

УДК 624.012.45

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

*Е.Н. Бадалова, Д.Н. Лазовский*

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь  
e-mail: e.badalova@psu.by, d.lazovski@psu.by

*Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне пластинами на основе углеродных волокон, вклеенными в предварительно выполненные вертикальные пазы. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиленных конструкций предложено осуществлять на основе деформационной и блочной моделей. Приведено сравнение экспериментальных и расчетных значений прочности и ширины раскрытия трещин.*

**Ключевые слова:** *усиление железобетонных конструкций, пластины на основе углеродных волокон, деформационная модель, блочная модель, напряженно-деформированное состояние.*

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH COMPOSITE MATERIAL BASED ON CARBON FIBERS

*E. Badalova, D. Lazovski*

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus  
e-mail: e.badalova@psu.by, d.lazovski@psu.by

*The results of experimental and theoretical studies of bent reinforced concrete structures reinforced in the stretched zone with carbon fiber-based plates glued into pre-made vertical grooves are presented. It is proposed to calculate the parameters of the stress-strain state of reinforced structures on the basis of deformation and block models. The comparison of experimental and calculated values of crack strength and opening width is given.*

**Keywords:** *reinforcement of reinforced concrete structures, carbon fiber-based plates, deformation model, block model, stress-strain state.*

**Введение.** Композитные материалы на основе углеродных волокон наряду с применением в авиационной, авиакосмической, машиностроительной и автомобильной индустрии нашли свою область использования и в качестве строительных материалов. Высокая прочность углеродных волокон, их высокая коррозионная стойкость в условиях агрессивной среды делают углепластик конкурентоспособным материалом в качестве замены основной стальной арматуры в железобетонных конструкциях, а также в качестве дополнительной арматуры при усилении конструкций [1].

Усиление изгибаемых железобетонных конструкций дополнительной арматурой на основе углеродных волокон выполняется главным образом путем приклейки пластин или холста к наружной поверхности элемента [2–4]. Причем усиление растянутой зоны пластинами может сопровождаться дополнительным усилением зоны анкеровки пластин, например, приклейкой холста из углеродных волокон [4; 5]. Еще одним способом соединения дополнительной арматуры в виде пластин из углеродных волокон с усиливаемой железобетонной конструкцией является вклеивание пластин в предварительно выполненные пазы [6; 7]. Последний способ

позволяет увеличить сцепление пластин с бетоном по сравнению с приклеиванием к наружной поверхности конструкции [7].

Существующие нормативные документы по проектированию усиления железобетонных конструкций композиционными материалами на основе углеродных волокон рекомендуют расчет прочности усиленных элементов выполнять с использованием деформационной модели [8; 9; 10] или упрощенным методом [11]. В первом случае деформации дополнительной арматуры из углепластика ограничивают предельным значением, соответствующим проскальзыванию (отрыву) пластины от бетона конструкции при внешнем армировании. Во втором случае [11] возможный отрыв пластины от наружной поверхности усиленной конструкции прежде достижения композитным материалом предельных деформаций, соответствующих его разрыву, предлагается учитывать коэффициентом работы  $\gamma_c$ . В случае вклеивания дополнительной углепластиковой арматуры в виде пластин в предварительно выполненные пазы тот же документ [11] предлагает учитывать дополнительную арматуру с полным расчетным сопротивлением, соответствующим ее разрыву.

Целью настоящего экспериментально-теоретического исследования является предложение методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне пластинами на основе углеродных волокон, вклеенными в предварительно выполненные пазы, позволяющей устанавливать параметры напряженно-деформированного состояния на любом этапе работы конструкции с учетом перераспределения напряжений между бетоном, основной и дополнительной арматуры на участках между трещинами.

