

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2018, №2, Том 5 / 2018, No 2, Vol 5 <https://t-s.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS218 (<http://dx.doi.org/10.15862/02SATS218>)

Статья поступила в редакцию 20.03.2018; опубликована 14.05.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Бережной Д.В., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02SATS218

For citation:

Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Berezhnoi D.V., Umarov B.Sh., Volter A.R. (2018). Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/02SATS218

УДК 624.04

Пискунов Александр Алексеевич

Министерство транспорта РФ, Москва, Россия
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: a.piskunov52@mail.ru

Зиннуров Тагир Альмирович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: leongar@mail.ru

Бережной Дмитрий Валерьевич

ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: berezhnoi.dmitri@mail.ru

Умаров Булат Шавкатович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия
Аспирант
E-mail: bulat.umar@gmail.com

Вольтер Александр Рудольфович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», Казань, Россия
Аспирант
E-mail: voltermail@mail.ru

**О результатах экспериментального и численного
исследований напряженно-деформированного состояния
бетонных конструкций, армированных предварительно
напряженными полимеркомпозитными стержнями**

Аннотация. В рамках работы проведены экспериментальные и численные исследования с целью оценки напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитной арматурой. Для сравнения и анализа результатов эксперимента были построены две расчетные модели в ПК «ЛИРА-САПР» и ППП «ANSYS». Численная модель предварительно напряженной балки, созданная в ППП «ANSYS» получила хорошую согласованность с результатами испытания балок, отклонения составляют не более 5 процентов. Однако, полученная модель требует доработки для более точного описания процесса деформирования. Так как в процессе деформирования армированной стеклопластиковыми стержнями конструкции, неизбежно происходит частичное проскальзывание арматуры внутри бетона, особенно это явление характерно для концевых участков балок. Поэтому необходимо учесть контактное взаимодействие между арматурой и бетоном, а величину усилий разрыва связей между ними определить из численного эксперимента, сравнивая полученные результаты с экспериментальными данными.

Результаты исследовательской работы показали, что предварительное натяжение стержней из полимеркомпозита снижает деформативность балок, путем уменьшения прогибов более чем в 4 раза. Бетонные конструкции, армированные предварительно напряженными стержнями из полимеркомпозита, могут успешно применяться в изгибаемых элементах мостовых и других сооружений при проведении соответствующего обоснования и расчетов. Исследования многих авторов показывают, что может обеспечиваться нормальная эксплуатация конструкции за счет положительных качеств, которыми обладает полимеркомпозитная арматура: коррозионная стойкостью, отсутствие электропроводности, высокая осевая прочностью на растяжение, не высокий удельный вес.

Ключевые слова: полимеркомпозитная арматура; бетонные конструкции; изгибаемые элементы; предварительное натяжение; разрушение; испытание; численное моделирование

Введение

В последнее время объем производства полимеркомпозитной арматуры увеличился, она стала доступной для строительства объектов, однако в строительной практике, особенно в ответственных конструкциях, работающих на растяжение, изгиб и другие сложные воздействия на конструктивные элементы широкого распространения не получила.

Вместе с тем, все больше инженеров-проектировщиков и строителей проявляют интерес к использованию полимеркомпозитной арматуры, который определен ее положительными свойствами, а именно: коррозионной стойкостью, отсутствием электропроводности, высокой осевой прочностью на растяжение и малым удельным весом, что позволяет применять бетонные конструкции в тех областях, где применение стали конструктивно ограничивается [1, 2].

Основной недостаток полимеркомпозитной арматуры – низкий модуль упругости (50-60 ГПа), он ближе к бетону, чем к стали, что ведет к значительным деформациям и трещинообразованию бетонных конструкций. Медленное включение полимеркомпозитной арматуры в работу, и связанные с этим большие деформации бетонных конструкций, некоторые авторы связывают со слабой адгезией между бетоном и полимеркомпозитной арматурой, что, несомненно, влияет на несущую способность конструкций [3-6]. Взаимодействие бетона и арматуры, как единого целого происходит за счёт трёх факторов [3]: механического зацепления арматуры за бетон, при наличии неровностей на поверхности арматуры, трения между бетоном и арматурой, на уровне молекулярного взаимодействия (когезии). Как отмечают ряд авторов, механическое зацепление полимеркомпозитной арматуры за бетон в настоящее время является менее надежным способом, хотя на сегодняшний день существует десяток модификаций

обмотки и поверхностной обработки, которые обеспечивают сверхнормативные показатели адгезии [5, 7]. Но проблема высокой деформативности полимеркомпозитной арматуры, как неоднородного и структурно сложного материала сохраняется.

Одним из возможных способов решения проблемы является применение предварительно-напряженного полимеркомпозитного армирования бетонных конструкций. Этот способ повышения жесткости изгибаемых элементов известен с 1936 г., широко применяется для натяжения рабочих стержней из высокопрочных сталей.

Сложность технологического процесса натяжения полимеркомпозитной арматуры – в передаче усилия с домкрата на арматуру без потерь и проскальзывания. Этот вопрос авторами данной работы был подробно изучен и рассмотрен в отдельной статье [6].

Отметим также, что вопросы применения полимерных композитных материалов в транспортном строительстве и связанные с этим проблемы обсуждаются в работах [8-18].

В данной работе приводятся результаты численного и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и характер разрушения конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями, что представляет для проектировщиков и строителей практический интерес.

1. Экспериментальные исследования

В рамках эксперимента проводились испытания на воздействие вертикальной статической нагрузки, приводящей к изгибу опытных образцов в виде балок и плит.

На первом этапе в качестве опытных образцов были изготовлены бетонные балки размерами 0.12x0.2x1.8 м со стеклопластиковой (СПА) предварительно напряженной арматурой, покрытой песком ("опесчаненная"). Балки изготовлены из бетона В25 и В30 с одиночным армированием: нижняя зона – предварительно напряжённое рабочее армирование – Ø6 СПА, верхняя зона – конструктивное армирование – Ø4 СПА. Натяжение стержня осуществлялось с помощью специальной установки, оснащенной домкратом с динамометром. Испытания балок производилось по ГОСТ 10180-2012. Образцы одним концом опирались на шарнирно-неподвижную опору, другим концом на шарнирно-подвижную опору (рис. 1, рис. 2а).

