

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.45

С.А. Бокарев, В.А. Слепец

**Трещинообразование в железобетонных элементах мостов, усиленных полимерными композиционными материалами**

В статье приведены результаты лабораторного эксперимента по исследованию процесса трещинообразования в железобетонных пролетных строениях, усиленных полимерными композиционными материалами на основе углеродного волокна. Были испытаны модели главных балок автодорожного пролетного строения типового проекта серии 3.503-14, инв. № 710/5, всего 16 образцов. Материал образцов – бетон класса В30, в качестве рабочей арматуры использованы стержни класса А400 диаметром 18 и 20 мм, в качестве конструктивной – стержни класса А240 диаметром 6 мм. Усиление выполнено пластинами и холстами, системы внешнего армирования производства ЗАО «ХК «Композит»» (холст FibARM Tape 530/300; пластина FibARM Lamel 14/100), применены различные схемы закрепления. При проведении эксперимента в зоне чистого изгиба контролировали момент появления первой трещины, расстояние между трещинами, величину раскрытия трещин. По результату проведенного эксперимента установлено, что усиление полимерными композиционными материалами на основе углеродного волокна очень эффективно для обеспечения трещиностойкости железобетонных конструкций. Выявлены закономерности процесса трещинообразования в работе усиленных железобетонных изгибаемых балок. Выдвинуты теоретические предположения по процессу трещинообразования в усиленных полимерными композиционными материалами железобетонных элементах. С использованием методики О.Я. Берга, положенной в основу расчета по раскрытию трещин действующих норм проектирования (СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы») для обычных, не усиленных железобетонных элементов, а также результатов эксперимента решена задача по определению радиуса армирования и расстояния между трещинами усиленных полимерными композиционными материалами железобетонных элементов. Предложена методика расчета ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами для таких конструкций.

**Ключевые слова:** *железобетонные пролетные строения, усиление железобетонных пролетных строений мостов, полимерные композиционные материалы, углеродное волокно, трещина, ширина раскрытия трещины, расстояние между трещинами.*

Применение систем внешнего армирования на основе полимерных композиционных материалов (ПКМ) из углеродного волокна является современной и перспективной технологией при усилении железобетонных элементов. Данный метод позволяет значительно сократить стоимость работ, а также время их проведения [1]. Композиционные материалы на основе углеродного волокна обладают высокими прочностными и деформационными характеристиками. Сопротивление осевому растяжению ПКМ в 8–10 раз выше, чем у арматурной стали, а значение модуля упругости близко к значению модуля упругости стали или превышает его [2].

Наличие трещин, превышающих допустимое значение, способствует развитию коррозионных процессов в рабочей арматуре, при этом нарушается совместная работа арматуры и бетона, что приводит к преждевременному снижению несущей способности конструкции. Таким образом, трещиностойкость в

значительной степени определяет долговечность конструкции, помимо этого с образованием трещин тесно связаны вопросы расчета жесткости железобетонных элементов [3].

В рамках научно-исследовательской работы, проведенной по заказу Росавтодора, в НИЛ «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения были проведены испытания восьми групп железобетонных образцов, являющихся моделями главных балок автодорожного пролетного строения типового проекта серии 3.503-14, инв. № 710/5 [4]. Проектирование образцов осуществляли с использованием основных принципов подобия и равенства относительных деформаций бетона нижних граней ребер балок [5]. Схема армирования железобетонных образцов приведена на рис. 1.

В соответствии с программой испытаний образцы были разделены на несколько групп: А0 – контрольная серия (образцы, не усиленные ПКМ), А1–А5 и Б1–Б2 – основная серия

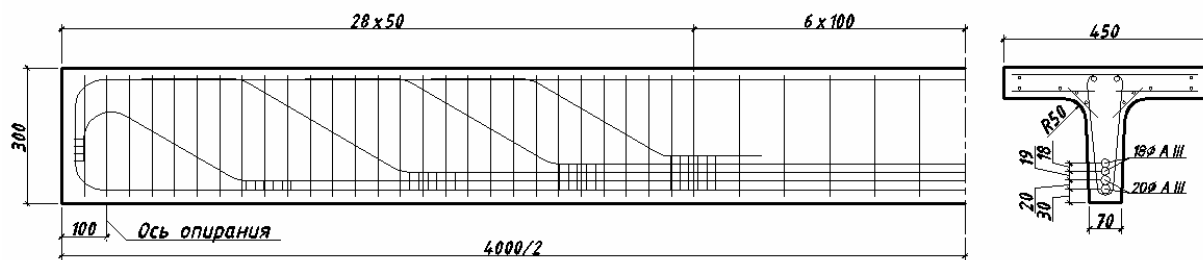


Рис. 1. Схема армирования железобетонных образцов

(образцы, усиленные ПКМ). Для усиления применяли холст FibARM Tape 530/300 и пластины FibARM Lamel 14/100, система внешнего армирования производства ЗАО «ХК «Композит»». Схемы усиления образцов приведены на рис. 2. Перед проведением испытаний была определена фактическая прочность бетона образцов на сжатие, а также прочность на растяжение и модуль упругости арматуры и материалов усиления.

