

УДК 624.044.2

*СЛЕПЕЦ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,
vity_slepec@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, УСИЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований по теме определения прогиба в железобетонных элементах, усиленных полимерными композитными материалами на основе углеродного волокна. Предложена методика расчёта прогиба железобетонных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами. Результаты расчёта подвергнуты сравнению с экспериментальными данными, полученными в Сибирском государственном университете путей сообщения.

Ключевые слова: железобетонные пролетные строения; усиление железобетонных пролетных строений мостов; полимерные композиционные материалы; углеродное волокно; жёсткость железобетонного элемента; прогиб; кривизна; деформации.

*VIKTOR A. SLEPETS, Research Assistant,
vity_slepec@mail.ru
Siberian State Transport University,
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

DEFLECTIONS IN CARBON FIBER-REINFORCED CONCRETE BEAMS

The paper presents the theoretical and experimental results on the determination of deflections in concrete elements reinforced with carbon fiber. The calculation methodology is suggested for the analysis of deflection of reinforced concrete elements based on carbon polymer composites. The calculation results are compared with the experimental data obtained in the laboratory of the Siberian State Transport University.

Keywords: reinforced concrete bridge spans; bridge span reinforcement; polymer composite materials; carbon fiber; reinforced concrete beam rigidity; deflection; flexure; deformation.

Применение систем внешнего армирования композиционными материалами на основе углеродного волокна на данный момент является наиболее распространённой технологией увеличения несущей способности железобетонных конструкций. Преимущество применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) перед другими материалами, в первую очередь перед сталью, обусловлено сопоставимыми прочностными и деформационными характеристиками при меньшем, порядка в 4 раза, удельном весе. При этом

ПКМ легкотранспортабельны, не требуют использования сложных механизмов монтажа и позволяют проводить усиление железобетонных конструкций практически любых форм [1].

Несмотря на значительный прирост несущей способности, результаты обширных исследований, выполненных различными научными коллективами, показали, что небольшая площадь поперечного сечения ПКМ по сравнению с площадью поперечного сечения усиливаемой конструкции не позволяет значительно уменьшить прогиб при воздействии расчётных нагрузок. Но расчёт прогиба железобетонного усиленного элемента без учёта включения в работу ПКМ по сути является неверным.

Действующими нормативными документами [2], а также [3, 4] при определении прогибов усиленных ПКМ элементов рекомендовано руководствоваться требованиями [5] и выполнять расчёты упрощённым способом, где ПКМ учитывается только за счёт коэффициента приведения внешнего армирования к бетону α_f . Данное допущение приемлемо только при определении жёсткости до момента образования трещин, когда элемент работает в упругой стадии, а закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения близок к линейному. Определение жёсткости железобетонного сечения, усиленного ПКМ, с трещиной в растянутой зоне является сложной задачей, требующей учёта множества факторов и не ограничивающейся только учётом коэффициента приведения α_f . Рассмотрим задачу по определению кривизны оси при изгибе железобетонного элемента, усиленного ПКМ, с трещинами в растянутой зоне более подробно.

Из расчётной схемы, представленной на рис. 1, видно, что кривизну оси усиленного ПКМ железобетонного элемента в зоне чистого изгиба при наличии трещин можно выразить как

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{sm}}{(h_0 - x_m)} = \frac{\varepsilon_{bm}}{x_m} = \frac{\varepsilon_{fm}}{(h_f - x_m)}, \quad (1)$$

где ε_{sm} – средние деформации растянутой арматуры; ε_{bm} – средние деформации бетона сжатой зоны; ε_{fm} – средние деформации ПКМ; x_m – средняя высота сжатой зоны, которую можно определить из выражения

$$x_m = \frac{\varepsilon_{bm}}{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{bm}} h_0 = \frac{\varepsilon_{bm}}{\varepsilon_{fm} + \varepsilon_{bm}} h_f. \quad (2)$$

