

## Расчет выносливости железобетонных пролетных строений, усиленных композиционными материалами

В статье представлены результаты экспериментальных исследований системы внешнего армирования на основе углеродных волокон и ее влияния на выносливость усиленных изгибаемых железобетонных элементов, а также предложения по методике расчета усиленных элементов на выносливость.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, полимерный композиционный материал (ПКМ), фиброармированный пластик (ФАП), изгибаемый железобетонный элемент, усиление композиционным материалом, выносливость, методика расчета.

В настоящее время применение систем внешнего армирования на основе углеродных волокон (СВА) является одним из наиболее перспективных способов восстановления и увеличения несущей способности железобетонных конструкций мостовых сооружений. Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные как за рубежом, так и в России [1–5], показали высокую эффективность СВА. Применение данной технологии позволяет увеличить не только несущую способность железобетонных элементов, но и их выносливость и долговечность работы, что является особенно важным для конструкций железнодорожных мостов.

Начиная с 2009 г. в НИЛ «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения проводят исследования, направленные на изучение различных систем внешнего армирования и их эффективности при усилении железобетонных конструкций. В 2012 г. был поставлен эксперимент, целью которого являлась разработка методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных СВА, на выносливость. Для проведения данного эксперимента была запроектирована и изготовлена партия железобетонных образцов полной длиной 1680 мм с прямоугольным поперечным сечением 160 × 220 мм. Класс бетона образцов В30, в качестве рабочей арматуры использовали стержни из стали класса А400. Конструкция образцов показана на рис. 1.

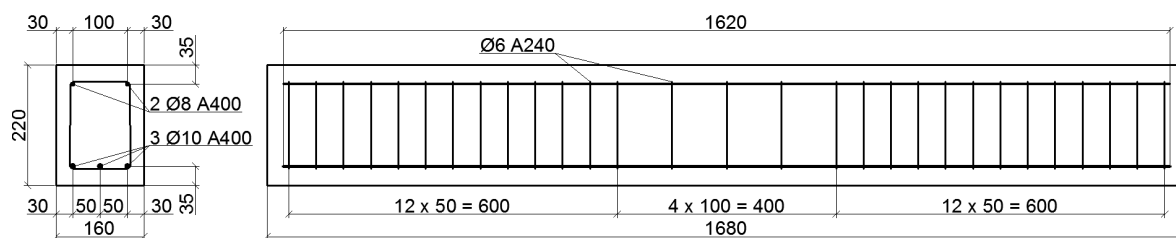


Рис. 1. Конструкция железобетонных образцов

Опытные образцы были разделены на четыре группы – одна контрольная (серия 0) и три усиленных по разным схемам (серии 1–3). Каждая группа состояла из семи образцов, три из которых испытывали статической нагрузкой до разрушения, а четыре – динамической с различной максимальной и минимальной нагрузками цикла нагружения. В качестве элементов СВА использовали холст FibARM Tape 530/300 (все группы) и ламель FibARM Lamel 14/100 (группа 3) производства ЗАО «ХК «Композит». Наклейка холстов был осуществлена с помощью адгезивного состава FibARM Resin 230, ламелей – Sikadur 30. Схемы усиления приведены на рис. 2.

