

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38

Смоляго Г.А., \*Обернихина Я.Л.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

## ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ

**Аннотация.** Усиление железобетонных изгибаемых элементов полимеркомпозитными материалами нашло широкое применение в современном строительстве. В связи с этим представляется, что анализ проведенных экспериментальных исследований прочности, деформативности таких конструкций является актуальным. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном. А именно, шести балок трех серий. Первая серия балок - эталонные не усиленные образцы. Вторая серия балок включала в себя образцы, нагруженные нагрузкой, соответствующей нормативной, т.е. при наличии пластических деформаций, трещин и прогибов, затем усиленные углеволокном после разгрузки, путем приклеивания его к растянутой зоне с U-образной анкерровкой на приопорных участках. К третьей серии балок относились образцы, усиленные, аналогично второму типу балок, но до приложения нагрузки. Кроме того, в ходе экспериментальных исследований выполнено испытание контрольных образцов бетона, арматуры и углеволокна для установления их основных физико-механических характеристик. Получены предельные значения экспериментальных изгибающих моментов и прогибов в середине пролета образцов всех серий. Выявлено, что разрушение всех образцов, внешне армированных углепластиком, наступило в результате выкола бетона сжатой зоны, возникшего вследствие увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что также стало причиной отслоения композиционного материала от бетона.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, усиление, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, углеволокно, полимеркомпозитные материалы

**Введение.** Усиление несущих конструкций является одним из основных направлений при перепрофилировании и реконструкции объектов капитального строительства, а также при снижении их силового сопротивления и исчерпания остаточного ресурса. В современной практике строительства широко используются технологии внешнего армирования с высокой удельной прочностью и стойкостью к электрохимической коррозии [1–2]. Благодаря высоким физико-механическим свойствам применение системы внешнего армирования углеволокном при усилении несущих конструкций признано эффективным методом [3].

Исследования влияния усиления углепластиком на изменение прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов представлены в работах [4–7]. В ходе данных экспериментальных исследований авторы, варьируя количеством слоев системы усиления, схемой усиления, типом волокна, а также уровнем предварительного нагружения перед усилением, установили, что усиление железобетонных балок полимеркомпозитными материалами на основе углеродных волокон привело к существенному увеличению их несущей способности.

Кроме того, вопросам усиления изгибаемых железобетонных элементов также посвящено множество работ зарубежных исследователей.

В частности, изучением механизма разрушения изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном занимались следующие авторы [8–11].

Обоснованию выбора оптимального способа анкерровки композиционного материала, который зависит от распределения нормальных и касательных напряжений на концевом участке приклеенной к бетону полосы композиционного материала, посвящены работы [12–17].

Авторами [18] были проведены экспериментальные исследования двух серий образцов: 8 железобетонных балок, предварительно нагруженных до 30 % от разрушающей нагрузки контрольных образцов, усиленных углепластиком после разгрузки; и 2 железобетонных балок, усиленных углеволокном при эксплуатационной нагрузке. В ходе испытания выявлено, что в среднем несущая способность образцов первой серии увеличилась на 24 % по сравнению с контрольной балкой, а второй серии – только на 16 %.

В работе [19] представлены экспериментальные исследования 19 железобетонных балок, усиленных углепластиком с разной ориентацией волокон, при наличии дефектов и повреждений.

Впоследствии, балки были нагружены до разрушения. В зависимости от ориентации волокна наблюдались различные типы разрушения. Целью данного исследования было изучить влияние ориентации волокон углепластика на прочность и жесткость балок. Оценка влияния уровня повреждений на несущую способность не проводилась.

Авторы [20] исследовали влияние двух разных вариантов предварительного нагружения – усиление при нагрузке соответствующей упругой стадии работы конструкции и при упругопластической – на несущую способность железобетонных балок, усиленных углеволокном. После разгрузки балки были усилены углепластиком с высоким или сверхвысоким модулем упругости (210 или 400 ГПа). Результаты испытаний показали, что уровень ранее существовавших дефектов и повреждений незначительно влияет на эффективность усиления и тип разрушения конструкции.

В работе [21] представлены исследования влияния уровня предварительного нагружения на несущую способность изгибаемых элементов, усиленных углеволокном. Были испытаны 3 железобетонные балки, которые предварительно нагрузили, а затем полностью разгрузили и усилили. Результаты экспериментов показали, несущая способность образцов после усиления увеличилась на 83 %, 56 % и 48 % для уровней предварительного нагружения 35 %, 66 % и 100 % от предельной расчетной нагрузки соответственно.

Авторами [22] проведено экспериментальное исследование предварительно нагруженных железобетонных балок, усиленных углепластиком. Образцы были разделены на 2 серии в зависимости от уровня предварительного нагружения. Образцы первой серии перед усилением были предварительно нагружены до 50 % от разрушающей нагрузки контрольной балки. Образцы второй серии предварительно нагрузили до 50 %, затем разгрузили до 25 % от разрушающей нагрузки контрольной балки, усилили и разрушили. Результаты испытаний показали, что чем выше уровень предварительной нагрузки, тем ниже несущая способность усиленных образцов.