**Экспериментальные исследования.** Для получения фактических параметров напряженно-деформированного состояния, фактических значений прогибов, особенностей образования, распределения и ширины раскрытия трещин изгибаемой конструкции, усиленной дополнительной арматурой на основе углеродных волокон, проводили экспериментальные исследования. Опытным образцом являлась железобетонная многопустотная плита длиной 5980 мм, шириной 720 мм, высотой 220 мм, армированная в нижней зоне двумя предварительно напряженными арматурными стержнями диаметром 12 мм класса S800. Класс бетона плиты, определенный по результатам испытания бетонных кубов и призм, составил C'28.3/35.4. Плита была усилена в растянутой зоне двумя пластинами из углеродных волокон шириной 25 мм, толщиной 1,2 мм с  $f_{tk,ad}=2465$  МПа,  $E_{s,ad}=191000$  МПа, вклеенными в предварительно пропиленные вертикальные пазы с использованием эпоксидного двухкомпонентного клеящего состава Sikadur 30 (рисунок 1) [12].

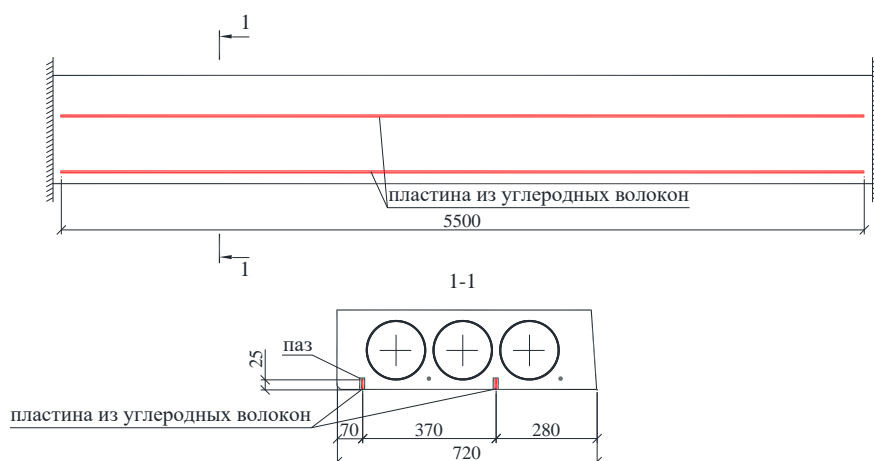


Рисунок 1. – Схема усиления опытной плиты

Опытную плиту испытывали по однопролетной балочной схеме, передавая нагрузку от гидравлического домкрата через распределительные стальные траверсы на верхнюю грань плиты четырьмя сосредоточенными силами (рисунок 2).

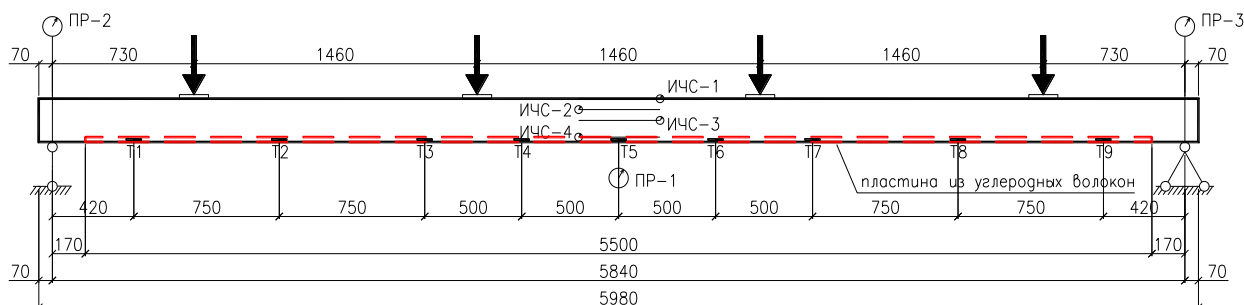


Рисунок 2. – Схема нагружения и расположения приборов при испытании опытной плиты

Разрушение опытной плиты произошло в результате разрыва углеродных волокон одной из пластин усиления (рисунок 3). При этом относительные продольные деформации арматуры усиления достигли предельного значения 12.9‰. Изгибающий момент при разрушении плиты  $M_u=72,9$  кН·м.