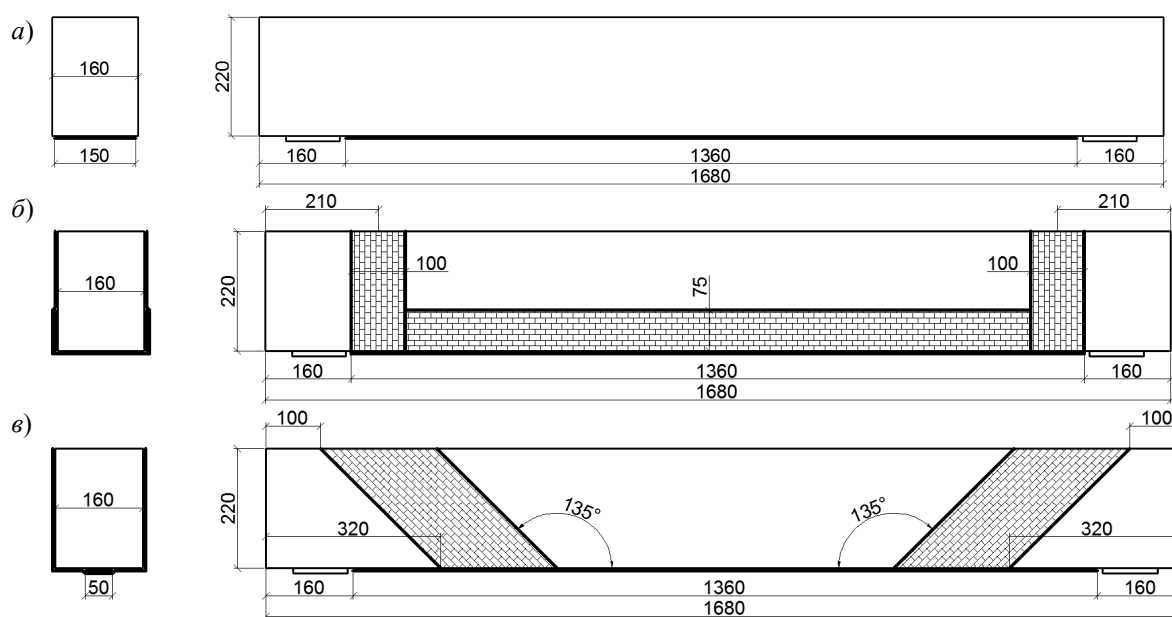


Рис. 2. Схемы усиления опытных образцов:

а – серия 1; б – серия 2; в – серия 3

Образцы, входящие в первую серию (см. рис. 2, а), были усилены наклейкой полосы холста FibARM Tape 530/300 шириной 150 мм на нижнюю грань без устройства закрепления. На образцы второй серии (см. рис. 2, б) была наклеена U-образная обойма с заведением на боковые грани балки по 75 мм из такого же холста, в опорных участках было устроено закрепление обоймы в виде вертикальных хомутов шириной 100 мм, также выполненных из холста FibARM 530/300. Для усиления образцов третьей серии (см. рис. 2, в) использовали полосу ламели FibARM Lamel 14/100 шириной 50 мм с устройством наклонных хомутов шириной 150 мм, направленных под углом  $45^\circ$  к продольной оси балки.

Статическое нагружение образцов осуществляли на прессе WPM-300 поэтапно с шагом в 1 т. При испытаниях на каждом этапе нагружения с помощью тензометрического датчика перемещений и индикатора часового типа фиксировали прогиб балок в середине пролета, а с помощью тензодинамометра и шкалы прессы – величину нагрузки на образец (рис. 3); показания тензометрического датчика и тензодинамометра снимали и обрабатывали посредством мобильного измерительного комплекса «Тензор МС» [6]. Основным результатом статических испытаний образцов являлась их несущая способность, необходимая для определения максимальной и минимальной нагрузок цикла нагружения при испытаниях на выносливость.

Испытания на выносливость проводили на универсальной испытательной машине ГРМ-2А при синусоидальных циклах нагружения. Частота нагружения составляла  $\nu = 8,38$  Гц, коэффициент асимметрии  $\rho = 0,3$ . Значение коэффициента асимметрии выбрано на основе результатов анализа типовых проектов железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, который показал, что в большинстве случаев доля постоянных нагрузок составляет около 30 % от полной нагрузки. Во время испытаний для каждого образца определяли его циклическую долговечность – число циклов нагружения, которое выдержал образец до полного разрушения; также фиксировали схему разрушения образцов.