В работе [23] приведены результаты экспериментальных исследований 8 железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Образцы были предварительно нагружены до 40 %, 60 % и 80 % от разрушающей нагрузки контрольной балки и усилены углепластиком. В ходе испытания выявлено, что предельная несущая способность железобетонных балок, усиленных

под нагрузкой несущественно отличается от несущей способности образцов, усиленных без нагрузки.

Авторы [24] провели испытания 6 железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Уровень нагружения, при котором проводилось усиление, соответствовал 0 %, 50 % и 70 % от разрушающей нагрузки контрольного образца. Экспериментальные исследования показали, что величина нагрузки усиления оказывает большее влияние на деформативность балок на высоких уровнях нагружения, чем на прочность (предварительное нагружение практически не повлияло).

В работах [25–27] приведены результаты экспериментальных исследований 6 железобетонных балок, усиленных углепластиком, под нагрузкой и с различной историей нагружения. Испытания показали, что нагрузка усиления является важным фактором, влияющим на прочность образцов, усиленных углеволокном. Изгибная прочность железобетонных балок, усиленных углеволокном под нагрузкой, тем выше, чем ниже уровень нагрузки усиления. Если нагрузка усиления одинакова, несущая способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, почти одинакова, независимо от истории нагружения.

Однако, несмотря на накопленный мировой опыт экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимеркомпозиционными материалами [28–38], изучению влияния уровня предварительного нагружения и разгрузки на изменение прочности и деформативности посвящено достаточно мало работ.

**Методы и оборудование.** Для исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углеволокном, были проведены экспериментальные исследования опытных образцов – 6-ти балок трех типов. Первый тип балок – эталонные образцы без усиления. Второй тип балок – балки, нагруженные до стадии, соответствующей нагружению нормативной нагрузкой, для которой характерно наличие трещин и прогибов не превышающих предельных значений, усиленные углеволокном после разгрузки, путем приклеивания его к растянутой зоне с U-образной анкерровкой на приопорных участках. К третьему типу балок относятся образцы, усиленные углеволокном до приложения нагрузки, аналогично второму типу балок.

Конструкция опытных образцов и схема их армирования представлена на рис. 1.

В качестве армирования балок применялись плоские сварные каркасы с рабочей и конструктивной арматурой класса А400 диаметром 10 и 6 мм соответственно. В качестве поперечной арматуры использовалась проволока класса Вр500 диаметром 5 мм.

Балки изготавливались из бетона класса по прочности на сжатие В35.

В качестве материала усиления была использована система внешнего армирования, состоящая из однонаправленного углеродного холста на основе высокопрочного углеродного волокна со стеклянной уточной тканью марки FibARM 530/300 с прочностью на растяжение 4200 МПа и модулем упругости 240 000 МПа и адгезива – клея на основе эпоксидной смолы FibArm Resin 530+.

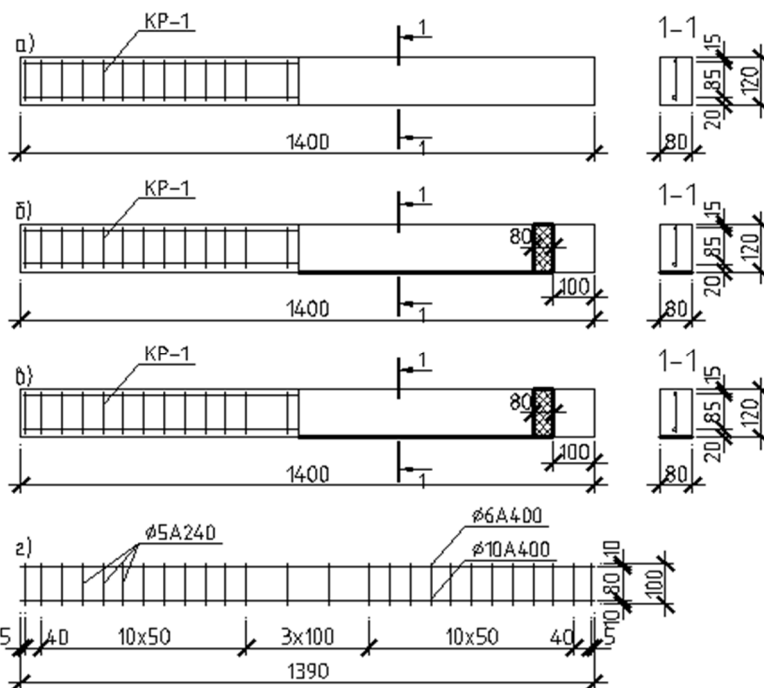


Рис. 1. Конструкция и схема армирования экспериментальных образцов: а) балки серии «А»; б) балки серии «Б»; в) балки серии «В»; г) каркас КР-1

Экспериментальные исследования проводились на испытательной установке, основанной на стенде, описанном в работе [39] (рис. 2)

Схема нагружения экспериментальных образцов приведена на рис. 3.