Испытания проводили на силовом стенде НИЛ «Мосты», для нагружения использовали гидравлический домкрат ДГ 50П250 с ручным насосом. Передачу нагрузки на образец осуществляли через распределительную траверсу со средней скоростью нагружения 50 Н/мин. Значения нагрузки фиксировали с помощью мессдозы. Расположение балки на испытательном стенде приведено на рис. 3.

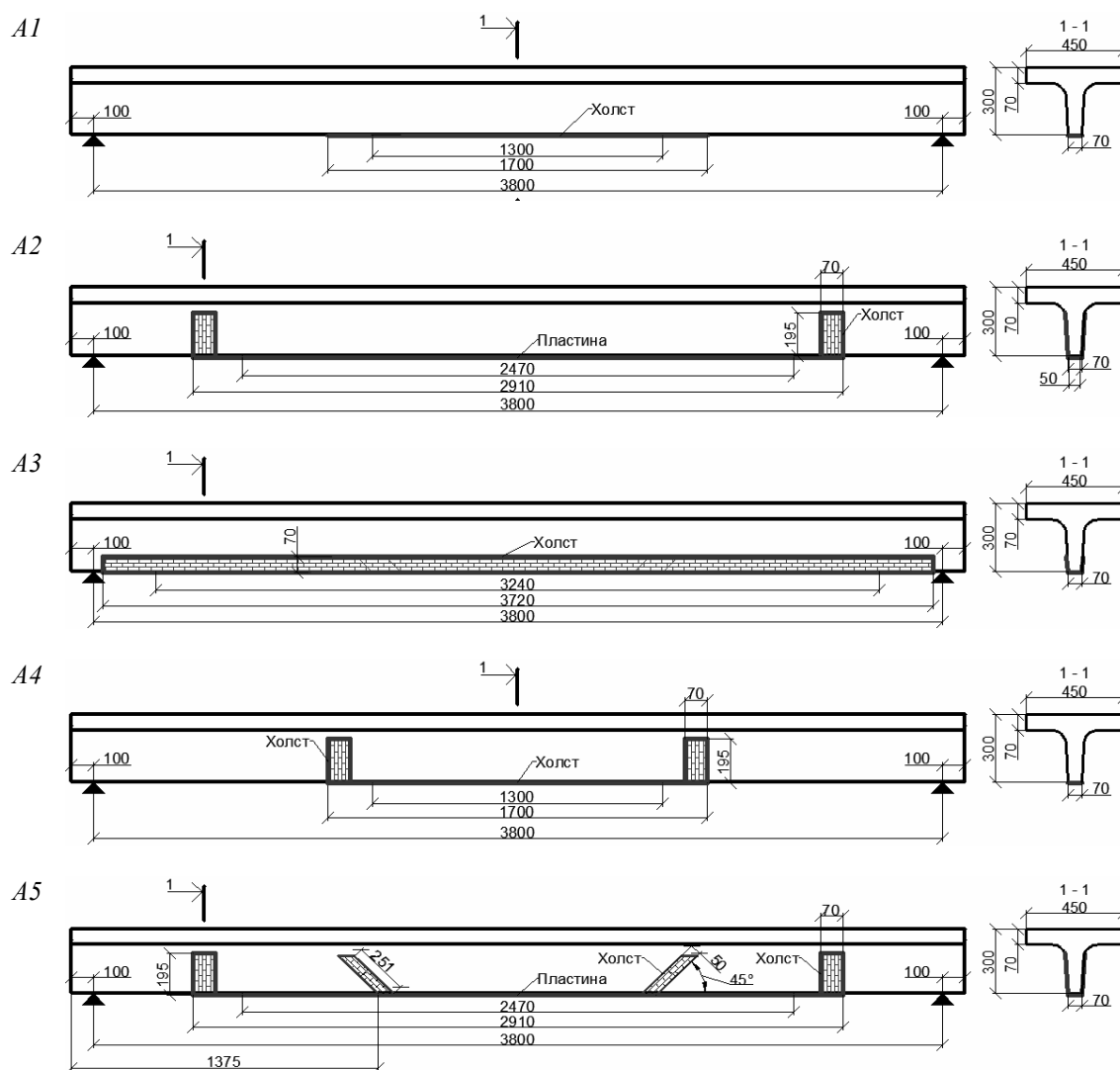


Рис. 2. Схемы усиленных образцов основной серии (начало)