Рисунок 3. – Общий вид опытной плиты после разрушения

**Теоретические исследования.** Для расчета изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне пластинами на основе углеродных волокон, вклеенными в вертикальные пазы, применяли деформационную модель. Расчет производили в несколько этапов, соответствующих различным стадиям нагружения конструкции [12].

1 этап – стадия отпуска предварительно напряженной основной арматуры с передачей усилия предварительного напряжения на бетон конструкции. Для этой стадии уравнения напряженно-деформированного состояния имеют вид

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_0 - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_0 - y_j) = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} = 0 \\ \varepsilon_{0ci} = \frac{1}{r} (y_0 - y_i), \quad \varepsilon_{0pj} = \frac{1}{r} (y_0 - y_j) \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{0ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{0pj}) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ci}, \sigma_{pj}$  – нормальные напряжения в элементарной площадке с координатой соответственно  $y_i, y_j$  бетона и предварительно напряженной основной арматуры;

$y_0$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения конструкции в момент передачи усилия предварительного напряжения;

$y_i, y_j$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести элементарной площадки соответственно бетона и предварительно напряженной основной арматуры;

$A_{ci}, A_{pj}$  – площадь сечения элементарной площадки соответственно с координатой  $y_i, y_j$  бетона и предварительно напряженной основной арматуры;

$\varepsilon_{0ci}, \varepsilon_{0pj}$  – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой соответственно  $y_i, y_j$  бетона и предварительно напряженной основной арматуры;

$\frac{1}{r}$  – кривизна продольной оси сечения железобетонной конструкции в момент обжатия.

2 этап – стадия эксплуатации, предшествующая усилению конструкции, учитывающая деформации в основном сечении от внешних воздействий, включая нагрузку от собственного веса конструкции и усилие обжатия. Параметры напряженно-деформированного состояния на втором этапе определяют из решения следующей системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_{0,1} - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_{0,1} - y_j) - M_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} = 0 \\ \varepsilon_{1ci} = \frac{1}{r_1} (y_{0,1} - y_i) + \varepsilon_{0ci}, \quad \varepsilon_{1pj} = \frac{1}{r_1} (y_{0,1} - y_j) + \varepsilon_{0pj} \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{1ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{1pj}) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $y_{0,1}$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения элемента в момент времени, предшествующий усилению;

$M_1$  – изгибающий момент от внешних воздействий;

$\varepsilon_{1ci}, \varepsilon_{1pj}$  – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой соответственно  $y_i, y_j$  бетона и предварительно напряженной основной арматуры перед усилением;

$\frac{1}{r_1}$  – кривизна продольной оси основного сечения конструкции перед усилением.

Распределение относительных деформаций и напряжений по высоте сечения, нормального к продольной оси плиты, на стадии эксплуатации, предшествующей усилению плиты, приведено на рисунке 4.

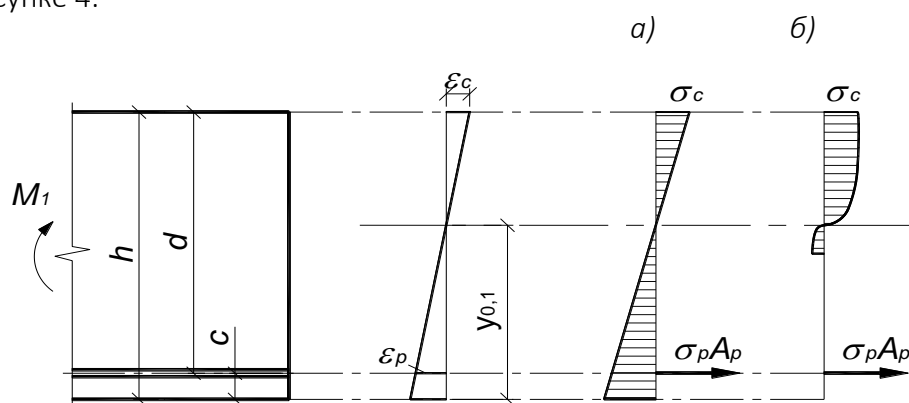


Рисунок 4. – Распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении плиты на стадии эксплуатации, предшествующей усилению: а) до образования трещин; б) после образования трещин