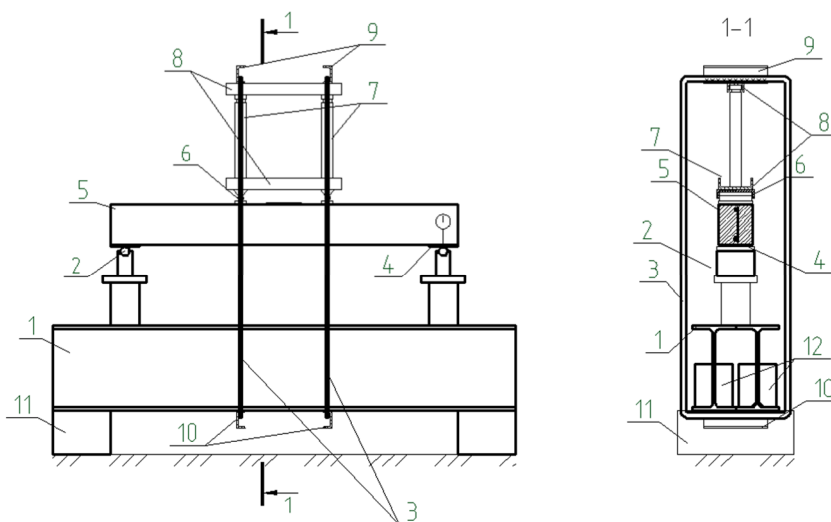


Рис. 2. Схема испытательной установки:

- 1 – основание из двух двутавров №30Ш1; 2 – шарнирная опора; 3 – тяжи; 4 – опорные пластины;
- 5 – испытуемый образец; 6 – катки с распределительными плитами; 7 – гидравлические цилиндры;
- 8 – распределительные траверсы швеллер №12; 9; 10 – верхние и нижние траверсы швеллер № 6;
- 11 – опора основания [39]

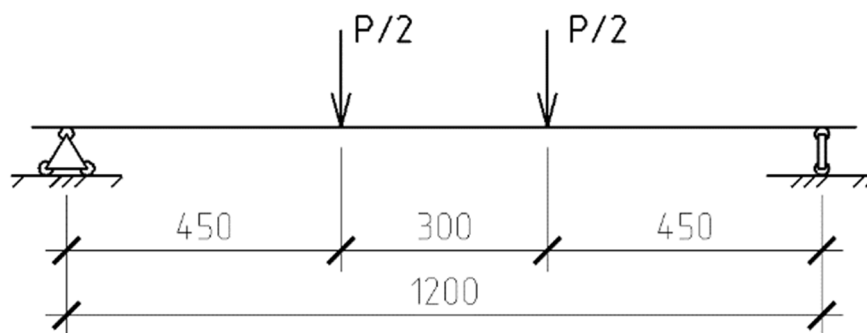


Рис. 3. Схема нагружения экспериментальных образцов

Измерение продольных деформаций бетона сжатой и растянутой зон осуществлялось с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм при базе измерения 200 мм. Кроме того, измерения механических индикаторов дублировались с помощью тензорезисторов. Для измерения деформаций верхнего фибрового волокна бетона были приняты тензорезисторы с базой измерения 80 мм и сопротивлением 120 Ом. Помимо

этого, для определения продольных деформаций углеволокна и стальной арматуры использовались тензорезисторы с базой измерения 20 мм, которые устанавливались непосредственно на углеродную ленту и рабочую арматуру соответственно. Схема расположения тензорезисторов приведена на рис. 4.

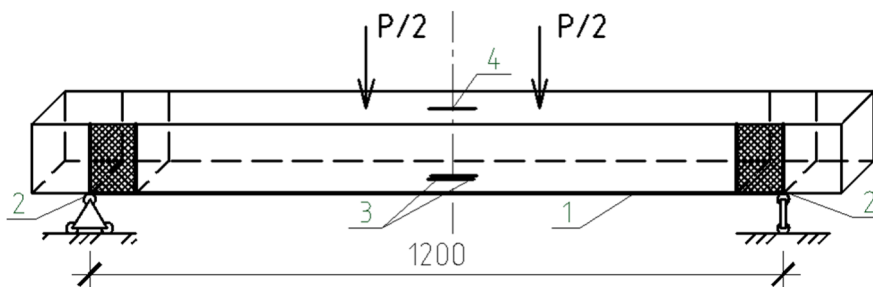


Рис. 4. Схема расположения тензорезисторов на опытном образце:

1 – углепластик; 2 – углепластиковая U-образная анкеровка; 3 – тензорезисторы для измерения деформаций растянутой зоны; 4 – тензорезисторы для измерения деформаций сжатой зоны

Определение прогибов осуществлялось с помощью многооборотного прогибомера типа 6-ПАО (прогибомера Аистова) с ценой деления 0,01 мм.

Ширина раскрытия трещин на каждом этапе нагружения фиксировалась с помощью лабораторного микроскопа МПБ -100.