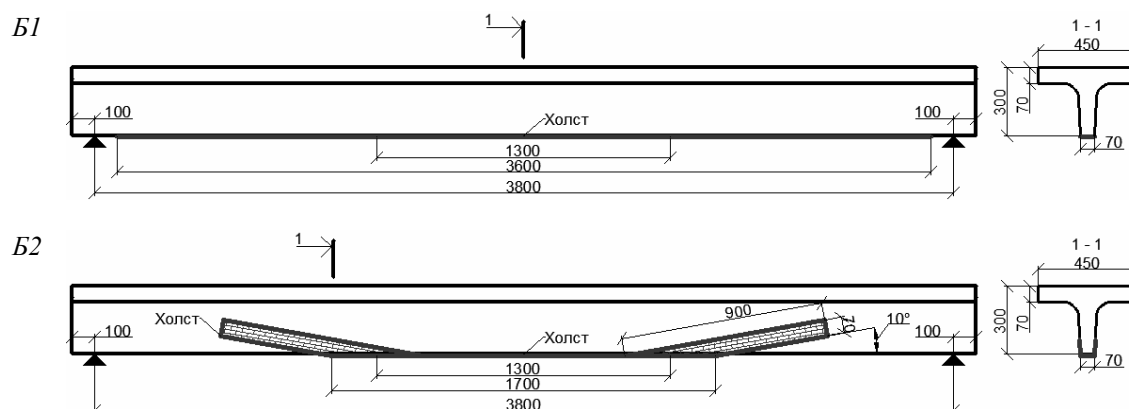


Рис. 2. Схемы усиленных образцов основной серии (окончание)



Рис. 3. Расположение балки на испытательном стенде

В процессе нагружения фиксировали момент появления первой трещины, измеряли расстояние между трещинами и величину их раскрытия. Схема сетки трещин в момент появления трещин шириной раскрытия порядка 0,02 см приведена на рис. 4.

Из результатов испытаний, приведенных в табл. 1, видно, что нагрузка, при которой раскрытие трещин составило 0,02 см, увеличилась на 30–153 % по сравнению с контрольной серией в зависимости от схемы усиления. Наибольшие значения нагрузки были зафиксированы при испытании образцов серий А3 (153,8 %) и Б2 (107,6 %), образцы этих серий были усилены холстом, при этом холст был закреплен по всей дли-

не образца в виде U-образной обоймы либо закреплен дополнительными полосами, заведенными на ребро образца, при этом среднее расстояние между трещинами на образцах серий А3 и Б2 уменьшилось в 1,5–2 раза по сравнению с образцами контрольной серии. Наименьшие значения нагрузки были получены на образцах серий А2 (30,8 %) и А5 (61,5 %), усиленных пластиной, а также на образцах серии А1 (61,5 %), усиленных холстом, не имеющим дополнительного закрепления. Таким образом, испытания показали, что применение композиционных материалов позволяет повысить трещиностойкость испытанных железобетонных образцов.

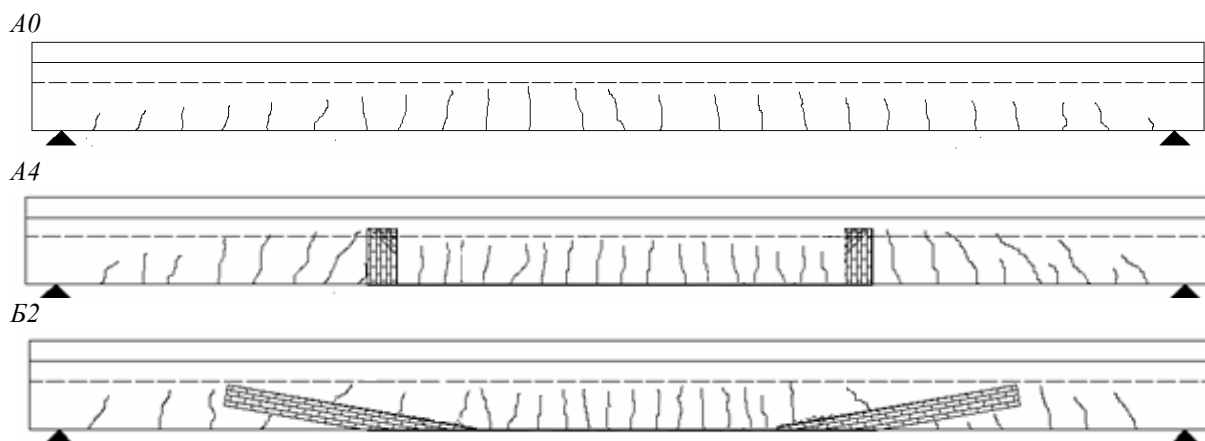


Рис. 4. Схема сетки трещин на образцах серий А0, А4 и Б2 в момент появления первых трещин шириной раскрытия порядка 0,02 см