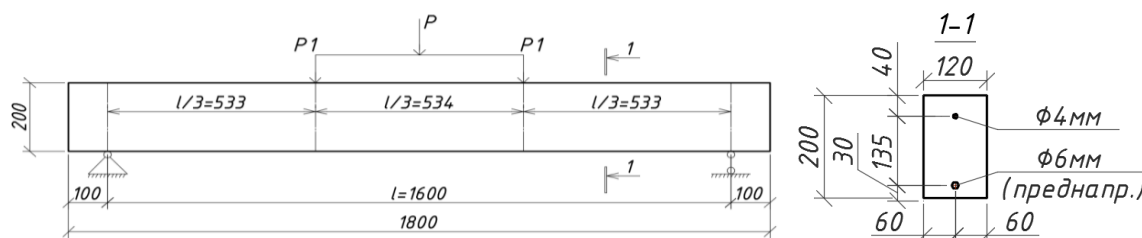


Рисунок 1. Схема опирания и нагружения испытываемых балок (рисунок авторов)

В период проведения испытаний одновременно измерялись три параметра: P (нагрузка, кН); f (прогиб, мм); Δl (ширина раскрытия трещин, мм). Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей «Нагрузка P – Прогиб f » (рис. 3) и «Нагрузка P – Ширина раскрытия трещин Δl » (рис. 4) по средним значениям, полученным при испытании пяти образцов.

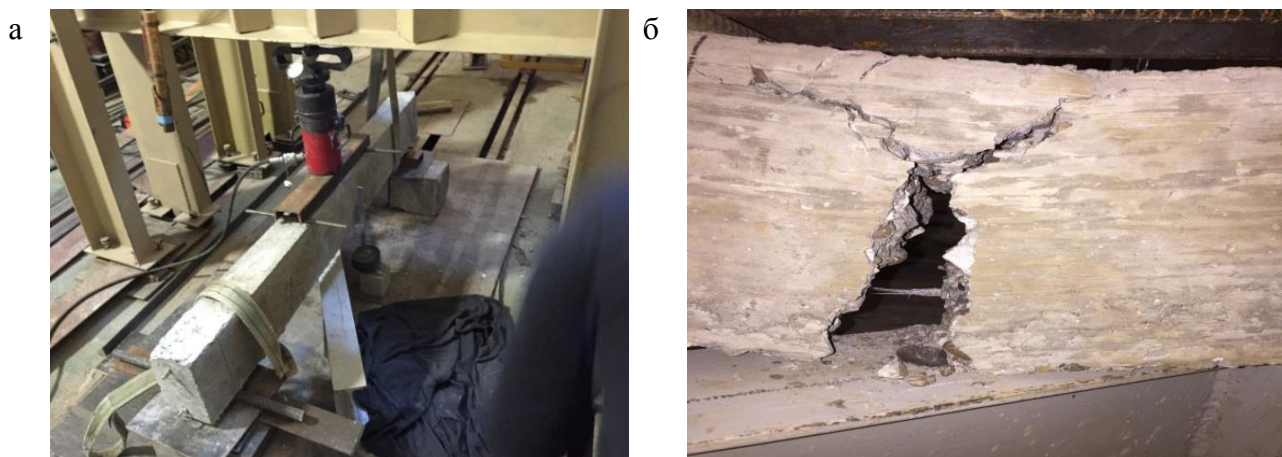


Рисунок 2. Испытание опытных балок: а) схема нагружения опытной балки; б) характер разрушения балки (рисунок авторов)

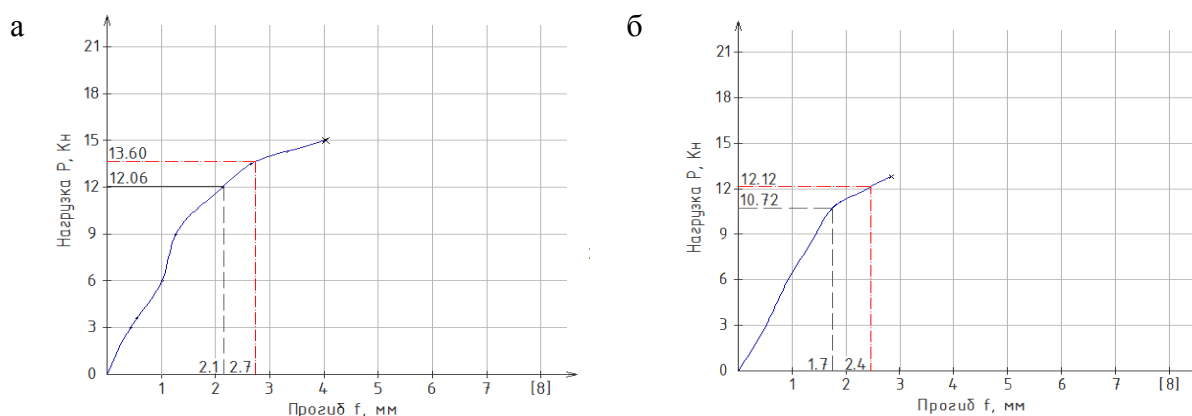


Рисунок 3. Графические зависимости средних значений «Нагрузка P – Прогиб f » для балок из бетона класса: а) В30; б) В25 (рисунок авторов)

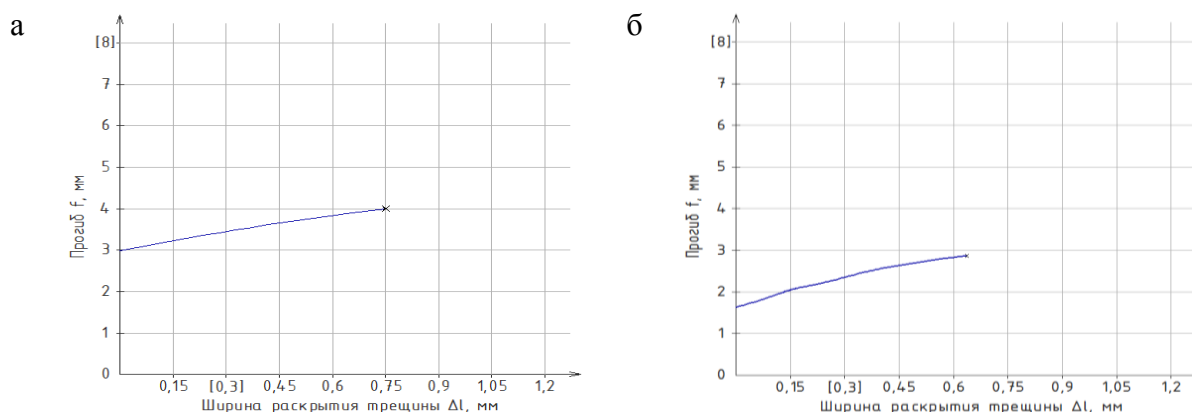


Рисунок 4. Графические зависимости средних значений «Прогиб f – Ширина раскрытия трещин Δl » для балок из бетона класса: а) В30; б) В25 (рисунок авторов)

Разрушение балок из бетона класса В30 происходит при нагрузке 15 кН, при этом прогиб балки равен $f = 4$ мм, что относительно длины пролета балки составляет величину равную $(1/400)l$, где l – длина пролета балки.