Экспериментальное исследование состояло из нескольких этапов [39]:

Первый этап заключался в подготовке экспериментальных образцов к испытанию. Для этого все образцы одной партии осматривались на наличие дефектов. Затем исследуемая балка устанавливалась на испытательный стенд [40], где выполнялась разметка и последующая установка измерительных приборов.

Второй этап включал подготовку и исследование контрольных образцов. Контрольные испытания прочности образцов бетона на сжатие выполнялись в соответствии с ГОСТ 10180.

На третьем этапе экспериментальных исследований проводилось непосредственно само испытание балок (рис. 5).

Балки серии «А» нагружались поэтапно вплоть до разрушения.

Балки серии «Б», нагруженные до 70 % от разрушающей нагрузки, разгружались и усиливались углеродным волокном по описанной ранее схеме и технологии [41]. Затем повторно нагружались вплоть до разрушения.

Балки серии «В» усиливались углеродным волокном и нагружались поэтапно вплоть до разрушения.



Рис. 5. Общий вид испытания до усиления углеволокном и после усиления

**Основная часть.** Все опытные образцы были доведены до разрушения. По результатам экспериментальных исследований средний предельный изгибающий момент эталонных балок без усиления (балки А1 и А2) составил 5,07кНм. Все образцы данной партии разрушились в результате увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что приводило к выколу бетона сжатой зоны на заключительном этапе эксперимента (рис. 6).



Рис. 6. Характер разрушения эталонных образцов А1 и А2

Прочностные характеристики балок, полученные в ходе экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Прочностные характеристики экспериментальных образцов серии А**

Марка балки	Разрушающая нагрузка $R_{разр}$ , кН	Средняя разрушающая нагрузка $R_{ср}$ , кН	Разрушающий момент $M_u$ кНм	Средний разрушающий момент $M_{ср/u}$ , $M_{ср/u}$ , кНм
A1	21,41	22,625	5,36	5,09
A2	23,84		4,82	

В начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований проводились фиксация деформаций бетона сжатой и растянутой зон, растянутой арматуры по описанной выше схеме. Зафиксированные показания тензодатчиков позволяли описать характер изменения средних относительных деформаций эталонных образцов (рис. 7)



Рис. 7. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов первой партии (без усиления)

Для оценки деформативности также фиксировались значения прогибов в начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований. Значения прогибов для соответствующей нагрузки представлены на рис. 8.

На основании полученной диаграммы можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки и приближении ее к разрушающей не

наблюдается ползучесть бетона. Среднее значение прогиба балок в середине пролета при разрушающей нагрузке составляет 7,24 мм.

В результате испытаний было выявлено, что средний предельный изгибающий момент балок, усиленных углеволокном на стадии близкой к исчерпанию несущей способности (балки В1 и В2) составил 8,1 кНм, а балок, усиленных без нагружения (балки В1 и В2) – 6,6 кНм (рис. 9).

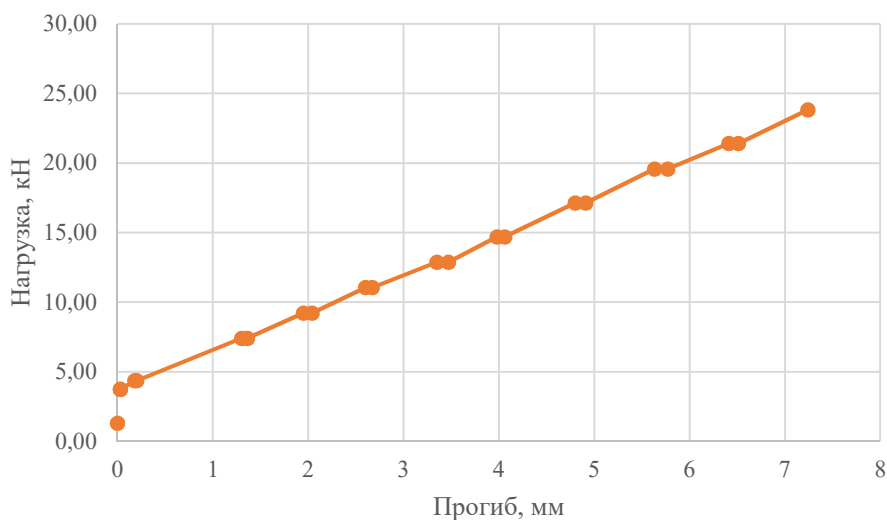


Рис. 8. Усредненная зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов первой партии (без усиления)



Рис. 9. Гистограмма экспериментальных предельных значений изгибающих моментов: образцы 1–2 – эталонные (А1 и А2); 3–4 – усиленные углеволокном, на стадии близкой к исчерпанию несущей способности (Б1 и Б2); 5–6 – усиленные без предварительного нагружения (В1 и В2)

Разрушение всех образцов, внешне армированных углеволокном, произошло в результате увеличения ширины и высоты нормальных трещин, расположенных в зоне чистого изгиба и возрастания прогибов, что стало причиной отслоения полимеркомпозитного материала от бетона и выкола бетона сжатой зоны (рис. 10).