Подставив значение средней высоты сжатой зоны в (1), получим

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{bm}}{h_0} = \frac{\varepsilon_{fm} + \varepsilon_{bm}}{h_f}. \quad (3)$$

Можно отметить, что первая часть выражения (3) – это аналитическое выражение задачи по определению кривизны оси изгибаемого железобетонного элемента, т. е. основные положения метода А.А. Гвоздева для определения кривизны железобетонных элементов также верны и для определения кривизны железобетонного элемента, усиленного ПКМ. Учитывая, что опре-

деление среднего значения деформации ПКМ ε_{fm} (вторая часть выражения (3)) – задача сложная, требующая изучения коэффициента ψ_f , учитывающего неравномерность деформаций и напряжений ПКМ на участке между трещинами, далее подробно рассмотрим первую часть выражения.

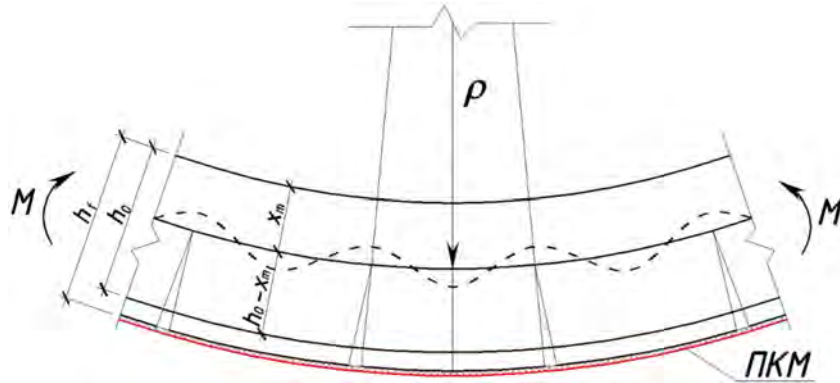


Рис. 1. Схема к определению кривизны оси усиленного ПКМ элемента

Средние деформации растянутой арматуры и средние деформации бетона сжатой зоны определяют по формулам, приведённым в работе [6]:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\Psi_s \sigma_s}{E_s}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{bm} = \frac{\Psi_b \sigma_b}{\nu E_b}. \quad (5)$$

Подставляя значения формул (4) и (5) в первую часть выражения (3), получим, что значения кривизны железобетонного элемента, усиленного ПКМ, с трещинами в растянутой зоне можно определить по формуле (160) [7] как для обычного железобетонного элемента

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{h_0 z} \left[\frac{\Psi_s}{E_s A_s} + \frac{\Psi_b}{(\varphi_f + \xi) \nu E_b b h_0} \right]. \quad (6)$$

Следовательно, жёсткость усиленного ПКМ железобетонного элемента можно определить по формуле

$$B = h_0 z / \left[\frac{\Psi_s}{E_s A_s} + \frac{\Psi_b}{(\varphi_f + \xi) \nu E_b b h_0} \right]. \quad (7)$$

Однако следует обратить внимание, что при определении Ψ_s , ξ , φ_f и z их значения следует вычислять с учётом работы ПКМ. Коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участке между трещинами Ψ_s , необходимо определять согласно требованиям п. 4.29 [7], при этом момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна с учётом неупругих

деформаций растянутого бетона W_{pl} в расчётах следует определять с учётом ПКМ. Значения коэффициентов ψ_s , ψ_b и ν определяют как для обычного железобетонного элемента, следуя рекомендациям [7].