Таблица 1

**Результаты испытаний**

| Серия              | Но-<br>мер<br>балки | Описание усиления                                                                                                                                        | Экспериментальные данные, при кото-<br>рых зафиксированы первые трещины<br>шириной раскрытия 0,2 мм |                             | Приращение<br>нагрузки $P_{0,2}$ ,<br>% |
|--------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
|                    |                     |                                                                                                                                                          | Среднее расстояние<br>между трещинами $l_m$ ,<br>см                                                 | Нагрузка $P_{0,02}$ ,<br>кН |                                         |
| A0                 | 1                   | Без усиления                                                                                                                                             | 15                                                                                                  | 58,86                       | —                                       |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 18                                                                                                  | 68,67                       |                                         |
| Усиление холстом   |                     |                                                                                                                                                          |                                                                                                     |                             |                                         |
| A1                 | 1                   | Холст шириной 70 мм на нижней<br>грани, заведенный на 200 мм за<br>место теор. обрыва                                                                    | 9                                                                                                   | 98,10                       | 61,5                                    |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 8                                                                                                   | 107,9                       |                                         |
| A4                 | 1                   | Холст на нижней грани, заведен-<br>ный на 200 мм за место теор. об-<br>рыва, закрепленный вертикаль-<br>ными полосами шириной 70 мм                      | 7                                                                                                   | 107,9                       | 84,6                                    |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 8                                                                                                   | 127,5                       |                                         |
| Б1                 | 1                   | Холст шириной 70 мм и длиной<br>3 600 мм на нижней грани                                                                                                 | 9                                                                                                   | 107,9                       | 84,6                                    |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 10                                                                                                  | 127,5                       |                                         |
| Б2                 | 1                   | Холст на нижней грани, заведен-<br>ный на 200 мм за место теор. об-<br>рыва, закрепленный наклонными<br>полосами шириной 70 мм                           | 9                                                                                                   | 127,5                       | 107,6                                   |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 9                                                                                                   | 137,3                       |                                         |
| A3                 | 1                   | U-образная обойма с высотой<br>стены 70 мм, длиной 3 720 мм на<br>нижней грани                                                                           | 9                                                                                                   | 156,9                       | 153,8                                   |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 7                                                                                                   | 166,8                       |                                         |
| Усиление пластиной |                     |                                                                                                                                                          |                                                                                                     |                             |                                         |
| A2                 | 1                   | Пластина шириной 50 мм на<br>нижней грани, заведенная на<br>220 мм за место теор. обрыва,<br>закрепленная вертикальными<br>полосами холста шириной 70 мм | 12                                                                                                  | 78,48                       | 30,8                                    |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 10                                                                                                  | 88,29                       |                                         |
| A5                 | 1                   | Пластина на нижней грани, заве-<br>денная на 220 мм за место ее<br>теор. обрыва, закрепленная вер-<br>тикальными полосами холста<br>шириной 70 мм        | 9                                                                                                   | 107,9                       | 61,5                                    |
|                    | 2                   |                                                                                                                                                          | 11                                                                                                  | 98,10                       |                                         |

При проведении эксперимента были отмечены следующие закономерности в работе усиленных образцов:

1) при любой схеме усиления с применением ПКМ первые трещины шириной раскрытия 0,02 см зафиксированы при большем значении нагрузки по сравнению с контрольной серией;

2) на всех усиленных образцах наблюдается уменьшение шага трещин  $l_m$  по сравнению с контрольной серией;

3) увеличение длины заводки, дополнительное закрепление наклонными или вертикальными хомутами привели к увеличению нагрузки  $P_{0,02}$  на 10–20 %;

4) при увеличении длины контакта ПКМ с растянутой гранью балки в поперечном сечении в три раза нагрузка  $P_{0,02}$  увеличилась на 36 %.

По результатам эксперимента были сделаны следующие предположения:

1) ширина раскрытия трещины (при одном уровне нагружения) меньше на тех образцах, где в поперечном сечении длина контакта ПКМ с растянутым поясом балки  $C_f$  больше;

2) при одном уровне нагружения и равном значении  $C_f$  ширина раскрытия трещины меньше на тех образцах, которые имеют дополнительные закрепления ПКМ вертикальными или наклонными полосами;

3) переход от холста к пластине, т.е. значительное увеличение толщины композиционного материала, в рамках существующей линейки профилей при равных нагрузках не приводит к уменьшению ширины раскрытия трещины.

На данный момент в разделе «Бетонные и железобетонные конструкции» СП 35.13330.2011 [6] в основу расчета по раскрытию трещин положена методика, построенная на предположении О.Я. Берга, в основе которой лежит зона взаимодействия арматуры и бетона [7, 8]. По мнению О.Я. Берга, развитие трещины определяется величиной радиуса армирования  $R_r$  рассматриваемой площади сечения элемента. Таким образом, расстояние между трещинами зависит от площади растянутого бетона, ограниченного наружным контуром сечения и величиной радиуса взаимодействия  $r$ , количеством и диаметром арматурных стержней, а ширина раскрытия трещин  $\alpha_{cr}$

линейно зависит от напряжений в арматуре и уменьшается с ростом процента армирования сечения и уменьшением диаметра арматуры, может быть определена по формуле

$$\alpha_{cr} = \frac{\sigma}{E} \psi, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – растягивающее напряжение, равное для ненапрягаемой арматуры напряжению  $\sigma_s$  в наиболее растянутых (крайних) стержнях;  $E$  – модуль упругости для ненапрягаемой арматуры  $E_s$ ;  $\psi$  – коэффициент раскрытия трещин.