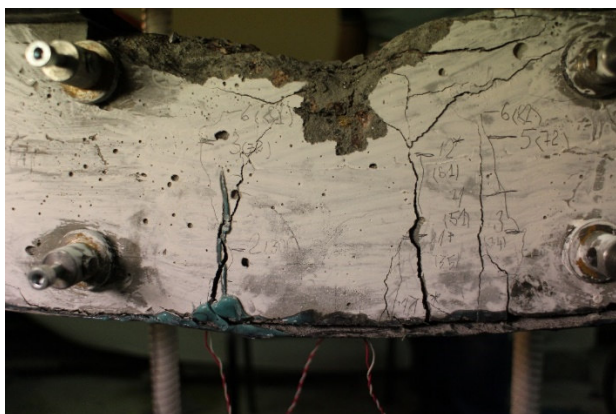


Рис. 10. Общий характер разрушения образцов, внешне армированных углепластиком

При этом наблюдалось отслоение углеволокна, без разрушения полимеркомпозита, которое возникло, как и предполагалось, в результате отрыва бетона непосредственно на границе склеиваемой поверхности (рис. 11).

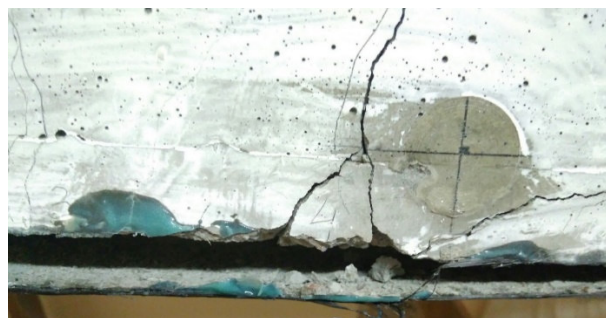


Рис. 11. Поверхность разрушения, усиливаемых образцов

Прочностные характеристики балок, усиленных углеволокном, полученные в ходе экспериментальных исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Прочностные параметры экспериментальных образцов серий Б и В**

Марка балки	Разрушающая нагрузка $R_{разр}$ , кН	Средняя разрушающая нагрузка $R_{ср}$ , кН	Разрушающий момент $M_u$ , кНм	Средний разрушающий момент $M_{ср/u}$ , кНм
Б1	37,84	36,02	8,51	8,1
Б2	34,19		7,69	
В1	29,32	29,32	6,6	6,6
В2	29,32		6,6	

В начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований проводилась фиксация деформаций бетона сжатой и растянутой зон, растянутой арматуры и углеволокна по описанной выше схеме. Зафиксированные показания тензодатчиков позволили описать характер изменения средних относительных деформаций усиленных образцов (рис. 12–13).

Оценка деформативности осуществлялась путем фиксации прогибов в начале и конце каждого этапа экспериментальных исследований. Графики зависимости «нагрузка-прогиб» каждой серии балок приведены на рис. 14-15.

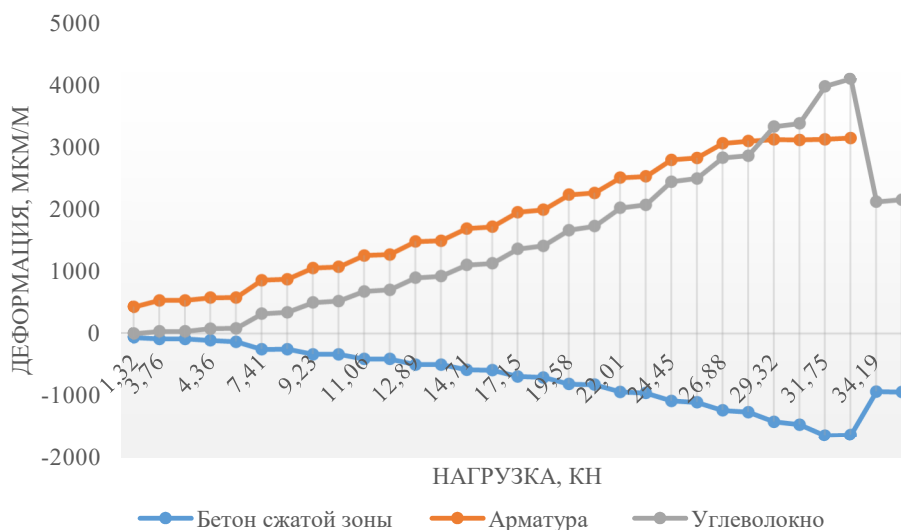


Рис. 12. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов второй партии (Б1 и Б2)



Рис. 13. Графики зависимости «нагрузка-деформации» для образцов второй партии (Б1 и Б2)