Определение относительной высоты сжатой зоны ξ и коэффициента φ_f в сечениях с трещиной для элементов, усиленных ПКМ

При анализе изгибаемого элемента таврового сечения с полкой в сжатой зоне (рис. 2) после образования первых трещин необходимо исходить из следующих предположений:

- 1) бетон в растянутой зоне в сечении трещины выключается из работы;
- 2) участки бетона растянутой зоны, расположенные непосредственно над трещиной, в расчёте не учитываются;
- 3) зависимость между высотой сжатой зоны в сечении с трещиной x и средней высотой сжатой зоны x_m выражается по эмпирической формуле

$$\varphi = \frac{x}{x_m} = 1 - \frac{0,7}{(100\mu + 1)}. \quad (8)$$

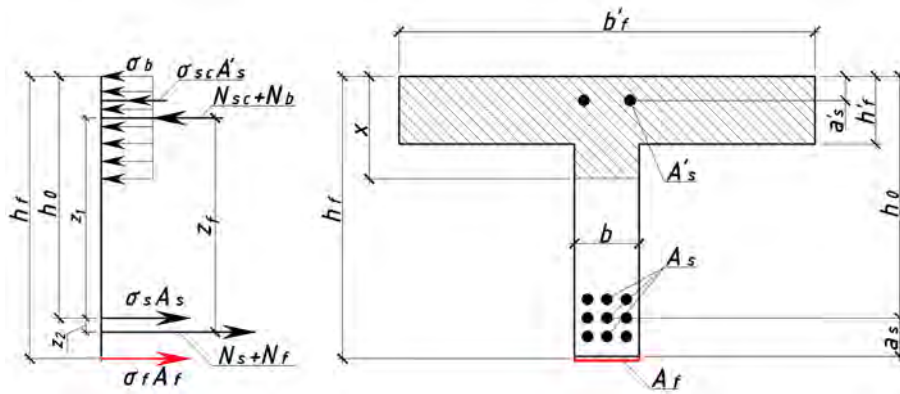


Рис. 2. Расчётная схема

Уравнение равновесия внутренних сил в сечении с трещиной можно записать следующим образом:

$$\sigma_s A_s + \sigma_f A_f - \sigma_b A_b \omega - \sigma'_s A'_s = 0, \quad (9)$$

где ω – коэффициент полноты эпюры напряжения бетона сжатой зоны.

Площадь бетона сжатой зоны определяют по формуле

$$A_b = bx + (b'_f + b)h'_f. \quad (10)$$

Выразим напряжения в бетоне сжатой зоны, сжатой арматуре и ПКМ через напряжения в растянутой арматуре. При этом деформации бетона сжатой зоны можно выразить как

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_{bm}}{\Psi_b} = \frac{x_m}{(h_0 - x_m)} \frac{\varepsilon_{sm}}{\Psi_b} = \frac{x}{(\varphi h_0 - x)} \frac{\Psi_s \varepsilon_s}{\Psi_b}. \quad (11)$$

Следовательно, фибровые напряжения в бетоне сжатой зоны равны

$$\sigma_b = E_b' \cdot \varepsilon_b = \nu E_b \cdot \varepsilon_b = \frac{x}{(\varphi h_0 - x)} \frac{\nu \Psi_s}{\alpha \Psi_b} \sigma_s. \quad (12)$$

Напряжение в сжатой арматуре

$$\sigma_s' = E_s' \cdot \varepsilon_s' = E_s' \frac{\varepsilon_b (x_m - a_s)}{x_m} = \frac{(x - a_s' \varphi) \Psi_s}{(\varphi h_0 - x) \Psi_b} \sigma_s. \quad (13)$$

Напряжение ПКМ

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = E_f \frac{\varepsilon_b (h_f - x_m)}{x_m} = \frac{(\varphi h_f - x) \Psi_s E_f}{(\varphi h_0 - x) \Psi_b E_s} \sigma_s. \quad (14)$$

Подставляя выражения (12) – (14) в уравнение (9), получим

$$\sigma_s A_s + \frac{(\varphi h_f - x) \Psi_s E_f}{(\varphi h_0 - x) \Psi_b E_s} \sigma_s A_f - \frac{x}{(\varphi h_0 - x)} \frac{\omega \nu \Psi_s}{\alpha \Psi_b} \sigma_s A_b - \frac{(x - a_s' \varphi) \Psi_s}{(\varphi h_0 - x) \Psi_b} \sigma_s A_s' = 0. \quad (15)$$