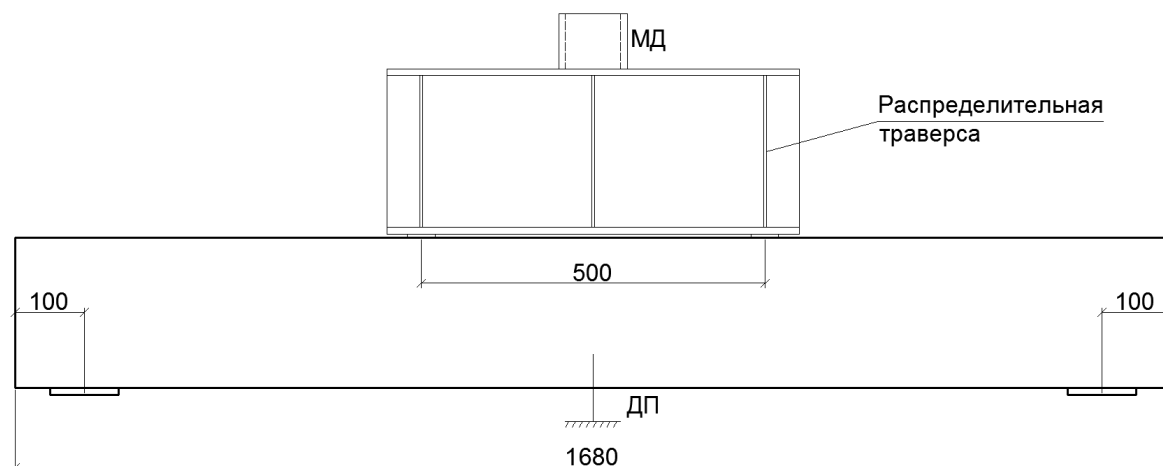


Рис. 3. Схема опирания и нагружения опытных образцов, расстановка приборов:  
МД – месдоза; ДП – датчик перемещений

Приложение нагрузки осуществляли через металлическую распределительную траверсу, а опирание образцов – через балансиры, установленные на металлических цилиндрических опорах траверс (кареток) прессов.

Разрушение образцов серии 0 при испытаниях на статику произошло по нормальному сечению (рис. 4, а), что было выражено в раскрытии нормальных трещин и разрушении бетона сжатой зоны. Причиной разрушения образцов серии 1 послужило отслоение композиционного материала в приопорной зоне с разрушением защитного слоя бетона (рис. 4, б). Образцы серии 3 разрушились по причине отслоения и разрыва композиционного материала в середине пролета балки (рис. 4, в). Разрушение образцов серии 4 происходило вследствие отслоения ламели и ее «продергивания» под хомутами (рис. 4, г).