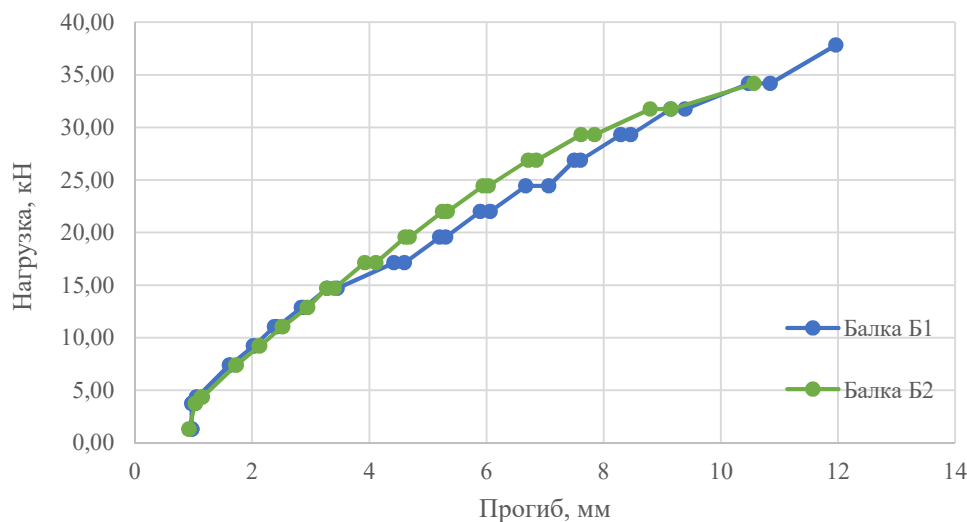


Рис. 14. Зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов Б1 и Б2

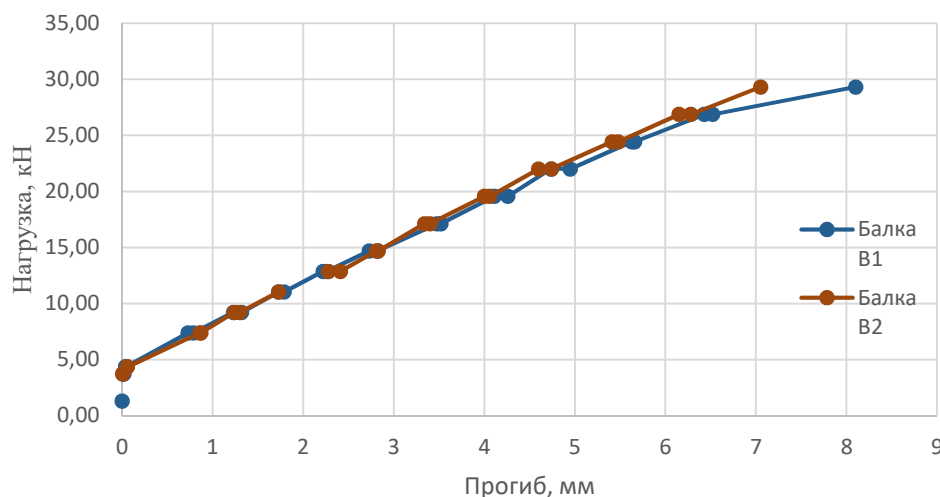


Рис. 15. Зависимость «нагрузка-прогиб» для образцов В1 и В2

На основании полученной диаграммы можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки и приближении ее к разрушающей не наблюдается выраженная ползучесть бетона. Среднее значение прогиба в середине пролета при нормативной нагрузке балок серии Б составляет 5,6 мм, серии В – 4,16 мм.

Величина прогиба при нормативной нагрузке 14,71 кН у балок серии Б составляла 6,11 мм, а после – 4,05 мм, таким образом, прогиб уменьшился на 34 %.

**Выводы.** В ходе экспериментальных исследований установлено следующее:

На основании испытаний образцов арматуры и углеволокна на растяжение определены их основные деформативно-прочностные характеристики. Разрушение всех образцов углепластика – хрупкое, с разрывом поперек волокон

(без образования шейки) и с их продольным расщеплением, что отличается от характера разрушения металлической арматуры.

Диаграмма деформирования углеволокна линейна вплоть до разрыва, т.е. углеродные волокна практически не подвержены пластическим деформациям.

По результатам испытаний образцов бетонных кубов на сжатие установлены значения основных механических характеристик бетона при центральном (однородном) деформировании.

Разрушение эталонных неусиленных образцов происходило вследствие достижения деформаций в сжатой зоне бетона предельных значений.

Все образцы, внешне армированные углеволокном, разрушались по нормальному сечению с выколом бетона сжатой зоны и отслоением композиционного материала от бетона. В то время



как, сам композиционный материал не разрушался.

На основании полученных величин разрушающих изгибающих моментов и нагрузок можно утверждать, что усиление внешним армированием из углепластика повышает прочность по нормальному сечению по сравнению с эталонными образцами без усиления на 59 % для балок серии Б и на 30 % – для серии В. Предположительно, полученный эффект можно объяснить тем, что при нагрузке, не превышающей 80 % от разрушающей, у балок серии Б не наблюдалось возникновение новых трещин, а происходило увеличение высоты и ширины раскрытия уже существующих, и только на этапе перед разрушением, процесс трещинообразования возобновлялся. В то время как для балок серии В, трещинообразование происходило на протяжении всего нагружения, вплоть до разрушения, а общее количество трещин было значительно больше.