После умножения уравнения (15) на $\frac{(\varphi h_0 - x)}{\sigma_s b h_0}$ получим

$$(\varphi h_0 - x) \mu + (\varphi h_f - x) \frac{\Psi_s E_f}{\Psi_b E_s} \mu_f - \frac{\omega \nu \Psi_s}{\alpha \Psi_b} \frac{A_b}{b h_0} x - (x - a_s' \varphi) \frac{\Psi_s}{\Psi_b} \mu' = 0, \quad (16)$$

где $\mu = \frac{A_s}{b h_0}$; $\mu_f = \frac{A_f}{b h_0}$; $\mu' = \frac{A_s'}{b h_0}$.

После умножения уравнения (16) на $-\frac{\alpha \Psi_b}{\omega \nu \Psi_s}$ и подстановки значения A_b получим

$$x^2 + \frac{\mu \alpha \Psi_b}{\omega \nu \Psi_s} x h_0 + \frac{(b_f' - b) h_f'}{b h_0} x h_0 + \frac{\mu' \alpha}{\omega \nu} x h_0 + \frac{\mu_f \alpha}{\omega \nu} \frac{E_f}{E_s} x h_0 - \frac{\mu \alpha \Psi_b}{\omega \nu \Psi_s} \varphi h_0^2 - \frac{\mu' \alpha \cdot a_s'}{\omega \nu} \varphi h_0 - \frac{\mu_f \alpha}{\omega \nu} \frac{E_f}{E_s} h_f \varphi h_0 = 0. \quad (17)$$

После преобразования (17) формула приводится к квадратному уравнению относительной высоты сжатой зоны

$$x^2 + (\beta + \varphi_f') h_0 x - (1 + \kappa) \beta \varphi h_0^2 = 0, \quad (18)$$

где

$$\beta = \frac{\mu \alpha \Psi_b}{\omega \nu \Psi_s}; \quad (19)$$

$$\varphi_f^f = \frac{h_f'(b_f' - b) + \frac{\alpha(A_s' + A_f E_f / E_s)}{\omega \nu}}{bh_0}; \quad (20)$$

$$\kappa = \frac{\left(\mu a_s' - \mu_f h_f \frac{E_f}{E_s} \right) \frac{\psi_s}{\psi_b}}{\mu h_0}. \quad (21)$$

Разделив уравнение (18) на h_0^2 и отбросив значение κ (21) как малое по сравнению с единицей, получим

$$\xi^2 + (\beta + \varphi_f^f) \xi - \beta \varphi = 0. \quad (22)$$

Уравнение (22) аналогично квадратному уравнению относительной сжатой зоны для обычного, не усиленного ПКМ железобетонного сечения за исключением коэффициента φ_f^f следует определять по формуле (20).

Плечо внутренней пары сил z_f в сечениях с трещиной для элементов, усиленных ПКМ

Для железобетонного элемента, усиленного ПКМ, плечо внутренней пары сил с прямоугольной эпюрой напряжения в сжатой зоне бетона равняется расстоянию между равнодействующей усилий растянутой арматуры и композиционным материалом усиления и равнодействующей усилий в бетоне и арматуре сжатой зоны (см. рис. 2) и может быть определено по формуле

$$z_f = z_1 + z_2, \quad (23)$$

где z_1 – расстояние от равнодействующей усилий в бетоне и арматуре сжатой зоны до центра тяжести растянутой арматуры; z_2 – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до равнодействующей усилий растянутой арматуры и композиционного материала усиления.