Для балок из бетона класса В25 разрушающая нагрузка составляет 12 кН, что на 14.7 процентов меньше, чем для балок из бетона классом выше. Прогиб в середине пролета составил 2.8 мм, это около $(1/570)l$, где l – длина пролета балки. Разрушение балок происходит преимущественно по линии действия нагрузок в виде образования наклонной трещины в

нижней зоне балки с последующим хрупким разрушением предварительно напряженного стержня (рис. 2б). В процессе экспериментов наблюдалось разрушение балок и по нормальной трещине в зоне чистого изгиба, причем в этих случаях предельная нагрузка при разрушении балок увеличивалась в среднем на 18 процентов.

Если провести сравнительный анализ с результатами исследований работы изгибаемых бетонных балок, армированных полимеркомпозитной арматурой, полученных другими авторами [19-23], то балки без предварительного напряжения арматуры при воздействии нагрузки отличаются высокой деформативностью, величина максимального прогиба составляла 1/38-1/64 от расчетного пролета исследуемых балок, раскрытие трещин при этом достигало 1.1-1.7 мм.

При разрушении опытных образцов балок с предварительно напряженной полимеркомпозитной арматурой относительный прогиб не превысил нормативную величину $(1/400)l$, но при этом величина раскрытия трещин превышала 0.4 мм, что не влияет на коррозионную стойкость элементов, армированных полимеркомпозитной арматурой.

Сравнение несущей способности можно произвести по показателю, M_{ult}/l – относительному разрушающему моменту, а трещиностойкость по M_{crc}/l – относительному моменту образования трещин, результаты занесены в таблицу 1.

Результаты испытаний показывают, что несущая способность элементов напрямую зависит от количества и диаметра полимеркомпозитной арматуры, величина $M_{ult}/l = 2.57$ для предварительно напряженных балок, для балок без натяжения 5.529, величина в два раза больше за счет того, что в растянутой зоне использовалось два стержня Ø6.

Относительный момент образования трещин M_{crc}/l для балок с натяжением полимеркомпозитной арматуры равен 2.133, а без натяжения 0.645-1.94, то есть увеличение количество стержней в два раза, не снижает деформаций испытываемых балок, и не увеличивает относительный момент трещинообразования.

Таблица 1

Результаты исследования	Характеристики элемента	Показатель		
		$\frac{M_{crc}}{l}$	$\frac{M_{ult}}{l}$	$\frac{f_{max}}{l}$
Балки с предварительно напряженной арматурой	Пролет 1600 мм, одна арматура Ø6 (СПА), класс бетона В25	2.133	2.57	1/570
Балки без предварительно напряженной арматуры	Пролет 900 мм, одна арматура Ø6 (СПА), класс бетона В20 [9]	0.635	1.505	1/64
	Пролет 1700 мм, две арматуры Ø6 (СПА), класс бетона В25 [8]	1.94	5.529	1/38

Составлена авторами

В процессе исследований было проведено испытание плиты размерами 0.2x0.68x1.8 м, что соответствует суммарному сечению 5 балок. Армирование плиты производилось аналогичными стержнями, в нижней зоне предварительно напряжённое рабочее армирование с шагом 135 мм 5Ø6 СПА, верхняя зона – конструктивное армирование с шагом 135 мм – 5Ø6 СПА (рис. 5а). Испытания плиты проводились аналогично испытаниям балок. Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей «Нагрузка P – Прогиб f ».

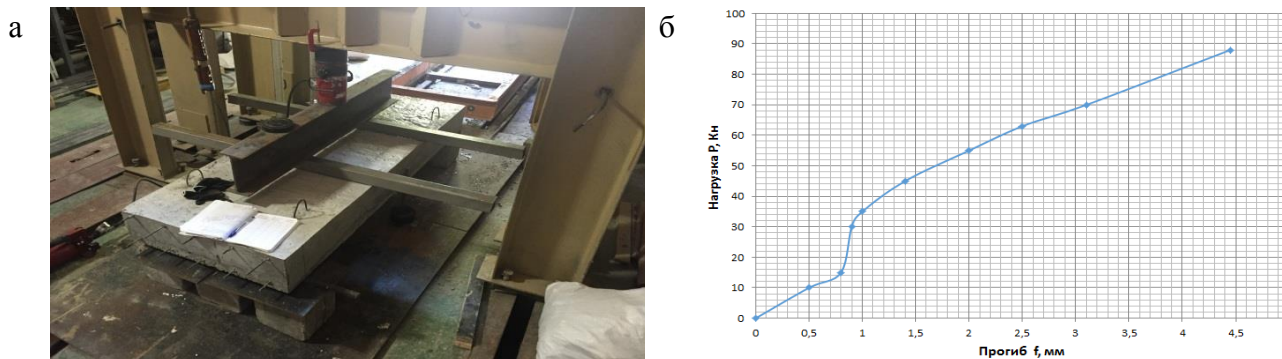


Рисунок 5. Испытание опытной плиты: а) схема нагружения опытной плиты; б) графическая зависимость «Нагрузка P – Прогиб f » (рисунок авторов)

Из графика (рис. 5б) видно, что разрушение плиты происходит при нагрузке $P = 88$ кН, что на 14.7 % превышает суммарную разрушающую нагрузку пяти балок, что говорит о перераспределении усилий в плите под нагрузкой. Деформации в середине пролета остаются минимальными и незначительно превосходят показатель $(1/400) l$ при разрушении.

2. Численные исследования

Работоспособная и адекватная численная модель совместной работы бетона с предварительно напряженной полимеркомпозитной арматурой (СПА) на основе конечных элементов, требует сравнения и анализа с эмпирическими данными, полученными в результате эксперимента. Сопоставление результатов расчета с использованием численной модели с экспериментом поможет оценить и вывести некоторые расчетные характеристики, а также даст возможность формировать более сложные модели с предварительно-напряженным армированием для применения в различных конструкциях. Известно множество моделей сцепления бетона и арматуры [3] и формирования сетки конечных элементов, способы создания предварительных усилий в стержневых элементах, формы описания нелинейности материалов, всем этим можно воспользоваться для математического описания процесса деформирования предварительно напряженной балки.

Можно отметить некоторые работы авторов, в которых на основе конечно-элементных моделей реализуются процессы деформирования железобетонных конструкций в рамках линейной [24] и нелинейной моделей [25, 26] арматуры, в том числе и в рамках контактного взаимодействия элементов конструкции между собой и с окружающим их грунтом [25-27].