Коэффициент раскрытия трещин  $\psi$  зависит от радиуса армирования  $R_r$  и принимается в зависимости от типа армирования: для гладкой стержневой арматуры  $\psi = 0,35R_r$ , а для арматуры периодического профиля  $\psi = 1,5\sqrt{R_r}$ . Радиус армирования  $R_r$  определяют по формуле

$$R_r = \frac{A_r}{\Sigma \beta n d}, \quad (2)$$

где  $A_r$  – площадь зоны взаимодействия для нормального сечения, принимаемая ограниченным наружным контуром сечения и радиусом взаимодействия  $r = 6d$ ;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий степень сцепления арматурных элементов с бетоном согласно таблице 7.26 [6];  $n$  – число арматурных элементов с одинаковым номинальным диаметром  $d$ ;  $d$  – диаметр одного стержня (включая случаи расположения стержней в группах).

Исходя из того, что раскрытие трещины напрямую зависит от величины радиуса армирования  $R_r$  рассматриваемой площади сечения элемента (а проведенные испытания показали, что ширина раскрытия трещины при одном уровне нагружения меньше на тех образцах, где в поперечном сечении длина контакта ПКМ с растянутым поясом балки больше), можно сделать следующее предположение: чем больше длина контакта ПКМ с растянутым поясом балки, тем меньше расчетное значение радиуса армирования  $R_r$ . Для подтверждения или опровержения данного предположения решим задачу, рассмотренную О.Я. Бергом при выражении зависимости расстояния между трещинами [8], добавив лишь в исходные данные задачи ПКМ. Расчетные схемы представлены на рис. 5 и 6.

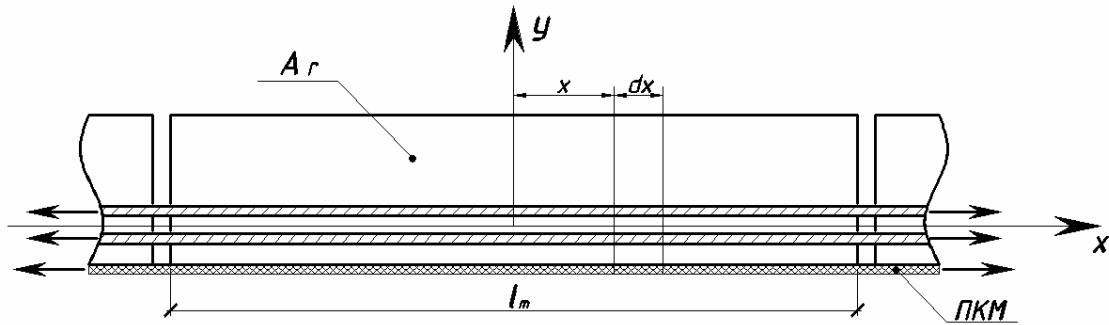


Рис. 5. Расчетная схема № 1

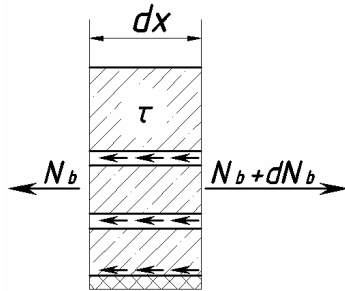


Рис. 6. Расчетная схема № 2

Аналитическая зависимость величины расстояния между трещинами  $l_m$  для железобетонного элемента, усиленного полимерным композиционным материалом, может быть установлена из перечисленных ниже соображений.

1. Перемещение сечения арматуры и материала усиления без учета совместной работы с бетоном будет равно:

$$u_0 = \varepsilon x, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация арматуры и материала усиления в месте трещины.

Пренебрегая неравномерностью деформации, перемещение сечения с учетом влияния бетона можно выразить как

$$u = u_0 - du. \quad (4)$$

2. Касательное напряжение по линии контакта композиционный материал – бетон, арматура – бетон выразим как

$$\tau = kdu = k(u_0 - u), \quad (5)$$

где  $k$  – модуль деформации сцепления.

3. Среднее растягивающее напряжение в бетоне

$$\sigma_b = \frac{N_b}{A_r} = E_b \frac{du}{dx}, \quad (6)$$

где  $N_b$  – среднее растягивающее усилие в бетоне;  $A_r$  – площадь бетона в пределах зоны взаимодействия;  $E_b$  – модуль упругости бетона.

4. Из условия равновесия элемента  $dx$  (см. рис. 6) следует, что

$$\tau(n\pi d + b_c)dx = -dN_b, \quad (7)$$

где  $n$  – число арматурных стержней с эквивалентным диаметром  $d$ ;  $d$  – диаметр арматурного стержня;  $b_c$  – ширина контакта ПКМ с растянутой гранью элемента.