Определим z_1 для усиленного ПКМ железобетонного элемента из отношения статического момента площади приведённого сечения сжатой зоны (сжатый бетон и арматура) и растянутой зоны (растянутый ПКМ) относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры к указанной приведённой площади:

$$z_1 = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \frac{h_f'(b_f' - b)(h_0 - 0,5h_f') + xb(h_0 - 0,5x) + n_s' A_s'(h_0 - a_s') + n_f A_f (h_f - h_0)}{h_f'(b_f' - b) + xb + n_s' A_s' + n_f A_f}. \quad (24)$$

Примем, что $n_s' A_s' = \frac{\alpha A_s'}{\omega \nu}$; $n_f A_f = \frac{\alpha A_f (E_s / E_f)}{\omega \nu}$; $a_s' = \frac{h_f'}{2}$; $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$; $x = \xi h_0$,

и после подстановки в формулу (24) получим

$$z_1 = \frac{h'_f(b'_f - b)(h_0 - 0,5h'_f) + xb(h_0 - 0,5\xi h_0) + \frac{\alpha A'_s}{\omega v}(h_0 - 0,5h'_f) + \frac{\alpha A_f(E_s / E_f)}{\omega v}(h_f - h_0)}{h'_f(b'_f - b) + xb + \frac{\alpha A'_s}{\omega v} + \frac{\alpha A_f(E_s / E_f)}{\omega v}}. \quad (25)$$

После преобразования получим

$$z_1 = \frac{(h_0 - 0,5h'_f)\varphi_f^{\text{эф}}bh_0 + xbh_0 - 0,5bh_0x\xi}{\varphi_f^f bh_0 + xb}, \quad (26)$$

где φ_f^f – коэффициент, определяемый по формуле (20);

$$\varphi_f^{\text{эф}} = \frac{h'_f(b'_f - b) + \frac{\alpha \left(A'_s + A_f(E_f / E_s) \frac{(h_f - h_0)}{(h_0 - 0,5h'_f)} \right)}{\omega v}}{bh_0}. \quad (27)$$

Разделив числитель и знаменатель выражения (26) на bh_0 и преобразовав его, получим

$$z_1 = \frac{\varphi_f^{\text{эф}}(h_0 - 0,5h'_f) + \xi h_0(1 - 0,5\xi)}{\varphi_f^f + \xi}. \quad (28)$$

Вычислим z_2 из следующего выражения:

$$z_2 = \frac{A_s h_0 + A_f(E_f / E_s)h_f}{A_s + A_f(E_f / E_s)} - h_0. \quad (29)$$

Следовательно (23), используя выражения (28) и (29), плечо внутренней пары сил в сечениях с трещиной для элементов, усиленных ПКМ, можно вычислить по формуле

$$z_f = \frac{\varphi_f^{\text{эф}}(h_0 - 0,5h'_f) + \xi h_0(1 - 0,5\xi)}{\varphi_f^f + \xi} + \frac{A_s h_0 + A_f(E_f / E_s)h_f}{A_s + A_f(E_f / E_s)} - h_0. \quad (30)$$

В научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщений (СГУПС) в рамках разработки предложений в раздел «Композиционные материалы» СП 35.13330.2011 Свод правил «Мосты и трубы», по заказу Росавтодора, были выполнены испытания восьми групп железобетонных образцов, являющихся моделями главных балок автодорожного пролетного строения типового проекта серии 3.503-14, инв. № 710/5 [8]. Согласно программе испытаний образцы были разделены на группы: А0 – образцы контрольной серии, не усиленные ПКМ, А1–А7 – образцы основной серии, усиленные ПКМ. Для усиления применяли холст FibARM Таре 530/300 и пластины FibARM Lamel 14/100, система внешнего армирования производства ЗАО «ХК «Композит»» [9, 10]. Схемы усиления образцов приведены на рис. 3.

