПа	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50 × 1,2	2465	$1,91 \cdot 10^5$	По контактному шву
П-4	720 × 220	$f_{cm} = 36,1$ МПа	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50 × 1,2	2465	$1,6 \cdot 10^5$	По контактному шву
П-5	720 × 220	$f_{cm} = 36,6$ МПа	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50 × 1,2	2465	$1,91 \cdot 10^5$	По нормальному сечению
П-6	720 × 220	$f_{cm} = 36,6$ МПа	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	25 × 1,2	2465	$1,91 \cdot 10^5$	По нормальному сечению

Расчет прочности контактного шва. Расчет прочности контактного шва между бетоном основного сечения и дополнительной арматурой усиления производят из условия

$$T_S \leq T_R, \quad (1)$$

где T_S – сдвигающее усилие в контактном шве от внешней нагрузки; T_R – предельное сдвигающее усилие, воспринимаемое контактным швом.

Рассмотрим некоторые подходы к расчету прочности контактного шва, т.е. определению T_S и T_R .

Предельное сдвигающее усилие в контактном шве от внешней нагрузки в общем случае согласно [3] определяется из условия равновесия сил в наклонном сечении (рис. 1):

$$T_S = \frac{M_0 + V_0 \cdot l_{inc} - P_i y_i - 0,5q \cdot l_{inc}^2 - 0,5v_{sw} \cdot l_{inc}^2 - \sigma_s \cdot A_s \cdot z_s}{z_{s,ad}}, \quad (2)$$

где M_0 , V_0 – соответственно изгибающий момент и поперечная сила в сечении, проходящем через начало наклонного сечения в растянутой зоне; l_{inc} – длина проекции расчетного наклонного сечения;

P_i – сосредоточенные нагрузки в пределах наклонного сечения; y_i – расстояние от места расположения сосредоточенных нагрузок до конца наклонного сечения в сжатой зоне; q – равномерно распределенная нагрузка в пределах наклонного сечения; v_{sw} – интенсивность усилий в поперечной арматуре; $v_{sw} = \frac{f_{yw} \cdot A_{sw}}{s}$; σ_s, A_s – нормальное напряжение и площадь поперечного сечения арматуры основного сечения; $z_s, z_{s,ad}$ – расстояние между центрами тяжести сжатой зоны и соответственно основной и дополнительной арматурой.

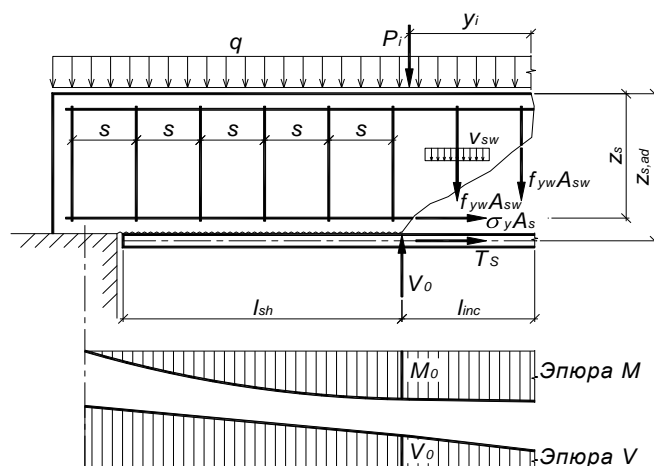


Рис. 1. Расчетная схема контактного шва

Предельное сдвигающее усилие, воспринимаемое контактным швом, ограничивается двумя факторами:

1) *сопротивлением бетона основного сечения срезу*. В этом случае разрушение шва произойдет по контакту бетон – клей, предельное значение сдвигающего усилия, воспринимаемого контактным швом, может быть определено по формуле [3]:

$$T_R = f_{c,sh} \cdot A_{sh}, \quad (3)$$

где $f_{c,sh}$ – сопротивление бетона срезу.

Авторы предлагают коэффициент перехода от сопротивления бетона растяжению к сопротивлению срезу назначать равным 1,58...1,8 [3, 4]:

$$f_{c,sh} = (1,58 \dots 1,8) f_{ct};$$

A_{sh} – площадь контактного шва (при усилении изгибаемой конструкции пластинами $A_{sh} = l_{sh} b_{ad}$).