Существуют ограничения, которые имеются при применении программных комплексов численного моделирования: ANSYS, Nastran, ABAQUS, Midas, ЛИРА-САПР и других, влияющие на результаты расчета, поэтому было сформированы две модели в программе ЛИРА-САПР 2016 и ANSYS 14.0 [28]. Начальными характеристиками модели являются геометрические параметры опытных образцов, физические характеристики материалов описываются кусочно-линейными зависимостями в соответствии с СП 63.13330.2012.

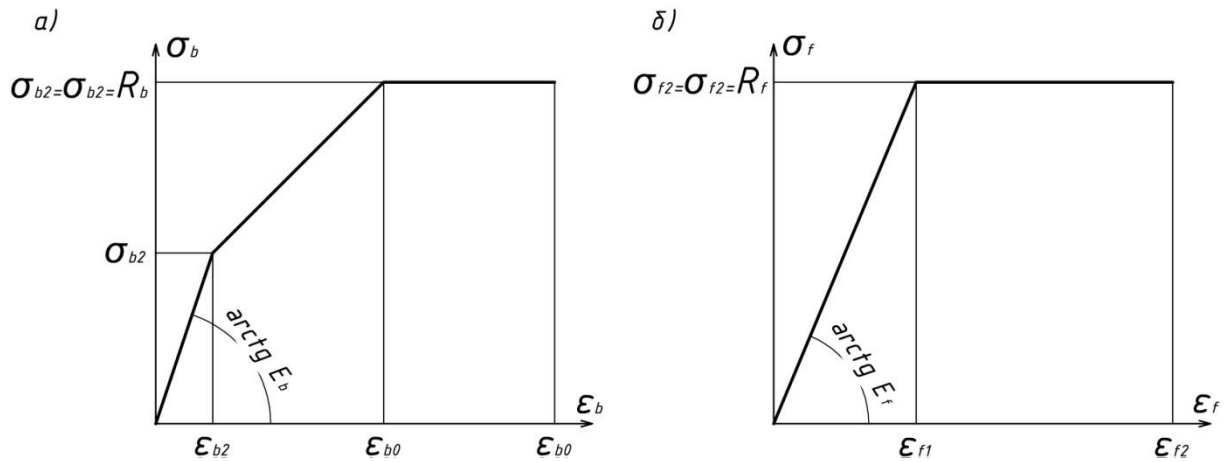


Рисунок 6. Зависимости напряжения от деформаций:

а) для бетона, б) для полимеркомпозитной арматуры (рисунок авторов)

График зависимости строится по точкам с координатами для бетона:

$\sigma_{b1} = 0,6R_b = 10.2$ МПа, $\epsilon_{b1} = 0,000313$; $\sigma_{b2} = R_b = 17$ МПа, $\epsilon_{b0} = 0,002$; $\epsilon_{b2} = 0,0035$; для арматуры: $R_f = 1000$ МПа, $\epsilon_{f0} = 0.02$, при $\epsilon_{f0} \leq \epsilon_f \leq \epsilon_{f2}$ зависимость не учитывается [28]. Начальное натяжение стрежня арматуры принято равным $\sigma_{sp} = 500$ МПа.

В программе ЛИРА-САПР 2016 пространственная конечно-элементная модель балки создана из объёмных и стержневых (ферменных) конечных элементов (далее КЭ). Объёмными элементами моделировался бетон, стержневыми – арматура. Расчёт произведён с учётом физической нелинейности бетона шаговым методом. Для моделирования бетона использовались физически нелинейные универсальные пространственные 8-узловые изопараметрические КЭ №236; 21 – экспоненциальный закон деформирования (нормативная прочность). Арматура моделировалась с использованием физически нелинейных специальных двухузловых КЭ предварительного натяжения №208.

Результаты численного моделирования значительно расходятся с экспериментом. Как видно из рисунка 7, объёмные конечные элементы бетона не выключаются из работы при достижении расчетных характеристик, что препятствует полноценной работе стержневых элементов.

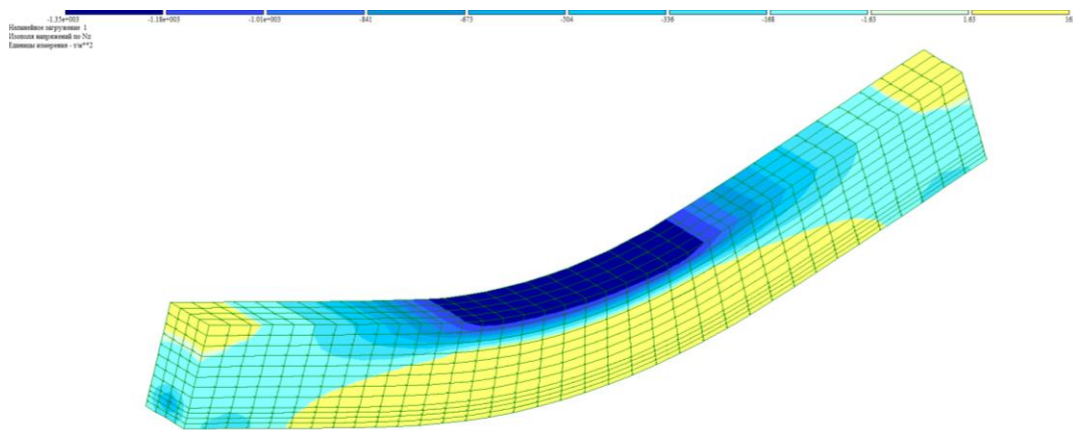


Рисунок 7. Изополя нормальных напряжений в бетоне в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016 (рисунок авторов)

Создание КЭ модели в программе ANSYS 14.0 проводилось аналогично: для моделирования бетона использовался трехмерный элемент Solid65, специально предназначенный для дискретизации армированных конструкций; арматура моделировалась

одномерным элементом фермы Link180 [29]. Предварительное натяжение в нижнем стержне задавалось путем его фиктивного охлаждения, реализующего напряжение растяжения 500 МПа. Предполагалось, что в бетоне осевое напряжение растяжения для образования трещины при одноосном напряженном состоянии равно 3 МПа, а коэффициент передачи касательных напряжений для трещины – 0.45.

Можно отметить, что для расчета армированных конструкций с учетом трещинообразования в бетоне ППП «ANSYS» уже не раз использовался, и в некоторых работах были даны некоторые рекомендации по его применению [29]. Однако, как показали численные эксперименты, использование предложенных в ППП «ANSYS» параметров расчета, а особенно рекомендуемое значение параметра невязки «Tol», дает хорошие результаты при описании деформирования армированной конструкции только на достаточно длительном этапе нагружения в случае использования в ней не предварительно напряженных стальных арматурных стержней. При использовании же композитной арматуры эксперимент показывает, что ее разрушение после возникновения основной трещины происходит почти мгновенно. Поэтому для используемой в работе расчетной схемы использовались стандартные параметры сходимости ППП «ANSYS».