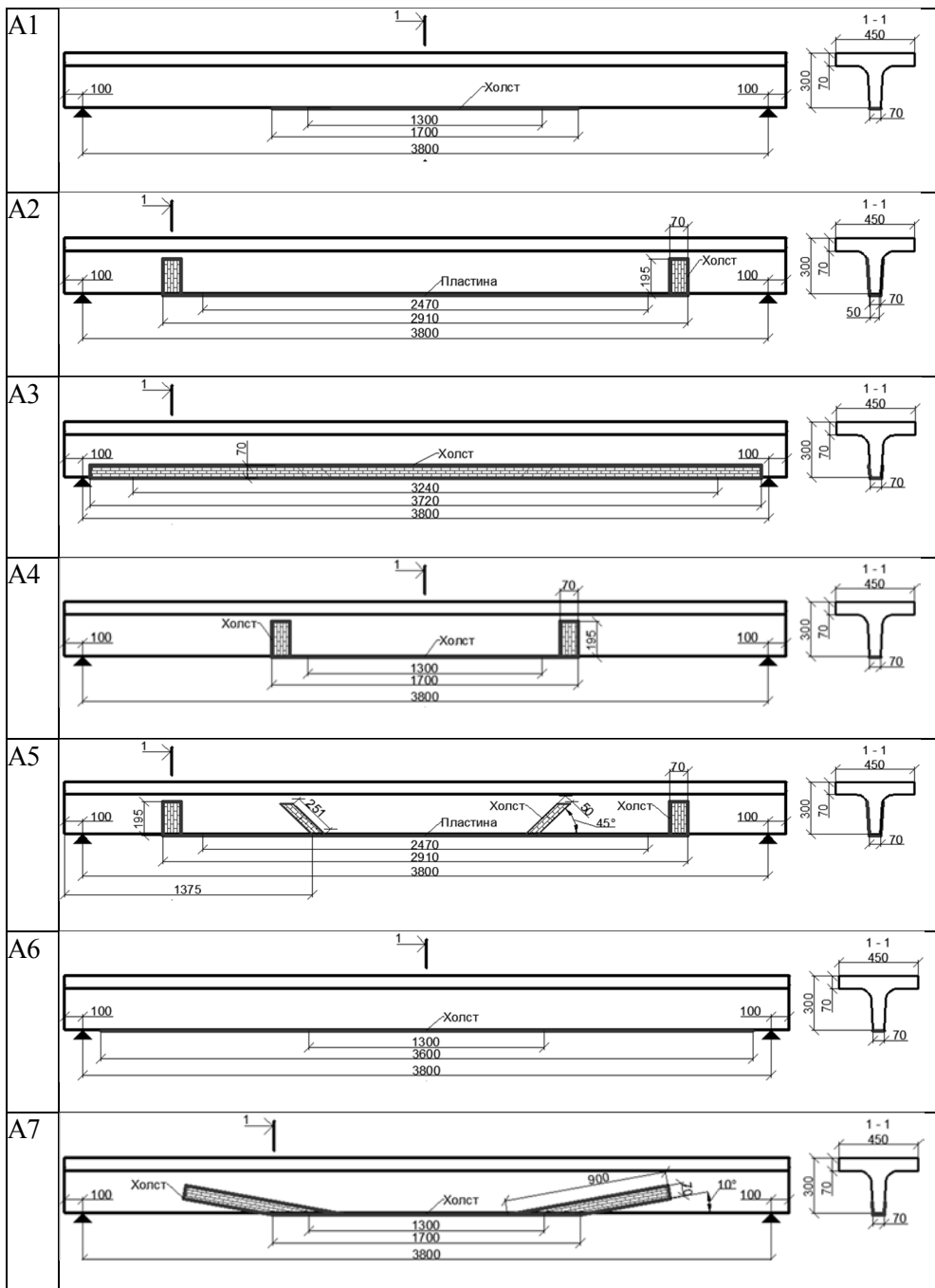


Рис. 3. Схемы усиления балочных образцов

По результатам проведённых испытаний было установлено:

1) в упругой стадии работы значение прогиба меньше на 1–8 % по сравнению с образцами контрольной серии при любой схеме усиления;

2) в неупругой стадии работы при равной нагрузке значение прогиба у образцов основной серии А1–А7 (усиленных ПКМ) меньше на 24–47 % по сравнению с образцами контрольной, не усиленной серии А0;