Отсюда после замены  $\tau$  из уравнения (5) и  $N_b$  из уравнения (6) получаем

$$k(u_0 - u)(n\pi d + b_c) = -E_b A_r \frac{d^2 u}{dx^2}. \quad (8)$$

Или в окончательном виде

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - m^2 u = -m^2 \varepsilon x, \quad (9)$$

$$\text{где } m = \sqrt{\frac{k(n\pi d + b_c)}{E_b A_r}}.$$

5. По аналогии с [8] выразим искомую величину – радиус армирования усиленного ПКМ элемента:

$$R_{rf} = \frac{A_r}{nd + b_c / \pi}. \quad (10)$$

$$\text{Из этого следует, что } m = \sqrt{\frac{k\pi}{E_b R_{rf}}}.$$

Общий интеграл уравнения (9) имеет вид, аналогичный уравнению, описанному в [8]:

$$u_0 = C_1 \operatorname{ch} mx + iC_2 \operatorname{sh} mx + \varepsilon x - \frac{\varepsilon}{m} \operatorname{sh} mx. \quad (11)$$

В результате решения уравнения (11) с учетом значения радиуса армирования усиленного ПКМ элемента (10) получим, что образование трещины произойдет при достижении прочности бетона  $R_{bt}$ , т.е. когда  $\sigma_b = R_{bt,ser}$ , при этом условии расстояние между трещинами  $l_m$  для железобетонного элемента, усиленного полимерным композиционным материалом, выражается:

$$l_m = \frac{2}{m} \operatorname{arch} \frac{E_b \varepsilon}{E_b \varepsilon - R_{bt,ser}} = 2 \sqrt{\frac{E_b}{k\pi}} \sqrt{R_{rf}} \operatorname{arch} \frac{E_b \varepsilon}{E_b \varepsilon - R_{bt,ser}}. \quad (12)$$

Из решения рассмотренной задачи видно, что методика определения развития трещины в усиленном ПКМ элементе принципиально не отличается от методики, изложенной в разделе «Бетонные и железобетонные конструкции» СП 35.13330.2011, за исключением введения новой конструктивной характеристики – радиуса армирования усиленного ПКМ элемента  $R_{rf}$ , определяемого по формуле (10).

При анализе формулы (10) очевидно, что при сравнении двух одинаковых железобетонных элементов значение радиуса армирования будет меньше у усиленного ПКМ элемента, так как длина контакта ПКМ с растянутым поясом балки  $C_f$  – величина всегда положительная. Это косвенно подтверждает сделанное ранее предположение, что чем больше в поперечном сечении длина контакта ПКМ с растянутым поясом балки, тем меньше расчетное значение радиуса армирования  $R_r$ . Соответственно шаг трещин по формуле (12) при равных условиях будет чаще у конструкции, усиленной ПКМ, что тоже соответствует результатам эксперимента.

Проведем сравнение экспериментального и расчетного значений нагрузки, при которой образуются трещины шириной раскрытия 0,02 см  $P_{0,02}$  и расстояния между трещинами  $l_m$ . Для контрольной серии А0 расчетное значение  $P_{0,02}^p$  определим исходя из стандартной методики, изложенной в разделе «Бетонные и железобетонные конструкции» (подп. 7.105–7.110) [6], расчетное значение  $P_{0,02}^p$  основной, усиленной ПКМ серии А1–А5 и Б1–Б2 произведем на

основании предложенной методики с учетом радиуса армирования усиленного ПКМ элемента  $R_{rf}$ , определяемого по формуле (10). Расчетное значение расстояния между трещинами  $l_m^p$  для образцов основной и контрольной серий определено по формуле (12) с учетом  $R_{rf}$  и  $R_r$  соответственно. Расчетные схемы к определению  $P_{0,02}^p$  и  $l_m^p$  приведены на рис. 7.

Наибольшее напряжение в арматурном элементе для образцов серии А0 следует определять по формуле, приведенной в [9]:

$$\sigma_s = n'M(h_u - x')/I_{red}, \quad (13)$$

где  $n'$  – отношение модуля упругости ненапрягаемой арматуры к модулю упругости бетона с учетом виброползучести (для бетона класса В30  $n' = 15$ );  $M$  – значение изгибающего момента, в расчете принято равным значению, при котором ширина раскрытия трещины в экспериментальных образцах достигла 0,02 см;  $h_u$  – расстояние от верхней сжатой грани балки до центра тяжести наиболее растянутого стержня арматуры;  $x'$  – высота сжатой зоны бетона;  $I_{red}$  – приведенный к бетону момент инерции сечения.