Здесь l_{sh} – длина контактного шва, принимаемая равной расстоянию от конца пластины до начала ближайшей к опоре трещине в растянутой зоне; b_{ad} – ширина пластины усиления;

2) *сопротивлением срезу клевого состава*. В проведенных экспериментах случая разрушения шва по клею не наблюдалось. Ввиду того, что значение сопротивления растяжению клея, равное по данным фирм производителей [4] 19...50 МПа, превосходит сопротивление растяжению бетона для конструкций, изготовленных из обычного тяжелого бетона, такой вид разрушения (по клею) может произойти лишь при высокой температуре, когда прочность клевого состава снижается.

Расчет прочности контактного шва некоторыми авторами [4 – 6] предлагается осуществлять по эмпирическим зависимостям. Один из таких подходов предложен немецким исследователем Niedermeier [4, 5]. Максимальные растягивающие напряжения, которые могут быть восприняты контактным швом на конце пластин усиления на длине, меньшей максимального значения длины анкеровки, $l_1 < l_{bp}$, определяются, согласно Niedermeier, по формуле:

$$\sigma_{s,ad} = \frac{l_1}{l_{bp}} \left(2 - \frac{l_1}{l_{bp}} \right) \cdot \sigma_{s,ad,max}, \quad (4)$$

где $\sigma_{s,ad,max}$ – максимальное растягивающееся усилие, передающееся от пластин усиления к бетону конструкции посредством действия напряжений сцепления, определяемое по формуле:

$$\sigma_{s,ad,max} = c_1 \sqrt{\frac{E_{s,ad} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot f_{ctm}}{t_{s,ad}}}. \quad (5)$$

Здесь c_1 – коэффициент, равный 0,23; $E_{s,ad}$, $t_{s,ad}$ – соответственно модуль упругости композиционного материала и толщина пластины усиления; f_{cm} , f_{ctm} – прочность бетона на осевое сжатие и осевое растяжение соответственно.

Для материалов экспериментальных образцов (см. табл. 1) максимальное растягивающееся усилие по формуле (5) составляет $\sigma_{s,ad,max} = 266 \dots 323$ МПа.

Максимальное значение длины анкеровки определяется также с использованием эмпирического коэффициента по формуле:

$$l_{b,p} = c_2 \sqrt{\frac{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad}}{f_{ck,ad} \cdot f_{ctk}}}, \quad (6)$$

где c_2 – коэффициент, равный 1,44.

Экспериментально установлено [2], что длина анкеровки дополнительной арматуры в виде пластин типа Sika CarboDur S512, наклеенной на бетон экспериментальных образцов, составляет 200 мм. Определенная по формуле (6) длина анкеровки дополнительной арматуры – 233...250 мм.

В своих исследованиях для расчета длины анкеровки дополнительной арматуры мы использовали зависимость, предложенную в FIB Bulletin 14 [7, 8]:

$$l_{b,p} = c_2 \sqrt{\frac{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad}}{c_2 \cdot f_{ctm}}}, \quad (7)$$

где $c_2 = 2,0$ – эмпирический коэффициент; f_{ctm} – среднее значение сопротивления бетона осевому растяжению.

Рассчитанная по формуле (7) длина анкеровки пластины усиления Sika CarboDur S512 составляет 186...200 мм (табл. 2).

Таблица 2

Длина анкеровки пластины усиления Sika CarboDur S512

Длина анкеровки пластины усиления	$L_{bp,ad,i}$, мм	$L_{bp,ad,i} / L_{bp,ad_1}$
Плита П3		
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по экспериментальным данным	200	1,00
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по формуле (6) [4, 5]	250	1,47
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по формуле (7) [7, 8]	200	1,00
Плита П4		
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по экспериментальным данным	200	1,00
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по формуле (6) [4, 5]	233	1,17
Длина анкеровки $L_{bp,ad}$ по формуле (7) [7, 8]	186	0,93

В случае усиления концов пластин из углеродных волокон дополнительными анкерующими элементами или усиления изгибаемой конструкции путем вклеивания дополнительных пластин в пазы расчет прочности контактного шва можно не выполнять. Для конструкций, где было выполнено дополнительное усиление зоны анкеровки пластин путем наклеивания холста из углеродных волокон (плита П-5) или пластины вклеены в прорези (плита П-6), прочность контакта возросла в 1,26...1,46 раз. В таких случаях, как показали экспериментальные исследования, разрушение конструкции наступает при достижении арматурой основного сечения или дополнительной арматурой предельных деформаций. Для таких конструкций важным является расчет прочности по нормальному сечению.