3 этап – стадия эксплуатации конструкции после усиления под влиянием внешних воздействий вплоть до ее предельного состояния. Параметры напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции определяем из решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_{0,ad} - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_{0,ad} - y_j) + \\ \quad + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} \cdot (y_{0,ad} - y_k) - M = 0 \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} = 0 \\ \varepsilon_{ci} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_i) + \varepsilon_{0ci} + \varepsilon_{1ci} \\ \varepsilon_{pj} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_j) + \varepsilon_{0pj} + \varepsilon_{1pj} \\ \varepsilon_{s,adk} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_k) \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \quad \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{pj}), \quad \sigma_{s,adk} = f(\varepsilon_{s,adk}) \end{array} \right. , \quad (3)$$

где  $\sigma_{s,adk}$  – нормальные напряжения в элементарной площадке с координатой  $y_k$  дополнительной арматуры из углеродных волокон;

$y_{0,ad}$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения усиленного элемента;

$y_k$  – расстояние от выбранной оси до центра тяжести элементарной площадки дополнительной арматуры из углеродных волокон;

$A_{s,adk}$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки дополнительной арматуры из углеродных волокон;

$M$  – изгибающий момент от внешних воздействий;

$\varepsilon_{ci}, \varepsilon_{pj}, \varepsilon_{s,adk}$  – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой соответственно  $y_i, y_j, y_k$  бетона, предварительно напряженной основной арматуры и дополнительной арматуры из углеродных волокон после усиления;

$\frac{1}{r_{ad}}$  – кривизна продольной оси сечения усиленной конструкции от нагрузки, примененной после усиления.

Распределение относительных деформаций и напряжений по высоте сечения, нормального к продольной оси плиты, после усиления приведено на рисунке 5.

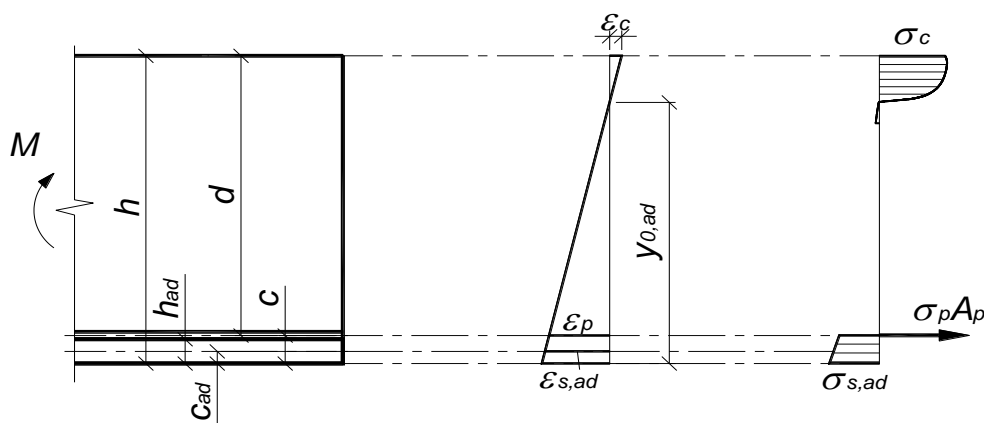


Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций и напряжений в поперечном сечении плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон клееванием в пазы

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния бетона и арматуры на участке между трещинами применяли блочную расчетную модель [13]. Согласно блочной модели, представляющей изгибаемый железобетонный элемент на участке с трещи-

нами, нормальными к продольной оси элемента, совокупностью блоков, разделенных трещинами, совместная работа основной и дополнительной арматуры с бетоном растянутой зоны соответствует законам сцепления. Закон сцепления основной стержневой арматуры с бетоном, определяющий значение напряжения сцепления  $\tau_b$  между арматурным стержнем и окружающим бетоном в зависимости от величины их взаимного смещения  $s_b$ , принимали в соответствии с [14]. Механизм сцепления с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, вклеенной в вертикальные пазы, описывали нормальным законом [15] (рисунок 6).