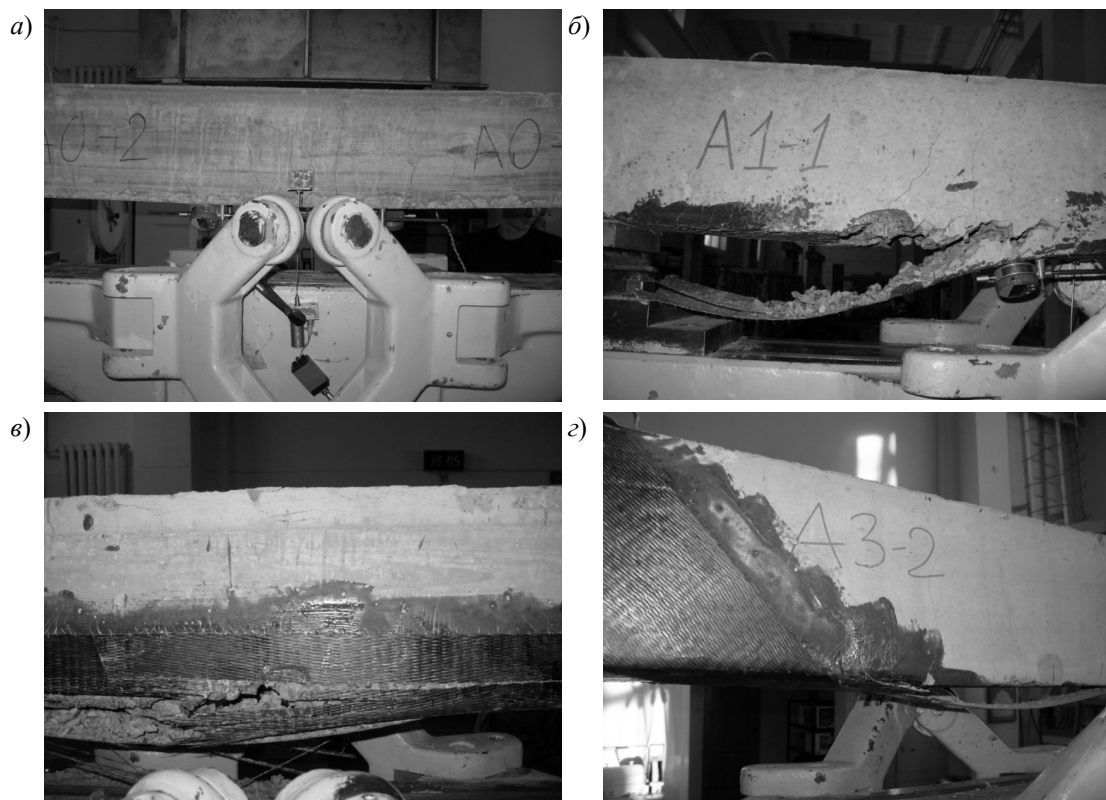


Рис. 4. Виды разрушенных образцов:  
а – образец 0-2; б – образец 1-1; в – образец 2-3; г – образец 3-2

Максимальный и минимальный уровни нагружения были назначены по результатам статических испытаний. Следует отметить, что подтвердилась схема разрушения образцов, полученная ранее [2], – разрыв части стержней рабочей арматуры, приводящий к уменьшению жесткости конструкции, после 80–85 % циклов нагружения от их общего числа  $N$  и полное разрушение образца после  $N$  циклов. Виды установленного в испытательную машину образца 1-3 до начала испытания и после его разрушения представлены на рис. 5.

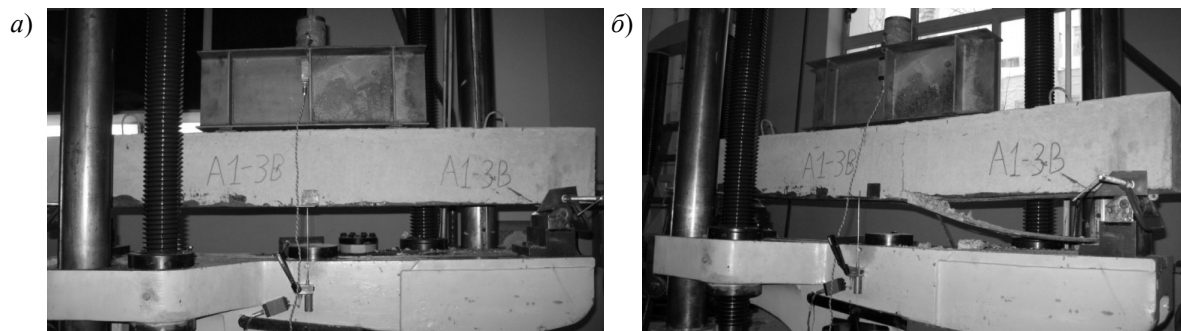


Рис. 5. Виды образца 1-3:  
а – до испытания; б – после испытания

Средние значения несущей способности образцов всех серий, полученные по результатам статических испытаний, а также характеристики циклов нагружения и циклическая долговечность – число циклов нагружений до полного усталостного разрушения – для каждого образца, испытанного на выносливость, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний опытных образцов**

| Серия | Средняя несущая способность $P$ , тс | № образца | Уровень нагружения $P / P_{\max}$ | Максимальная нагрузка цикла $P_{\max}$ , тс | Минимальная нагрузка цикла $P_{\min}$ , тс | Циклическая долговечность $N$ |
|-------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| 0     | 9,14                                 | 1         | 0,45                              | 3,45                                        | 1,04                                       | 1 173 535                     |
|       |                                      | 2         | 0,55                              | 4,21                                        | 1,26                                       | 752 692                       |
|       |                                      | 3         | 0,65                              | 5,03                                        | 1,51                                       | 279 054                       |
|       |                                      | 4         | 0,80                              | 6,15                                        | 1,85                                       | 157 376                       |
|       |                                      | 5         | 0,95                              | 7,28                                        | 2,18                                       | 72 906                        |
| 1     | 15,78                                | 1         | 0,45                              | 6,03                                        | 1,81                                       | 594 812                       |
|       |                                      | 2         | 0,55                              | 7,38                                        | 2,21                                       | 519 895                       |
|       |                                      | 3         | 0,65                              | 8,72                                        | 2,61                                       | 434 419                       |
|       |                                      | 4         | 0,75                              | 10,06                                       | 3,02                                       | 274 026                       |
| 2     | 20,16                                | 1         | 0,45                              | 7,71                                        | 2,31                                       | 826 603                       |
|       |                                      | 2         | 0,55                              | 9,42                                        | 2,83                                       | 585 259                       |
|       |                                      | 3         | 0,65                              | 11,14                                       | 3,34                                       | 273 523                       |
|       |                                      | 4         | 0,75                              | 12,85                                       | 3,85                                       | 151 846                       |
| 3     | 16,37                                | 1         | 0,35                              | 4,87                                        | 1,46                                       | 1 830 695                     |
|       |                                      | 2         | 0,45                              | 6,26                                        | 1,88                                       | 955 823                       |
|       |                                      | 3         | 0,55                              | 7,65                                        | 2,30                                       | 221 232                       |
|       |                                      | 4         | 0,65                              | 9,04                                        | 2,71                                       | 158 382                       |