Среднее значение прогиба в середине пролета при нормативной нагрузке балок серии Б составляет 5,6 мм, серии В – 4,16 мм.

Величина прогиба при нормативной нагрузке 14,71 кН у балок серии Б составляла 6,11 мм, а после – 4,05 мм, таким образом, прогиб уменьшился на 34 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. №3.
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.2. Влияние температуры // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Т. 8. №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf>.
3. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 180 с.
4. Быков А.А., Румянцев С.Д., Бирин А.С. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик железобетонных балок, усиленных углепластиком // Вестник ПНИПУ. 2016. №2(22). С. 112–126.
5. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // Вестник Московского государственного строительного университета. 2011. №8. С. 181–184.
6. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. №3 (16). С. 1–9.
7. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. №4. С. 49–54.
8. Aram M.R., Czaderski C., Motavalli M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams // Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 826–841. doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.006
9. Matthys S. Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Ghent University, Department of structural engineering. 2000
10. Pham H., Al-Mahaidi R. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams // Composite Structures. 2004. Vol. 66. Pp. 601–610. doi:10.1016/j.compstruct.2004.05.008
11. Teng G.J., Smith T.S., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs // Construction and Building Materials. 2003. Vol.17. Pp. 447–462. doi:10.1016/S0950-0618(03)00043-6
12. Alam M.A., Jumaat M.Z. Behavior of U and L shaped end anchored steel plate strengthened reinforced concrete beams // European Journal of Scientific Research. 2008. Vol. 22. Pp. 184–196.
13. Ceroni F., Pecce M., Matthys S., Taerwe L. Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets // Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 429–441. doi:10.1016/j.compositesb.2007.05.002
14. Jumaat M.Z., Alam M.A. Experimental and numerical analysis of end anchored steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened r. c. Beams // Int. J. Phys. Sci. 2010. Vol.5. Pp. 132–144.
15. Pham H., Al-Mahaidi R. Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams. // J.

Compos Constr. ASCE. 2006. Vol. 10. Pp. 48–59. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:1(48)

16. Wang Y.C., Hsu K. Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates // Composite Structures. 2009. Vol. 88. Pp. 323–332. doi:10.1016/j.compstruct.2007.12.001

17. Xiong G.J., Jiang X., Liu J.W., Chen L. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams. Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. Pp. 402–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.005

18. Arduini M., Nanni A. Behaviour of precracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets // ASCE Journal of Composites for Construction. 1997. Vol. 1. № 2. Pp. 63–70. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(63)

19. Norris T., Saadatmanesh H., Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets // ASCE. J. Struct. 1997. Vol. 123. Pp. 903–911. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)

20. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded CFRP laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams // J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. № 4. Pp. 30–54. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000454

21. Fayyadh M.M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels based on flexural stiffness // Constr. Build. Mater. 2012. Vol. 37. Pp. 125–134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.021

22. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates // Build. Struct. 2005. Vol. 35. Pp. 214–225.

23. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets // J. Wuhan Univ. Technol. 2009. Vol. 31. Pp. 5–15.

24. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of r.c. beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load // ACI Struct. J. 2003. Vol. 100. Pp. 231–239.

25. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load // Int. J. Solids Struct. 2006. Vol. 43. Pp. 1372–1387. doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076

26. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets // Eng. Mech. 2004. Vol. 21. Pp. 7–19.

27. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads // Eng. Mech. 2006. Vol. 23. Pp. 6–21.

28. Grace N.F., Abdel-Sayed G., Soliman A.K., Saleh K.R. Strengthening of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymer (FRP) laminates // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. № 5. Pp. 865–874.

29. Ross C.A., Jerome D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates // ACI Structural Journal. 1999. Vol. 96. № 2. Pp. 65–71.

30. Sebastian W.M. Significance of mid-span de-bonding failure in FRP-plated concrete beams // ASCE Journal of Structural Engineering. 2001. Vol. 127. № 7. Pp. 792–798. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792)

31. Smith S.T., Teng J.G. FRP-strengthened RC beams I: Review of debonding strength models // Engineering Structures. 2002. Vol. 24. № 4. Pp. 385–395. doi:10.1016/S0141-0296(01)00105-5

32. Yang Z.J., Chen J.F., Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated R. C. beams // Construction and Building Materials. 2003. Vol. 17. № 1. Pp. 3–13. doi:10.1016/S0950-0618(02)00090-9

33. Aiello M.A., Ombres L. Cracking and deformability analysis of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheet // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. 2004. Vol. 16. № 5. Pp. 292–399. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(392)

34. Obaidat Y.T., Susanne H., Ola D., Ghazi A., Yahia A. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 25. Pp. 591–597. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.082

35. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastic // ACI Structural Journal. 1991. Vol. 88(4). Pp. 490–500.