Расчет усиленной конструкции по нормальному сечению. Расчет прочности изгибаемой конструкции, усиленной приклеиванием в растянутой зоне пластин из углеродных волокон, по нормальному сечению предлагается проводить на основе деформационной расчетной модели исходя из общего условия метода предельных состояний [9].

Деформационная модель основывается на некоторых гипотезах [10], применение которых для усиленной конструкции рассмотрено ниже.

Деформации бетона и арматуры в плоскости изгиба определяются с использованием гипотезы плоских сечений, в соответствии с которой поперечное сечение основной части (железобетонного элемента) и дополнительной арматуры разбивается на элементарные площадки. Особенностью применения гипотезы плоских сечений для конструкций, усиленных дополнительной арматурой, является наличие деформаций в основной части сечения до усиления, вызванных воздействием внешней нагрузки, в том числе нагрузкой от собственного веса конструкции, а также предварительным напряжением. При этом считается, что основной элемент и дополнительная арматура после усиления деформируются совместно, а разность их деформаций сохраняется постоянной на всех этапах работы усиленной конструкции [1].

Этот факт учитывается при составлении уравнений напряженно-деформированного состояния нормального сечения изгибаемого элемента, усиленного приклеиванием дополнительной арматуры (рис. 2):

$$\begin{cases} \int \sigma_c(y) \cdot (y_{0,ad} - y_c) \cdot A_c \cdot dy + \int \sigma_s(y) \cdot (y_{0,ad} - y_s) \cdot A_s \cdot dy + \\ + \int \sigma_{s,ad}(y) \cdot (y_{0,ad} - y_{s,ad}) \cdot A_{s,ad} \cdot dy - M_y = 0, \\ \varepsilon_{s,c}(y) = \frac{1}{r}(y_0 - y_{c,s}) + \frac{1}{r_{ad}}(y_{0,ad} - y_{c,s}), \quad \varepsilon_{a,d}(y) = \frac{1}{r_{ad}}(y_{0,ad} - y_{s,ad}), \end{cases} \quad (8)$$

где $\sigma_c(y)$, $\sigma_s(y)$, $\sigma_{s,ad}(y)$ – соответственно функция нормальных напряжений в элементарной площадке с координатой y бетона и арматуры основной части сечения и дополнительной арматуры усиления; $y_{0,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра изгиба сечения элемента после усиления; y_c , y_s , $y_{s,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести соответственно элементарной площадки бетона и арматуры основной части сечения и элементарной площадки дополнительной арматуры; A_c , A_s , $A_{s,ad}$ – площадь сечения соответственно элементарной площадки бетона, арматуры основного сечения и дополнительной арматуры усиления; M_y – изгибающий момент от внешней нагрузки после усиления; $\varepsilon_c(y)$, $\varepsilon_s(y)$, $\varepsilon_{s,ad}(y)$ – продольные относительные деформации соответственно элементарной площадки с координатой y бетона и арматуры основной части сечения и элементарной площадки дополнительной арматуры после усиления; $\frac{1}{r}$ – кривизна продольной оси основного сечения железобетонного элемента при усилении; $\frac{1}{r_{ad}}$ – кривизна продольной оси усиленного сечения железобетонного элемента.

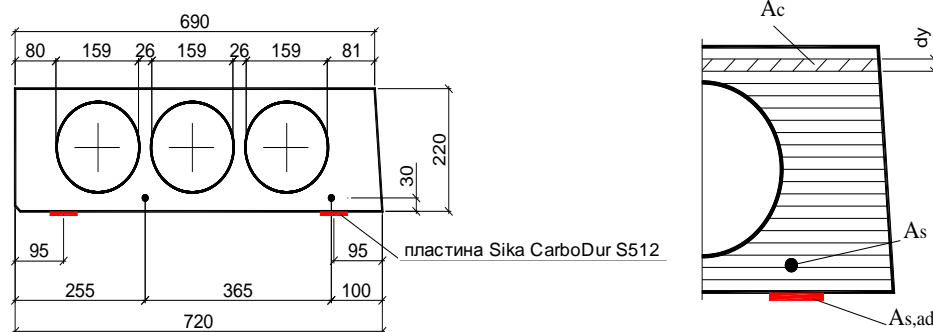


Рис. 2. Расчетная схема нормального сечения усиленной многопустотной плиты

Для случая неоднородного напряженного состояния при изгибе считаются известными зависимости «напряжение – деформация» для бетона и арматуры (основной и дополнительной), т.е. функции $\sigma_c(\varepsilon_c(y))$, $\sigma_s(\varepsilon_s(y))$, $\sigma_{s,ad}(\varepsilon_{s,ad}(y))$ являются определенными. Это допущение позволяет по известным значениям продольных относительных деформаций определять напряжения в бетоне и арматуре. Зависимости «напряжение – деформация» при неоднородном напряженном состоянии, которое имеется в сечении