Расчёт произведён шаговым методом, причем на «нулевом» шаге моделируется «натяжение» нижнего стержня. Дальнейшее нагружение моделируется с шагом по поперечной нагрузке 1 КН. Исходя из симметрии задачи, моделировалась лишь одна четвертая часть балки (рис. 8): рассматривалась симметрия по центральному поперечному сечению и по продольному вертикальному сечению. В этом случае можно было наблюдать напряженное состояние в зоне расположения стержней арматуры.

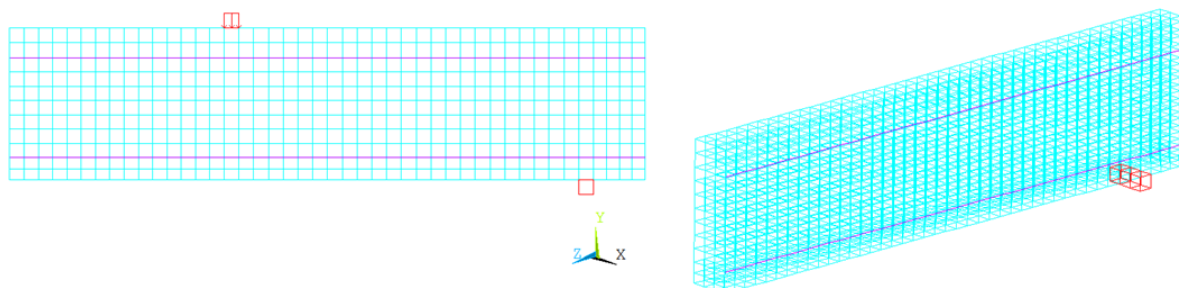


Рисунок 8. Схема дискретизации балки и схема расчета в программном комплексе ANSYS 14.0 (рисунок авторов)

Результаты численного моделирования показывают следующее напряженно-деформированное состояние балки. Процесс трещинообразования в балке продемонстрирован ниже:

- на рисунке 9а – этап «нулевого» шага нагружения, где происходит натяжение нижнего стержня;
- на рисунке 9б – для 14-го шага нагружения, достигнутая нагрузка 14 КН;
- на рисунке 9в – для 18-го шага нагружения, достигнутая поперечная нагрузка 18 КН.

Распределение нормальных напряжений для аналогичных случаев показано на рисунках 10а-10в.

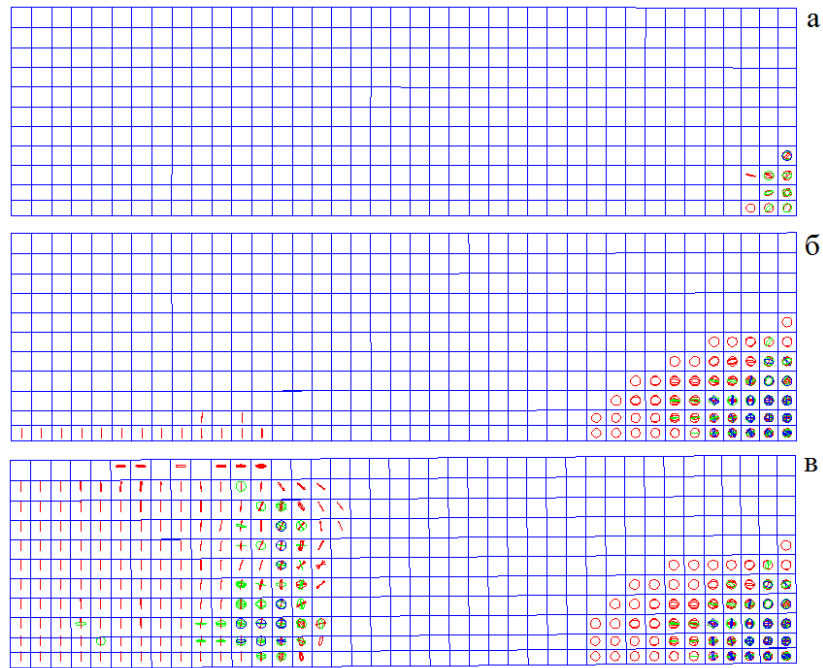


Рисунок 9. Расположение трещин в балке для различных вариантов нагружения (рисунок авторов)

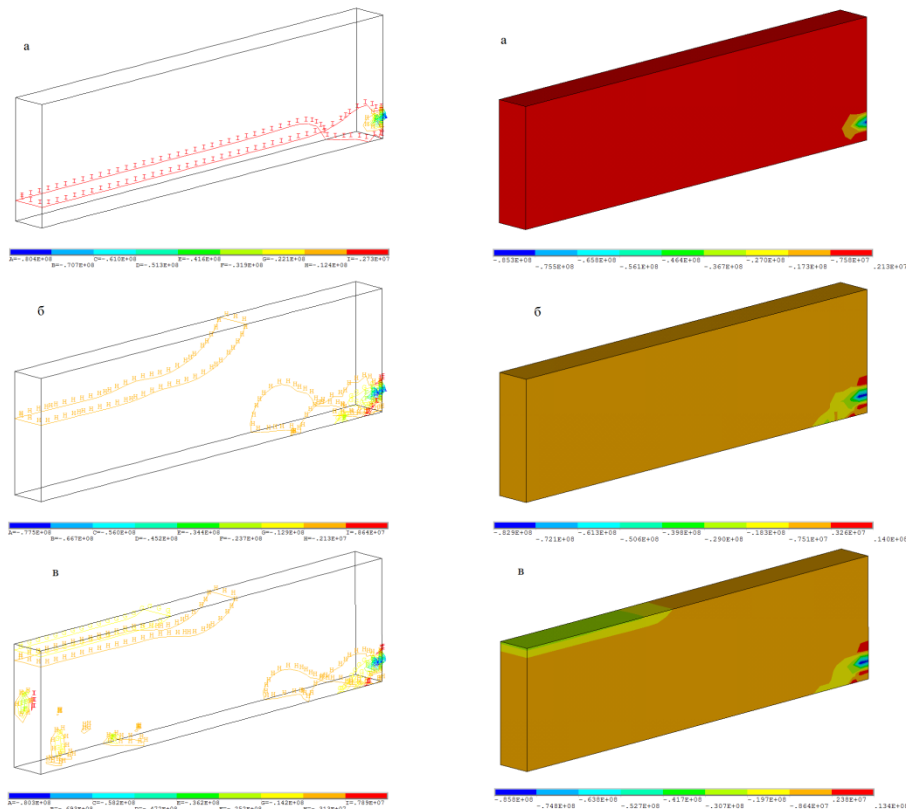


Рисунок 10. Изополя нормальных напряжений (рисунок авторов)

Необходимо отметить, что при численном моделировании предварительного напряжения нижнего стержня имеет место трещинообразование на торцах балки. При дальнейшем нагружении вертикальной нагрузкой до отметки 14 КН возникают первые трещины в нижней зоне средней части пролета балки, а при нагрузке 18 КН трещины распространяются по всей высоте балки и практически все усилия перераспределяется на

арматуру, которая разрушается при достижении нагрузки величины 28 КН. Зависимость изменения прогиба в центральном сечении балки от шагов нагружения приведена на рисунке 11.