По результатам испытаний были построены кривые усталости для рабочей арматуры, приведенные на рис. 6. Эти кривые характеризуют сопротивляемость арматуры усиленных и неусиленных конструкций циклическому нагружению.

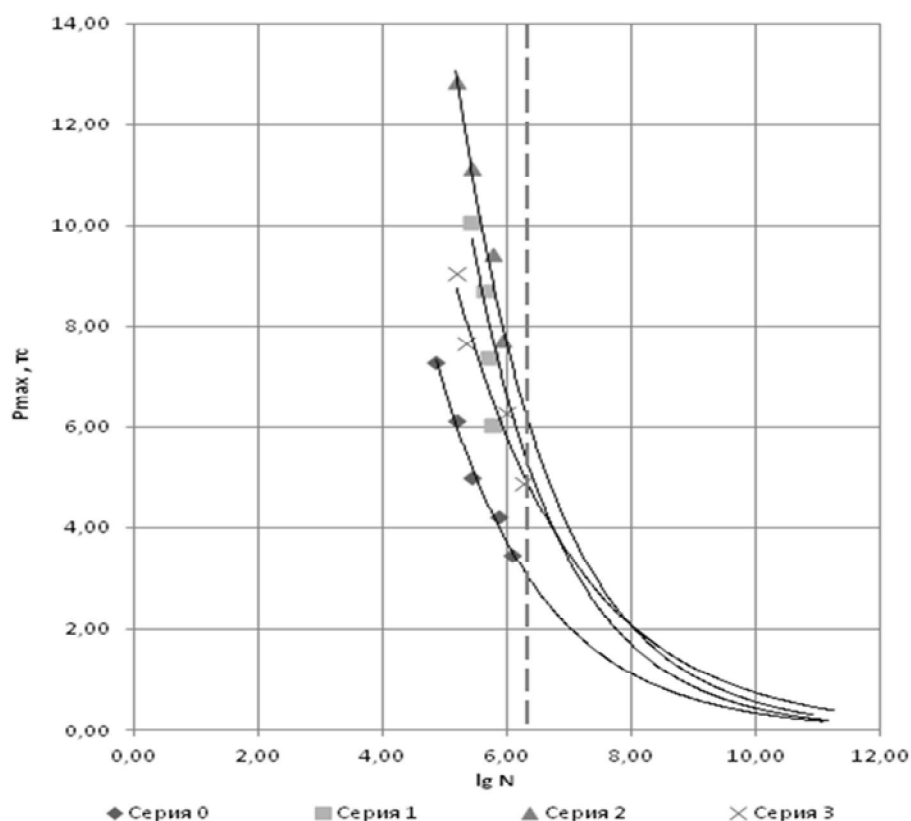


Рис. 6. Кривые усталости

Циклическая долговечность образцов серии 0 по сравнению с образцами серии 1 в среднем меньше в 8,33 раза, по сравнению с образцами серии 2 – в 14,26 раза и по сравнению с образцами серии 3 – в 6,32 раза. Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение СВА позволяет значительно увеличить долговечность изгибаемых железобетонных элементов.

На графиках рис. 6 видно, что при одинаковых уровнях загрузки рабочая арматура усиленных образцов выдерживает большее количество циклов нагружения, чем арматура неусиленных, что свидетельствует об улучшении условий ее работы.