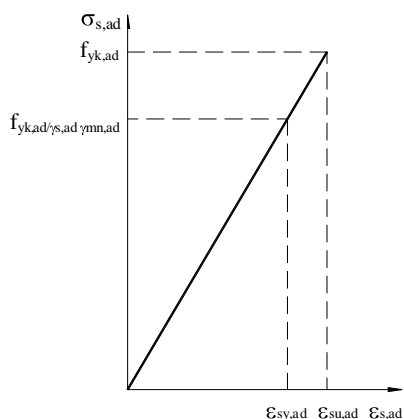


Рис. 3. Диаграмма деформирования дополнительной арматуры усиления Sika CarboDur S512

элемента вследствие изгиба, можно описать зависимостями «напряжение – деформация» материалов элемента, полученными в результате испытания бетона и арматуры на сжатие и растяжение (т.е. по однородному напряженному состоянию). Зависимости «напряжение – деформация» при неоднородном напряженном состоянии, которое имеется в сечении элемента вследствие изгиба, можно описать зависимостями «напряжение – деформация» материалов элемента, полученными в результате испытания бетона и арматуры на сжатие и растяжение (т.е. по однородному напряженному состоянию). В расчете нормального сечения железобетонной плиты, усиленной приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, использовали диаграмму деформирования бетона с ниспадающей ветвью. Арматуру основного сечения и дополнительную арматуру усиления испытывали на одноосное растяжение. Арматура из углеродных волокон не имеет площадки текучести, зависимость между напряжениями и продольными деформациями прямая вплоть до разрыва иллюстрирует рисунок 3.

Заключение. Расчет прочности контактного шва можно производить по представленным методикам, что дало результаты, сопоставимые с экспериментальными данными.

Расчет прочности железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры в виде пластин из углеродных волокон, по нормальному сечению предлагается выполнять по деформационной модели, которая позволяет получить картину напряженно-деформированного состояния на любой стадии работы конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк: Изд-во Полоц. гос. ун-та, 1998. – 240 с.
2. Бадалова, Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45 – 50.
3. Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84*. Усиление железобетонных конструкций / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 1998. – 189 с.
4. Шилин, А.А. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М.: ОАО «Изд-во «Стройиздат», 2004. – 144 с.
5. Niedermeier, R. Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen (Envelope line of tensile forces while using externally bonded reinforcement) / R. Niedermeier. – TU Munchen (In German), 2000.
6. Holzenkampfer, P. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
7. Ceroni, F. Bond performance in concrete elements strengthened with CFRP sheets / F. Ceroni, M. Pecce; FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
8. Fib Bulletin 14. FRP as Externally Bonded Reinforcement of R.C. Structures: Basis of design and safety concept, 2001. – TG9.3.
9. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
10. Беглов, А.Д. К вопросу о моделях евростандартов и СНиП по железобетону / А.Д. Беглов, Р.С. Санжаровский, В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2004. – № 3. – С. 30 – 31.

Поступила 11.06.2010

CALCULATION OF STRENGTH IN BENDABLE REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS FORTIFIED BY STICKING CARBON FIBRE PLATES

E. BADALOVA

The investigation of the issue of fortifying bendable constructions by means of sticking additional reinforcements represented by plates made of carbon fibres is directly connected with the calculation of their strength for ensuring safe work of such constructions during the whole period of their exploitation. For bendable constructions, fortified by means of sticking additional reinforcements in a stretched area, the calculation of strength apart from the calculation of the normal section includes calculations of strength in the contact seam between concrete and the additional reinforcements. The article describes some of the existing approaches to such types of calculations. There has been considered a deformational model for calculating the normal section with the use of equations for strained or deformed conditions and diagrams of reinforced construction material deformation. The article contains calculations of the strength in the contact seam as well as the length of anchoring in additional reinforcements according to some methods. There has been analysed the theoretical investigation into the strength of the contact seam and the length of anchoring as well as the data which have been obtained in the result of the experiments conducted.