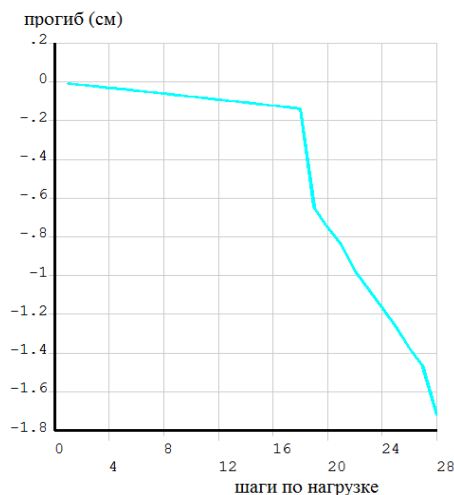


Рисунок 11. График зависимости «Нагрузка P – Прогиб f » при численном моделировании в ППП «ANSYS» (рисунок авторов)

Отметим, что картина трещинообразования, полученная численным моделированием, очень схожа с той, которую получили при испытании балок, однако, реальная разрушающая нагрузка составляет величину порядка 12 КН, поэтому имеется возможность скорректировать расчетную схему, что позволит снизить уровень разрушающей нагрузки. Во-первых, действующие напряжения в преднапряженном стержне экспериментальной балки меньше, чем расчетные, что обуславливается некоторой релаксацией напряжений в работающей балке. Во-вторых, в зоне торца балки может происходить проскальзывание арматуры относительно бетона. В-третьих, разрушение преднапряженного стержня может произойти при более низкой нагрузке, а не при 1000 МПа. Варьируя эти три параметра в процессе проведения вычислительного эксперимента, можно получить зависимость максимального прогиба в середине пролета балки от величины приложенной нагрузки такую же, как на рисунке 3б. При начальном предварительном напряжении композитного стержня $\sigma_{sp} = 338$ МПа, длина участка нижнего предварительно – напряженного стержня (от торца балки), по которому происходит отрыв от бетона $L_f = 39.5$ см, напряжение, при котором разрывается нижний стержень $R_f = 694$ МПа. Зависимость изменения прогиба в центре балки от шагов нагружения для этого варианта расчета приведена на рисунке 12.

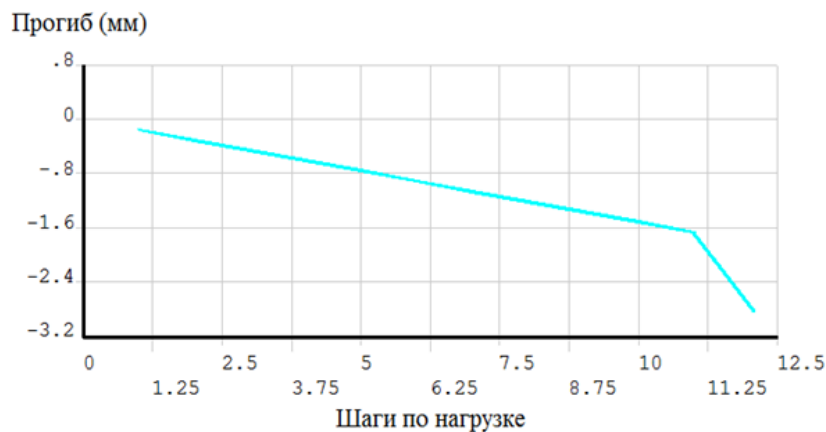


Рисунок 12. График зависимости «Нагрузка P – Прогиб f » при численном моделировании в ППП «ANSYS» (рисунок авторов)

При увеличении класса бетона до В30 совмещение графиков численного и экспериментального исследования происходит при начальном преднапряжении $\sigma_{sp} = 325$ МПа, длина участка нижнего преднапряженного стержня (от торца балки), по которому происходит отрыв от бетона $L_f = 37.9$ см, напряжение, при котором разрывается нижний стержень $R_f = 676$ МПа.

Заключение

1. Натяжение, как процесс предварительного деформирования арматуры, не повышает несущую способность балок, но снижает деформации конструкций, обеспечивая нормативные прогибы и увеличивая их трещиностойкость.

2. По результатам натурных испытаний выявлено, что предварительное натяжение стержней из полимеркомпозита снижает прогибы более чем в 4 раза. Бетонные конструкции, армированные предварительно напряженными стержнями из полимеркомпозита, могут успешно применяться в изгибаемых элементах мостовых и других сооружений, при этом обеспечивается нормальная эксплуатация.

3. По результатам сравнения экспериментальных и численных исследований, численная модель предварительно напряженной балки, созданная в ППП «ANSYS» хорошо описывает результаты испытаний, отличие составляет не более 5 процентов.

4. Численное исследование показывает, что в результате потерь при изготовлении балок начальное натяжение стержня снижается примерно на 35 процентов, деформации на торцах балок приводят к проскальзыванию стержней, а также к снижению усилия обжатия бетона в нижней зоне балки. При этом несущая способность стержня на осевое растяжение используется на 69 процентов.

5. Анализ численных результатов, полученных на основе ППП «ANSYS» в рамках предложенной схемы расчета, показывает, что использование подобного подхода для описания деформирования преднапряженной армированной бетонной конструкции позволяет получить приемлемые для технического расчета результаты, близкие к экспериментальным данным. Однако, для более точного описания процесса деформирования, необходимо несколько усложнить реализованную модель. В частности, так как в процессе деформирования армированной конструкции, особенно при ее изгибе, неизбежно происходит частичное проскальзывание пучков арматуры внутри бетона, необходимо учесть контактное взаимодействие между арматурой и бетоном, а величину усилий разрыва связей между ними определить из численного эксперимента, сравнивая полученные результаты с экспериментальными данными. Возможность построения такой уточненной модели деформирования армированных конструкций в ППП «ANSYS» имеется.