Увеличение долговечности и усталостной прочности растянутой арматуры образцов, очевидно, связано с перераспределением напряжений между этой арматурой и внешним углепластиковым армированием. Для подтверждения этого предположения работа экспериментальных образцов была смоделирована в программном пакете MatLAB. Составленные модели позволили получить значения напряжений в растянутой арматуре для усиленных и неусиленных образцов при максимальных нагрузках цикла, принятых равными 6,15 и 7,51 т. Значения напряжений  $\sigma_{s\,calc}^i$ , полученные по результатам расчета для каждой серии образцов при указанных нагрузках, фактические значения напряжений  $\sigma_{s\,exp}^i$ , а также отношение площади поперечного сечения материала усиления  $A_f$  к площади поперечного сечения стальной растянутой арматуры  $A_s$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Напряжения в растянутой арматуре

| Номер образца | Площадь сечения материала усиления, мм <sup>2</sup> | $A_f / A_s$ | Расчетные напряжения в растянутой арматуре $\sigma_{s\,calc}^i$ , МПа | Фактические напряжения в растянутой арматуре $\sigma_{s\,exp}^i$ , МПа |
|---------------|-----------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 0-4           | —                                                   | —           | 290,6                                                                 | 503,2                                                                  |
| 1-1           | 44,1                                                | 0,1873      | 217,8                                                                 | 339,0                                                                  |
| 3-2           | 70,0                                                | 0,2972      | 198,6                                                                 | 280,9                                                                  |
| 0-5           | —                                                   | —           | 355,3                                                                 | 549,4                                                                  |
| 1-2           | 44,1                                                | 0,1873      | 266,3                                                                 | 349,9                                                                  |
| 2-1           | 88,2                                                | 0,3745      | 212,9                                                                 | 254,1                                                                  |
| 3-3           | 70,0                                                | 0,2972      | 242,7                                                                 | 303,2                                                                  |

Для каждого из значений соотношения площади композиционного материала и стальной арматуры был получен коэффициент, учитывающий снижение напряжений в растянутой арматуре, определенный по формуле

$$d_s = \frac{\sigma_s^i}{\sigma_s^0}, \quad (1)$$

где  $\sigma_s^i$  и  $\sigma_s^0$  – напряжения в растянутой арматуре усиленных и неусиленных образцов соответственно, МПа.

Полученные значения коэффициента  $d_s$  для расчетных и фактических напряжений в арматуре приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Напряжения в растянутой арматуре

| Номер образца | Площадь сечения материала усиления, мм <sup>2</sup> | $A_f / A_s$ | Коэффициент снижения напряжений      |                                       |
|---------------|-----------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
|               |                                                     |             | для расчетных значений $d_{s\,calc}$ | для фактических значений $d_{s\,exp}$ |
| 0-4           | —                                                   | 0,0         | —                                    | —                                     |
| 0-5           |                                                     |             |                                      |                                       |
| 1-1           | 44,1                                                | 0,1873      | 0,74948                              | 0,67372                               |
| 1-2           |                                                     |             | 0,74951                              | 0,63686                               |
| 2-1           | 88,2                                                | 0,3745      | 0,59921                              | 0,46253                               |
| 3-2           | 70,0                                                | 0,2972      | 0,68341                              | 0,55831                               |
| 3-3           |                                                     |             | 0,68309                              | 0,55188                               |

Как видно из таблицы, расчетные значения напряжений изменяются меньше, чем фактические. Это свидетельствует о том, что расчетные формулы, учитывающие изменение жесткости усиленной конструкции за счет включения в работу композиционного материала, не в полной мере отражают реальное перераспределение напряжений между ним и растянутой стальной арматурой. Это вызвано тем, что при расчете момент инерции сечения за счет добавления композиционного материала изменяется мало, однако по факту жесткость конструкции увеличивается значительно, о чем свидетельствуют значения прогибов. Расчетные значения прогибов усиленных образцов по сравнению с неусиленными уменьшились на 25–40 %, в то время как для фактических значений эта разница составила 40–50 %. Для компенсации этого различия можно использовать коэффициент  $e_s$ :