Используя формулы (1), (2) и (13), выразим значение изгибающего момента, при котором в не усиленных ПКМ образцах образуются трещины шириной раскрытия 0,02 см:

$$M = \frac{\alpha_{cr}^{0,02} E_s I_{red}}{n'(h_u - x')\psi}. \quad (14)$$

Наибольшее напряжение в арматурном элементе для образцов серии А1–А5 и Б1–Б2, усиленных ПКМ, следует определять по формуле, приведенной в [10]:

$$\sigma_{sf} = e_s n'M(h_u - x'_y)/I_{red}^y, \quad (15)$$

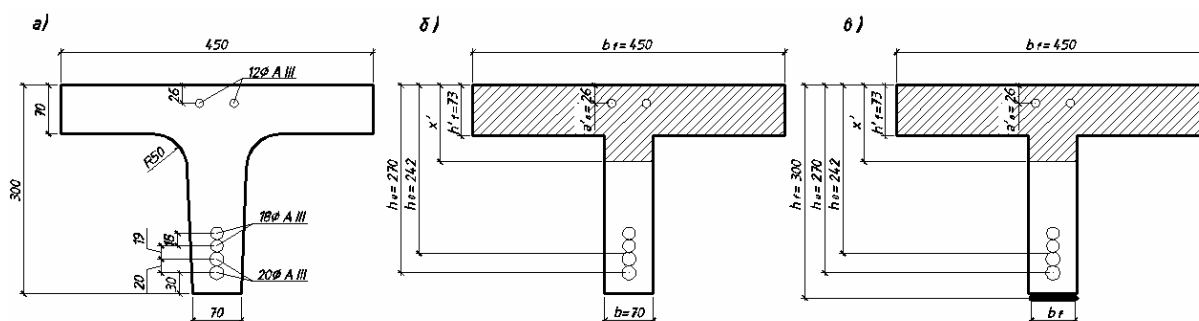


Рис. 7. Расчетные схемы к определению  $P_{0,02}^p$  и  $l_m^p$ :

а – фактическое сечение; б – расчетное сечение серии А0; в – расчетное сечение серий А1–А5 и Б1–Б2

где  $e_s$  – коэффициент, учитывающий перераспределение между арматурой и композиционным материалом;  $I_{red}^y$  – приведенный к бетону момент инерции усиленного сечения.

Используя формулы (1), (10) и (15), выразим значение изгибающего момента, при котором в усиленных ПКМ образцах образуются трещины шириной раскрытия 0,02 см:

$$M = \frac{\alpha_{cr}^{0,02} E_s I_{red}^y}{e_s n'(h_u - x'_y) \psi}. \quad (16)$$

Расчетное значение нагрузки, при которой образуются трещины шириной раскрытия 0,02 см, вычислим по формуле

$$P_{0,02}^p = \frac{M}{\Sigma \eta_i}, \quad (17)$$

где  $\Sigma \eta_i$  – сумма ординат линии влияния экспериментальных образцов согласно принятой схеме загрузки ( $\Sigma \eta = 0,7$  м).

Принимая во внимание особенности армирования экспериментальных образцов [5], при определении  $R_{rf}$  и  $R_r$  значение коэффициента  $\beta$ , учитывающего степень сцепления арматурных элементов с бетоном, было определено экспериментальным путем и составило 0,121. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что расчет по определению нагрузки, при которой образуются трещины шириной раскрытия 0,02 см, и расчет-

ное расстояние между трещинами для усиленных ПКМ железобетонных элементов показали высокую сходимость с экспериментом. Конструктивный коэффициент  $K$  при определении нагрузки  $P_{0,02}^p$  варьируется от 0,81 до 0,95, а при определении расстояния между трещинами  $l_m^p$  – от 0,63 до 0,95.

В ходе проведенной экспериментальной работы установлено, что усиление полимерными композиционными материалами на основе углеродного волокна очень эффективно для обеспечения трещиностойкости железобетонных конструкций.

На основании работ О.Я. Берга [7, 8], положенных в основу расчета по раскрытию трещин действующих норм проектирования [6], а также анализа закономерностей, выявленных в ходе эксперимента, предложена методика расчета ширины раскрытия трещины и расстояния между трещинами усиленного ПКМ изгибаемого железобетонного элемента. В случае усиления железобетонных конструкций ПКМ расстояние между трещинами рекомендовано определять по формуле (12), а ширину раскрытия трещины – согласно действующим нормам проектирования [6] с учетом новой конструктивной характеристики – радиуса армирования усиленного ПКМ элемента  $R_{rf}$ , вычисляемого по формуле (10).