3) значение прогиба меньше в образцах, где площадь поперечного сечения композиционного материала больше (А2 и А5), а также в образцах, имеющих дополнительное закрепление ПКМ;

4) усиление ПКМ на основе углеродного волокна позволяет повысить трещиностойкость железобетонных элементов;

5) при любой схеме усиления с применением ПКМ первые трещины шириной раскрытия 0,05 и 0,2 мм зафиксированы при большем значении нагрузки по сравнению с контрольной серией;

6) при одном уровне нагружения относительные деформации растянутой грани балки и рабочей растянутой арматуры меньше у образцов, усиленных ПКМ.

На основании результатов, полученных в ходе испытаний, можно сделать заключение, что жёсткость усиленного ПКМ железобетонного сечения с трещиной больше по сравнению с неусиленной на любом этапе нагружения.

Определим расчётное значение прогиба балочных образцов контрольной серии А0 и основной серии А1–А7 и сравним их с результатами экспериментальных данных, полученных при проведении испытаний в НИЛ «Мосты» СГУПС. Прогиб образцов контрольной серии А0 в середине пролёта от воздействия испытательной нагрузки будет определен согласно рекомендациям [6, 7]. Прогиб образцов основной, усиленной ПКМ серии А1–А7 будет определен согласно изложенной выше методике, где значения ξ , Φ_f , z_f и Ψ_s определены с учётом работы ПКМ. Результаты расчёта приведены в таблице.

Расчётные данные по определению прогиба образцов серии А0–А7

Серия	Φ_f , (20)	Ψ_s ,	ξ , м	z , м (30)	$\frac{1}{\rho}$, м ⁻³ (6)	Прогиб		
						f_p , мм	$f_{\text{экс}}$, мм	K
А0	1,695	1,00	0,203	0,206	$3,67 \cdot 10^{-3}$	5,06	4,90	0,97
А1	1,705	0,997	0,203	0,208	$3,65 \cdot 10^{-3}$	5,03	4,83	0,96
А2	1,720	0,992	0,202	0,209	$3,61 \cdot 10^{-3}$	4,97	4,78	0,96
А3	1,724	0,992	0,202	0,207	$3,63 \cdot 10^{-3}$	5,00	4,88	0,98
А4	1,705	0,997	0,203	0,208	$3,65 \cdot 10^{-3}$	5,03	4,88	0,97
А5	1,720	0,992	0,202	0,209	$3,61 \cdot 10^{-3}$	4,97	4,80	0,97
А6	1,705	0,997	0,203	0,208	$3,65 \cdot 10^{-3}$	5,03	4,85	0,96
А7	1,705	0,997	0,203	0,208	$3,65 \cdot 10^{-3}$	5,03	4,50	0,89

Результаты расчёта, приведённые в таблице, для момента времени, при котором значение испытательной нагрузки на образцы А0–А7 составляет 45 кН (момент развития нормальных трещин в растянутой зоне испытуемых балочных образцов), показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Для образцов контрольной серии А0 значение конструктивного ко-

эфициента составило 0,97. Значение конструктивного коэффициента, характеризующего отклонение расчётного значения прогиба по предложенной методике от экспериментального, для образцов основной серии А1–А7, усиленных ПКМ, находится в диапазоне от 0,89 до 0,98. При любой схеме усиления расчётное значение прогиба образцов, усиленных ПКМ, оказалось меньше расчётного значения прогиба образцов серии А0.