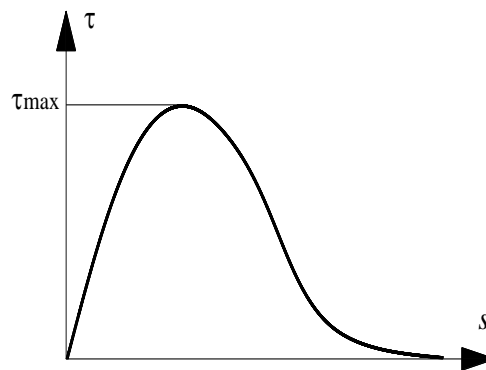


Рисунок 6. – Нормальный закон сцепления

Максимальные касательные напряжения определяли как функцию прочностных характеристик бетона

$$\tau_{max} = \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}. \quad (4)$$

Распределение относительных деформаций бетона растянутой зоны и приведенной арматуры по длине блока описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} S_{s,red} = \varepsilon_{s,red}(\sigma_p, \sigma_{s,ad}) - \varepsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_p A_p - \sigma_{s,ad} A_{s,ad}}{A_{c,eff}} \right) \\ \frac{d}{dx} \sigma_p = \frac{4}{\phi} \cdot \tau_b(s_b) \\ \frac{d}{dx} \sigma_{s,ad} = \frac{A_{s,ad} \tau_{ad}(s_{ad})}{u_{s,ad}} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $N$  – суммарное усилие в растянутом бетоне, основной и дополнительной арматуре, значение которого постоянно во всех сечениях по длине блока для каждого нагружения.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, определяли как сумму взаимных смещений приведенной арматуры и бетона на уровне центра тяжести основной арматуры по длине зон сдвигов слева  $l_{t(l)}$  и справа  $l_{t(r)}$  от трещины (рисунок 7) аналогично [13]

$$w = \int_{-l_{t(l)}}^{l_{t(r)}} s(x) dx = \int_{-l_{t(l)}}^{l_{t(r)}} [\varepsilon_{s,red}(x) - \varepsilon_{ct}(x)] dx. \quad (6)$$

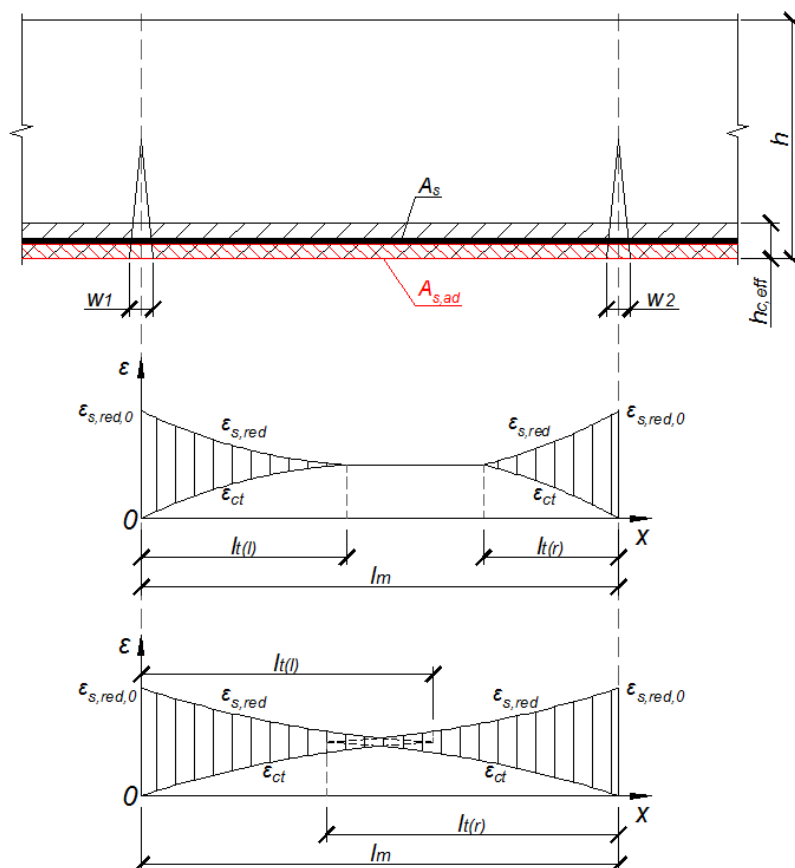


Рисунок 7. – Распределение относительных деформаций бетона и арматуры по длине железобетонного блока изгибаемого элемента, усиленного композитным материалом, вклеенным в предварительно выполненные вертикальные пазы: а – на первой стадии трещинообразования; б – на второй стадия трещинообразования