6. Технические решения по внедрению в строительство бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями, обладают коррозионной стойкостью, отсутствием электропроводности, высокой осевой прочностью на растяжение, снижением веса конструкции и могут применяться в строительных конструкциях после проведения соответствующего обоснования и расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт использования композитных полимерных материалов в мостостроении / Под ред. Ю.М. Митрофанова // Мостостроение мира, № 2, 2006. – 48 с.
2. Габрусенко В.В. Особенности проектирования конструкций из бетона с композитной арматурой // "Проектирование и строительство в Сибири" 6 (77), 2013 – 5 с.
3. Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Петропавловских О.К., Сафиюлина Л.Г., Яковлев Д.Г. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном // Наукоедение. Том 7, №4, 2015.
4. Гиздатуллин А.Р., Хусаинов Р.Р., Хозин В.Г., Красеникова Н.М. Прочность и деформативность бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитными стержнями // Инженерно-строительный журнал. 2016. №2(62). С. 32-41.
5. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р., Куклин А.Н., Пискунов А.А. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. №1 (23). С. 211-213.
6. Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Петропавловских О.К., Яруллин Р.Р., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р. Метод изготовления предварительно напряженных конструкций с композитным армированием и композитным фибробетоном // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №2 (2017) <http://t-s.today/PDF/05TS217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/05TS217.
7. Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Сафиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Яковлев Д.Г. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11TVN415.
8. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал «Наукоедение» 2012, № 4, <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN412.pdf>. – М. с. 1-22.
9. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения // Интернет-журнал «Наукоедение» 2012, № 4, <http://naukovedenie.ru/PDF/14TVN412.pdf>. – М. с. 1-37.
10. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Феоктистов С.А. Применение заполненных бетоном трубчатых конструкций из фиброармированных пластиков в транспортном строительстве: Часть 2. Отечественные исследования заполненных бетоном фибропластиковых арок и технология сооружения мостов с применением фибропластиковых арок // Интернет-журнал "Наукоедение" № 4(23), 2014. июль-август. с. 1-34. Идентификационный номер статьи в журнале 103TVN414.
11. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных

- материалов. Часть 3. Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/27TVN515.
12. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
 13. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 2. Влияние температуры // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
 14. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С., Мандрик-Котов Б.Б. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 3. Влияние циклического нагружения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. Стр. 1-21.
 15. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №6 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
 16. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1 // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. с. 1-25.
 17. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С. Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 2 // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. с. 1-25.
 18. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С. Моделирование поведения пластинчатых конструкций из армированного бетона с неметаллической арматурой // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/105TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. с. 1-22.
 19. Бенин А., Семенов С., Богданова Е. Экспериментальные исследования бетонных балок, армированных различными типами нагружения // МАТЕС Веб конференция 53, 01047 (2016). – 4 с.

20. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальное исследование изгибаемых элементов с полимер композитной арматурой // Известия КГАСУ, 2014, № 3 (29). – С. 7-13.
21. Селяев В.П., Соловьев А.А., Парамонов Р.Н., Алимов М.Ф., Шабаетв И.Н. Работа балок армированных композитной стеклопластиковой арматурой // Региональная архитектура и строительство, 2013, №3, – С. 67-73.
22. Баррис С., Торрес Л., Комас Дж., Миас С. Трещинообразование и деформации балок армированных АСК: экспериментальное исследование // Композиты Часть В, 2013, №55. – С. 580-590.
23. Тонтанджи Х., Саффи М. Поведение изгибаемых бетонных балок, армированных стеклопластиковой арматурой (СПКА) // Строительный журнал АСІ, Том 97, №5, Сентябрь – Октябрь 2000. С. 712-719.
24. Бережной Д.В., Голованов А.И., Паймушин В.Н., Пискунов А.А. Расчет напряженно-деформированного и предельного состояний железобетонных конструкций, взаимодействующих с грунтовым основанием // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 63. – Н. Новгород, 2001. – с. 170-179.
25. Бережной Д.В., Балафетдинова И.С., Сатченков А.А., Секаева Л.Р. Моделирование деформаций подземных тоннельных обделок, взаимодействующих с водонасыщенной почвой // ИОР Серия конференций: Материаловедение и инженерия, 2016, Том. 158, 01 2018.
26. Бережной Д.В., Балафетдинова И.С., Сатченков А.А., Секаева Л.Р. Исследование деформации элементов трехмерных железобетонных конструкций, расположенных в почве, взаимодействующих друг с другом через резиновые прокладки // ИОР Серия конференций: Материаловедение и инженерия, 2016, Том. 204, 01 2005.
27. Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К. Моделирование деформирования обделки тоннеля метрополитена, расположенной в грунте, с учетом контактного взаимодействия // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 289-293.
28. Ал-Сунна Р., Пилакоутас К., Хадирасолиха И., Гуанданджини М. Деформационные свойства бетонных балок и плит, армированных АКП: экспериментальное исследование // Композиты Часть В: Строительство, 2012, № 43 (5). – 23 с.
29. Редикюльцев Е.А. Численное исследование поведения изгибаемых железобетонных элементов при помощи программного комплекса ANSYS // Академический вестник уралниипроект РААСН. 2009. №2. С. 81-87.

Piskunov Aleksander Alekseevic

The ministry of transport of the Russian Federation, Moscow, Russia
Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russia
E-mail: a.piskunov52@mail.ru

Zinnurov Tagir Almirovic

Kazan state university of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
E-mail: leongar@mail.ru

Berezhnoi Dmitrii Valer'evich

Kazan federal university, Kazan, Russia
E-mail: berezhnoi.dmitri@mail.ru

Umarov Bulat Shavkatovich

Kazan state university of architecture and engineering, Kazan, Russia
E-mail: bulat.umar@gmail.com

Volter Aleksandr Rudol'fovich

Kazan state university of architecture and engineering, Kazan, Russia
E-mail: voltermail@mail.ru

Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement

Abstract. Within the scope of research, experimental and numerical studies have been carried out to evaluate the stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement.

Results on experiments and of the numerical calculations has high reproducibility.

For comparison and analysis of the results of the experiment, two computational models were constructed in the "LIRA-CAD" and "ANSYS" software. The numerical model of the prestressed beam, created in the "ANSYS" software, obtained good consistency with the beam test results, deviations are no more than 5 percent. However, the model requires refinement for a more accurate description of the deformation process, because during the process of deformation of reinforcement a partial slippage of the reinforcement inside concrete occurs, especially this phenomenon is characteristic of the end sections of the beams. Therefore, it is necessary to take into account the contact interaction between the reinforcement and concrete, and the magnitude of the forces of breaking bonds between them is determined from the numerical experiment, comparing the results with the experimental data.