Таблица 2

**Результаты расчета**

| Серия | Номер балки | Нагрузка                                   |                                |      | Расстояние между трещинами            |                           |      |
|-------|-------------|--------------------------------------------|--------------------------------|------|---------------------------------------|---------------------------|------|
|       |             | экспериментальная<br>$P_{0,02}^{экс}$ , кН | расчетная<br>$P_{0,02}^p$ , кН | $K$  | экспериментальное<br>$l_m^{экс}$ , см | расчетное<br>$l_m^p$ , см | $K$  |
| A0    | 1           | 58,86                                      | 66,84                          | 0,95 | 15                                    | 21,8                      | 0,76 |
|       | 2           | 68,67                                      |                                |      | 18                                    |                           |      |
| A1    | 1           | 98,10                                      | 126,80                         | 0,81 | 9                                     | 11,8                      | 0,72 |
|       | 2           | 107,91                                     |                                |      | 8                                     |                           |      |
| A2    | 1           | 78,48                                      | 118,47                         | 0,70 | 12                                    | 13,2                      | 0,83 |
|       | 2           | 88,29                                      |                                |      | 10                                    |                           |      |
| A3    | 1           | 156,95                                     | 206,25                         | 0,78 | 9                                     | 7,6                       | 0,95 |
|       | 2           | 166,77                                     |                                |      | 7                                     |                           |      |
| A4    | 1           | 107,91                                     | 126,80                         | 0,92 | 7                                     | 11,8                      | 0,63 |
|       | 2           | 127,53                                     |                                |      | 8                                     |                           |      |
| A5    | 1           | 107,91                                     | 118,47                         | 0,85 | 9                                     | 13,2                      | 0,76 |
|       | 2           | 98,10                                      |                                |      | 11                                    |                           |      |
| B1    | 1           | 107,91                                     | 126,80                         | 0,92 | 9                                     | 11,8                      | 0,81 |
|       | 2           | 127,53                                     |                                |      | 10                                    |                           |      |
| B2    | 1           | 127,53                                     | 126,80                         | 0,95 | 9                                     | 11,8                      | 0,76 |
|       | 2           | 137,34                                     |                                |      | 9                                     |                           |      |

## Библиографический список

1. Бокарев С.А., Громенко К.Г., Слепец В.А. Обеспечение пропускной способности мостов опорной сети Новосибирской области // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 210–217.
2. Шилин А.А., Пиеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 184 с.
3. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона. М.: Изд-во Министерства строительства предприятий машиностроения, 1950. 268 с.
4. 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.
5. Бокарев С.А., Ефимов С.В. Вопросы подбора усиленных железобетонных балок при экспериментах на уменьшенных масштабных моделях // Наукоедение. 2014. № 5. С. 1–9.
6. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\*. М.: Минрегион РФ, 2011. 340 с.
7. Берг О.Я. О предельном состоянии по трещинам в железобетонных мостовых конструкциях // Тр. ВНИИЖТа. Вып. 3. 1951. С. 5–59.
8. Берг О.Я. Исследование процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля // ВНИИЖТ. Сообщение № 44. 1954. 23 с.
9. Власов Г.М., Устинов В.П. Расчет железобетонных мостов. М.: Транспорт, 1992. 256 с.
10. Неровных А.А., Лягуша Т.К. Расчет выносливости железобетонных пролетных строений, усиленных композиционными материалами // Вестник СГУПС. 2014. № 30. С. 20–29.

*S.A. Bokarev, V.A. Slepets*

## Cracking in reinforced concrete bridge beams strengthened with polymer composite materials

**Abstract.** The results of the laboratory experiment aimed at the studying of cracking process in reinforced concrete decks externally strengthened with polymer composite materials based on the carbon fiber are suggested in the paper. The models of the main beams of the highway bridge deck with respect to the standard project design (type 3.503-14), identification number 710/5 (total quantity – 16 pieces) were tested. The following materials of test samples were used: B30 (cubic) grade concrete; 18 and 20 mm diameter, grade A400 bars as working reinforcement; 6 mm diameter, grade A240 bars as structural reinforcement. The strengthening was made using lamels and tapes of the system of external strengthening produced by the public limited company 'HC Composite' (FibARMTape 530/300, FibARMLamel 14/100); different schemes of fixation were applied. The moment of the first crack appearance, crack spacing, and the crack width in the simple bending zone were being controlled during the experiment. The results of the experiment show that strengthening with polymer composite materials based on the carbon fiber is very effective in cracking resistance of reinforced concrete constructions. The mechanisms of the cracking process in strengthened reinforced concrete beams under bending were identified; and, the hypothesis supposition on the cracking process in reinforced concrete elements strengthened with composite materials was suggested. The problem of identifying the radius of reinforcement and crack spacing in reinforced concrete elements strengthened with composite materials was solved using the test results and the concept of O.Y. Berg, which had been taken as a basis for the calculation of crack opening in current design standards (Design Code 35.13330.2011 Bridges and Tubes) for typical, unstrengthened reinforced concrete elements. The method of crack width and crack spacing calculation for reinforced concrete elements strengthened with composite materials is proposed.

**Key words:** reinforced concrete decks; reinforced concrete bridge decks strengthening; polymer composite materials; carbon fiber; crack; crack width; crack spacing.

**Бокарев Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты», проректор по научной работе СГУПС. E-mail: bokarevsa@stu.ru

**Слепец Виктор Александрович** – ведущий эксперт отдела ИССО ГКУ НСО ТУАД, аспирант кафедры «Мосты» СГУПС. E-mail: vity\_slepets@mail.ru