Сравнение экспериментальных значений изгибающего момента, соответствующего прочности плиты, и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки с расчетными значениями, определенными по деформационной и блочным моделям, приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Сопоставление экспериментальных и расчетных значений изгибающего момента, соответствующего прочности плиты, и ширины раскрытия трещин для опытной плиты

Шифр опытной плиты	$M_{exp}$ , кНМ	$M_{calc}$ , кНМ	$\frac{M_{exp}}{M_{calc}}$	$M_{экспл.}$ , кНМ	$w_{exp}$ , мм	$w_{calc}$ , мм	$\frac{w_{exp}}{w_{calc}}$
П-6	72.9	69.7	1.05	53.1	0.523	0.539	0.97

Получена удовлетворительная сходимость результатов эксперимента с расчетными значениями прочности и ширины раскрытия трещины.

**Заключение.** На основе общей деформационной и блочной моделей предложена обобщенная методика расчета основных параметров изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов, усиленных композитным материалом, вклеенным в предварительно подготовленные пазы.

Предложенная методика расчета основных параметров изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов, усиленных композитным материалом, включает в себя суммирование относительных деформаций элементарных площадок бетона, предварительно напряженной арматуры и композитного материала на трех этапах жизненного цикла изгибаемого железобетонного элемента: упругое обжатие бетона с потерей предварительного напряжения при отпуске арматуры; постоянные и временные воздействия при усилении композитным материалом; постоянные и временные воздействия после усиления.

Произведена экспериментальная верификация предложенной методики расчета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Информационные материалы фирмы Sika [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sika.com.au>; <http://sika.ru>. – Дата доступа: 08.12.2011.
2. Bonding of CarboDur CFRP plates under oscillating load Static testing of prestressed narrow slabs strengthening with CarboDur CFRP Plate systems // Report No.418'931E/1. – Zürich, 2002. – 14 p.
3. Sika CarboDur Structural Strengthening Systems. Fatigua and Failure Test beams B1 and B2 // Report No.402'017E/2. – Zürich, 1999. – 15 p.
4. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures : Fib Bulletin 14. – Switzerland, 2001. – 130 p.
5. Kotynia R. FRP composites for flexural strengthening of concrete structures: Theory, testing, design / R. Kotynia. – Lodz, 2019. – 240 p.
6. Шилин А.А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин и др. – М.: ОАО "Издательство "Стройиздат", 2007. – 184 с.
7. Blaschko M. Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits / M. Blaschko, K. Zilch // In Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials. – Paris, 1999, July 5-9.
8. FRP reinforcement in RC structures : Fib Bulletin 40. – Switzerland, 2007. – 147 p.
9. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures / Reported by ACI Committee 440 : ACI440.2R-17, 2017. – 110 p.
10. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ : СТО 38276489.001-2017. – Москва, ООО "НЦК", 2017. – 125 с.
11. Пособие по усилению железобетонных конструкций с использованием композитных материалов / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – Москва, 2017. – 226 с.
12. Бадалова Е.Н. Усиление железобетонных многопустотных плит перекрытий приклеиванием арматуры из углеродных волокон : дис. ... канд. техн. наук / Е.Н. Бадалова. – Новополюцк, 2013. – 140 с.
13. Лазовский Д.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне внешним армированием композитными материалами под нагрузкой / Д.Н. Лазовский, С.Н. Леонович, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – №2(131). – С. 9-19.
14. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2022. – 236 с.
15. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность / М.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.