Усиление железобетонных эксплуатируемых конструкций системами внешнего армирования на основе ПКМ не позволяет значительно уменьшить значение прогиба, это объясняется незначительной площадью поперечного сечения ПКМ по сравнению с площадью поперечного сечения самой конструкции, а следовательно, незначительным вкладом ПКМ в повышение общей жёсткости (1–2 % в пределах точности практических инженерных расчётов). Но при проведении испытаний экспериментальных образцов в лабораторных условиях, где вклад ПКМ в общую жёсткость превышает 3–5 %, значение расчётного прогиба следует определять с учётом вышеизложенных рекомендаций, где значения ξ , φ_f , z и ψ_s определены с учётом работы ПКМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин, А.А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М. : Стройиздат, 2007. – 184 с.
2. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. – М. : Минстрой России, 2015. – 50 с.
3. СТО 13623997-001–2011. Стандарт организации ООО «Зика». Усиление железобетонных конструкций композитными материалами фирмы Sika / ООО «Зика». – М., 2011. – 63 с.
4. СТО 2256-002–2011. Комплексная система FibARM по ремонту и усилению строительных конструкций путем внешнего армирования композитными материалами холодного отверждения. – М. : ЗАО «ПРЕПРЕГ – СКМ», 2011. – 13 с.
5. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01–2003. – М. : Минстрой России, 2013. – 175 с.
6. Колмогоров, А.Г. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам / А.Г. Колмогоров, В.С. Плевков. – Томск : Печатная мануфактура, 2009. – 496 с.
7. СНиП 2.03.01–84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1984. – 75 с.
8. Серия 3.503-14. Сборные железобетонные пролетные строения для автодорожных мостов. Вып. 5. Пролетные строения без диафрагм длиной 12, 15 и 18 м, армированные арматурой классов А-II и А-III, инв. № 710/5. – М. : Союздорпроект, 1974. – 50 с.
9. Бокарев, С.А. Вопросы подобия усиленных железобетонных балок при экспериментах на уменьшенных масштабных моделях / С.А. Бокарев, С.В. Ефимов // Наукоедение. – 2014. – № 5. – С. 1–9.
10. Бокарев, С.А. Трещинообразование в железобетонных элементах мостов, усиленных полимерными композиционными материалами / С.А. Бокарев, В.А. Слепец // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3. – С. 18–27.

REFERENCES

1. Shilin A.A., Pshenichnyi V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnykh konstruktssii kompozitnymi materialami [Composite reinforcement of concrete structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 2007. 184 p. (rus)
2. SNiP 164.1325800.2014 'Reinforcement of concrete structures with composites'. Moscow: The Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, 2015. 50 p. (rus)

3. *Corporate Standard 13623997-001–2011* ‘Reinforcement of concrete structures with Zika composites’. Moscow, 2011. 63 p. (rus)
4. *Corporate Standard 2256-002–2011* ‘FibARM system for repair and external reinforcement of buildings using cold-setting polymer composites’. Moscow: Composite Holding Company, 2011. 13 p. (rus)
5. *SNiP 63.13330.2012* ‘Concrete and reinforced concrete structures’. Moscow: The Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, 2013. 175 p. (rus)
6. *Kolmogorov A.G., Plevkov V.S.* Raschet zhelezobetonnykh konstruksii po rossiiskim i zarubezhnym normam [Calculation of reinforced concrete structures using Russian and international standards]. Tomsk, 2009. 495 p. (rus)
7. *SNiP 2.03.01–84* ‘Concrete and reinforced concrete structures’. Moscow: The Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Soviet Union, 1984. 75 p. (rus)
8. *Series 3.503-14* Sbornye zhelezobetonnye proletnye stroeniya dlya avtodorozhnykh mostov [Composite bridge spans]. Moscow: Soyuzdorproekt Publ., 1974. 50 p. (rus)
9. *Bokarev S.A., Efimov S.V.* Voprosy podobiya usilennykh zhelezobetonnykh balok pri eksperimentakh na umen'shennykh masshtabnykh modelyakh [Problems of similarity of reinforced concrete beams using experimental models]. *Naukovedenie*. 2014. No. 5. Pp. 1–9. (rus)
10. *Bokarev S.A., Slepets V.A.* Treshchinoobrazovanie v zhelezobetonnykh elementakh mostov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Cracking in concrete bridge elements reinforced with polymer composite materials]. *Vestnik STU*. 2015. No. 3. Pp. 18–27. (rus)