Results of the researches show that prestressing of polymer-composite reinforcement decreases the deformability of beams by reducing the deflections by more than 4 times. Concrete structures reinforced with pre-stressed polymer-composite reinforcement can be successfully used in flexural members of bridges or other structures in case of exact calculations. Results of researches made by other authors show that polymer reinforcement provides good exploitation of structures because of positive features of polymers such as oxidation resistance, absence of electrical conductivity, high axial tensile strength, low weight.

Keywords: polymer composite reinforcement; concrete structures; flexural members; pre-stressing; destruction; experiment; numerical simulation

REFERENCES

1. Mitrofanova Y.M. (2006). Experience of using composite polymeric materials in bridge building. *Mostostroenie mira*, 2, p. 48. (in Russian).
2. Gaburenko V.V. (2013). Features of designing of constructions from concrete with composite reinforcement. *Design and construction in Siberia*, 6(77), p. 5. (in Russian).
3. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Yakovlev D.G. (2015). Numerical modeling of bond composite reinforcement and concrete. *Naukovedenie*, 4(7). (in Russian).
4. Gizdatullin G.A., Khusainov R.R., Khozin V.G., Krasnikova N.M. (2016). Strength and deformability of concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars. *Magazine of Civil Engineering*, 2(62), pp. 32-41. (in Russian).
5. Khozin V.G., Piskunov A.A., Gizdatullin A.R., Kuklin A.N. (2013). Adhesion fiber-reinforced polymer bars with cement concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, 1(23), pp. 211-213. (in Russian).
6. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Petropavlovskikh O.K., Yarullin R.R., Umarov B.S., Volter A.R. (2017). Method for manufacturing prestressed structures with composite reinforcement and composite fiber-reinforced concrete. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(4). Available at: <http://t-s.today/PDF/05TS217.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/05TS217.
7. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Yakovlev D.G. (2015). Numerical simulation of the adhesion of composite reinforcement to concrete. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/11TVN415.
8. Ovchinnikov I.G., Valiev S.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Umirov A.D. (2012). Use the composites for strengthening reinforced concrete: 1. Experimental studies of the composites strengthening for flexural reinforced concrete structures. *Naukovedenie*, [online] 4, pp. 1-22. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN412.pdf> (in Russian).
9. Ovchinnikov I.G., Valiev S.N., Ovchinnikov I.I., Zinoviev V.S., Umirov A.D. (2012). Use the composites for strengthening reinforced concrete: 2. Field investigations of reinforced concrete strengthened composites, problems and solutions. *Naukovedenie*, [online] 4, pp. 1-37. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/14TVN412.pdf> (in Russian).
10. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Chesnokov G.V., Feoktistov S.A. (2014). Application of concrete filled tubular structures of fiber reinforced plastic in transport construction: Part 1. Domestic research concrete filled fiber reinforced plastic arches and technology construction of bridges using fiber reinforced plastic arches. *Naukovedenie*, 4(23), pp. 1-34. (in Russian).
11. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. (2015). About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 3. Experience of using fiber reinforcement plastic in bridge construction. *Naukovedenie*, [online] 5(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf> (in Russian). DOI 10.15862/27TVN515.
12. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. (2016). Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by

- polymer composite materials. Part 1. Native experiments under static load. *Naukovedenie*, [online] 3(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf> (in Russian).
13. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. (2016). Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by polymer composite materials. Part 2. Study of the effect of temperature. *Naukovedenie*, [online] 4(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (in Russian).
 14. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S., Mandrik-Kotov B.B. (2016). Analysis of experimental studies on strengthening of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 3. Influence of cyclic loading. *Naukovedenie*, [online] 5(8), pp. 1-21. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN516.pdf> (in Russian).
 15. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. (2016). Problems of application of polymeric composite materials in transport construction. *Naukovedenie*, [online] 6(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (in Russian).
 16. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. (2017). Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 1. *Naukovedenie*, [online] 1(9), pp. 1-25. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (in Russian).
 17. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. (2017). Systematization and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composites in transport construction. Part 2. *Naukovedenie*, [online] 1(9), pp. 1-25. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN117.pdf> (in Russian).
 18. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Ilchenko E.D., Mikhaldykin E.S. (2017). Modeling the behavior of plate structures made of reinforced concrete with a non-metallic reinforcement. *Naukovedenie*, [online] 2(9), pp. 1-22. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/105TVN217.pdf> (in Russian).
 19. Benin A., Semenov S., Bogdanova E. (2016). Experimental studies of concrete beams reinforced with different types of loading. *MATEC WEB OF CONFERENCES*, 53, p. 4. (in Russian).
 20. Antakov A.B., Antakov I.A. (2014). Experimental studies of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, 3(29), pp. 7-13. (in Russian).
 21. Selyaev V.P., Solovyov A.A., Paramonov R.N., Alimov M.F., Shabaev I.N. (2013). The work of beams reinforced with composite fiberglass reinforcement. *Regional architecture and engineering*, 3, pp. 67-73. (in Russian).
 22. Barris C., Torres L., Comas J., Mias C. (2013). Cracking and deformation of beams reinforced with glass-fiber reinforcement: experimental research. *Composites Part B*, 55, pp. 580-590. (in Russian).
 23. Toutanji H., Saafi M. (2000). Behavior of bent concrete beams reinforced with fiberglass reinforcement. *Construction magazine ACI*, 5(97), pp. 712-719. (in Russian).
 24. Berezhnoi D.V., Golovanov A.I., Paimushin V.N., Piskunov A.A. (2001). Calculation of the stress-strain and limiting states of reinforced concrete structures interacting with the ground base. *Problems of strength and plasticity*, 63, pp. 170-179. (in Russian).

25. Berezhnoi D.V., Balafendieva I.S., Sachenkov A.A., Sekaeva L.R. (2016). Modelling of deformation of underground tunnel lining, interacting with water-saturated soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 158. (in Russian).
26. Berezhnoi D.V., Balafendieva I.S., Sachenkov A.A., Sekaeva L.R. (2017). Investigation of deformation of elements of three-dimensional reinforced concrete structures located in the soil, interacting with each other through rubber gaskets. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 204. (in Russian).
27. Berezhnoi D.V., Sagdatullin M.K. (2014). Modeling the deformation of the lining of a subway tunnel located in the ground, taking into account the contact interaction. *Newsletter of Kazan National Research University*, 15(17), pp. 289-293. (in Russian).
28. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. (2012). Deformation properties of concrete beams and slabs reinforced with FRP: experimental research. *Composites Part B: Construction*, 43(5), p. 23. (in Russian).
29. Redikultsev E.A. (2009). Numerical research of behavior of ferro-concrete elements by means of program complex ANSYS. *Akademicheskij vestnik uralniiproekt RAASN*, 2, pp. 81-87. (in Russian).