$$e_s = \frac{d_{s\,exp}}{d_{s\,calc}}. \quad (2)$$

Полученные значения коэффициента  $e_s$  позволили определить вид зависимости между ним и отношением площадей композиционного материала и арматуры, что дало возможность экстраполировать полученные результаты и рекомендовать значения коэффициента  $e_s$  для различных схем усиления. Как показали расчеты и опыт проектирования СВА из композиционных материалов, для большинства случаев усиления реальных конструкций пролетных строений значение отношения площадей композиционного материала и арматуры не будет превышать 0,2. Значения коэффициента  $e_s$ , рекомендуемые для различных значений отношения площадей композиционного материала и стальной арматуры, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициента  $e_s$ 

|           |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_f/A_s$ | 0,000 | 0,062 | 0,125 | 0,187 | 0,297 | 0,375 |
| $e_s$     | 1,000 | 0,929 | 0,881 | 0,849 | 0,808 | 0,772 |

*Примечание.* Для промежуточных значений  $A_f/A_s$  значение коэффициента  $e_s$  следует принимать по интерполяции.

Коэффициент  $e_s$  необходимо применять при расчете усиленных элементов на выносливость по методу предельных состояний. Формула проверки выносливости усиленного сечения по арматуре в таком случае будет иметь следующий вид:

$$\frac{M}{I_{red}} e_s n' (h - x' - a_u) \leq m_{as1} R_{sf}, \quad (3)$$

где  $M$  – изгибающий момент, действующий в расчетном сечении, кНм;  $I_{red}$  – приведенный момент инерции усиленного сечения, м<sup>4</sup>;  $n'$  – условное соотношение модулей упругости бетона и арматуры;  $h$  – высота сечения, м;  $x'$  – высота сжатой зоны усиленного сечения, м;  $a_u$  – расстояние от растянутой грани сечения до центра тяжести ближайшего ряда рабочей арматуры, м;  $R_{sf}$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению, МПа;  $m_{as1}$  – коэффициент, учитывающий асимметрию цикла напряжений в арматуре.

### Библиографический список

1. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 2. С. 112–124.
2. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Оценка выносливости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: Междунар. сб. науч. тр. 2010. № 10. С. 287–294.
3. Rosenboom O.A., Rizkalla S.H. Fatigue behavior of Prestressed concrete bridge girders strengthened with various CFRP Systems // 7-th International Symposium on FRP reinforcement for concrete structures (SP-230). 2005. P. 597–612.
4. Gussenhoven R., Brena S.F. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with different FRP laminate configurations // 7-th International Symposium on FRP reinforcement for concrete structures (SP-230). 2005. P. 613–630.
5. Aidoo J., Harries K.A., Petrou M.F. Fatigue behavior of CFRP-strengthened reinforced concrete bridge girders // Composite Constructions. 2004. № 8 (6). P. 501–509.
6. Бокарев С.А., Яинов А.Н., Снежков И.И., Слюсарь А.В. Малогабаритные автоматизированные системы для диагностики ИССО // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 9. С. 25–26.

*A.A. Nerovnykh, T.K. Lyagusha. Fatigue Life Calculation of Reinforced Concrete Spans Strengthened with Composite Materials.* Results of an experimental study of the external reinforcement system based on carbon fibers are reported. The capabilities of the system in prolonging the fatigue life of bending reinforced concrete beams are discussed. Improved methods for predicting the fatigue strength of reinforced elements are proposed.

**Keywords:** *carbon fiber, polymer composite material, fiber-reinforced plastic, bending reinforced concrete beam, reinforcement with composite materials, fatigue life, calculation method.*

**Неровных Алексей Алексеевич** – младший научный сотрудник НИЛ «Мосты» НИДЦ СГУПСа. Область научных интересов: композиционные материалы на основе углеродного волокна (углепластики); проектирование усиления пролетных строений мостов; усиление железобетонных элементов мостов; прочность и выносливость конструкций, усиленных углепластиков. E-mail: [aleksey@nerovnykh.ru](mailto:aleksey@nerovnykh.ru)

**Лягуша Татьяна Константиновна** – исполнительный директор ООО «КомпозитСпецСтрой». Область научных интересов: композиционные материалы на основе углеродного волокна (углепластики); усиление железобетонных конструкций; прочность, выносливость и сейсмостойкость конструкций, усиленных углепластиков. E-mail: [t.lyagusha@kss.do](mailto:t.lyagusha@kss.do)