36. Garden H.N., Hollaway L.C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams // Composite Structures. 1998. Vol. 42. Pp. 175–188. doi:10.1016/S0263-8223(98)00070-1

37. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with FRP plates. I: Experimental study // Journal of Structural Engineering. 1991. Vol. 117(11). Pp.3417–3433. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417)

38. Buyukozturk O., Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP // Journal of composites for construction. 1998. Vol. 2(3). Pp. 138–144.

39. Ищук Я.Л. Программа исследования прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов, усиленных полимеркомпозиционными материалами // Международный студенческий строительный форум – 2016 (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. С. 349–353.

40. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования прочности, трещи-

нотойкости и деформативности железобетонных балок трапециевидного и прямоугольного поперечных сечений // Инновационная наука. 2016. № 8-2. С. 73–77.

41. Смоляго Г.А., Ищук Я.Л. Технология применения полимеркомпозитных материалов при реконструкции гражданских зданий // Материалы всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы реновации жилищного фонда города: взаимосвязь экономических, технических и правовых аспектов». Белгород: НИУ БелГУ, 2016. С. 366–369.

#### Информация об авторах

**Смоляго Геннадий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры Строительства и городского хозяйства. E-mail: trk-psv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Обернихина Яна Леонидовна**, ассистент кафедры Строительства и городского хозяйства. E-mail: yana.ishuk@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.11.2021 г.

© Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л., 2022

**Smolyago G.A., \*Obernikhina Y.L.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.*

*\*E-mail: yana.ishuk@yandex.ru*

## STRENGTH AND DEFORMATION OF BENDED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED WITH CARBON FIBER

**Abstract.** Reinforcement of reinforced concrete flexible elements with polymer composite materials has found wide application in modern construction, so the accumulation of experimental studies of the strength of such structures is relevant. This paper presents the results of experimental studies of the stress-strain state of flexible reinforced concrete elements forced with carbon fiber. Namely, six beams of three types. The first type of beams - reference samples without reinforcement. The second type of beams – beams loaded at the stage corresponding to the standard load, in the presence of cracks and deflections, reinforced with carbon fiber, by gluing it to a stretched zone with a U-shaped anchorage on the supporting areas after unloading. The third type of beams includes samples reinforced, similar to the second type of beams but before the application of loads. In addition, during the experimental study, control images of concrete, rebar and carbon fiber were tested to establish their basic physical and mechanical characteristics. The limit values of experimental bending moments in the middle of the span of samples of all series are obtained. It was found that all samples externally reinforced with carbon fiber were destroyed as a result of increasing the width and height of normal cracks located in the zone of pure bending and increasing deflections, which led to the separation of the composite material from the concrete and the indent of the concrete of the compressed zone.

**Keywords:** reinforced concrete beam, reinforcement, stress-strain state, crack resistance, carbon fiber, polymer composite materials

### REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading [Analiz eksperimental'nyh issledovaniy po usileniyu zhelezobetonnyh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.1. Otechestvennye

eksperimenty pri staticheskom nagruzenii]. Naukovedenie Internet magazine. 2016. Vol. 8. No. 3. (rus)

2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 2. Influence of temperature [Analiz eksperimental'nyh issledovaniy po usileniyu zhelezobet-

- onnyh konstrukcij polimernymi kompozitnymi materialami. CH.2. Vliyanie temperatury]. Online magazine "Science". 2016. Vol. 8. No. 4 <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (free access). (rus)
3. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials [Vneshnee armirovanie zhelezobonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami]. Moscow: Stroyizdat, 2007. 180 p. (rus)
  4. Bykov A.A., Rumyantsev S.D., Birin A.S. Experimental study of the strength and deformation characteristics of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber [Eksperimental'noe issledovanie prochnostnyh i deformacionnyh harakteristik zhelezobonnyh balok, usilennyh ugleplastikom]. Vestnik PNRPU. 2016. No. 2 (22). Pp. 112–126. (rus)
  5. Grigorieva Ya.E. The strength and deformability of reinforced concrete beams, reinforced with carbon fiber at a stage close to the exhaustion of the bearing capacity [Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vneshnego armirovaniya izgibaemyh zhelezobonnyh balok uglevoloknom na prochnost' i zhestkost' konstrukcij]. Vestnik of the Moscow State University of Civil Engineering Moscow. 2011. No. 8. Pp.181–184. (rus)
  6. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and high temperatures of reinforced concrete specimens reinforced with polymer composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya pri ponizhennyh i povyshennyh temperaturah zhelezobonnyh obrazcov, usilennyh polimernymi kompozicionnymi materialami]. Naukovedenie Internet journal. 2013. No. 3 (16). Pp. 1–9. (rus)
  7. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Klementyev A.O. Experimental studies of the strength and deformability of bending reinforced concrete elements reinforced in a compressed and stretched zone with non-metallic composite reinforcement [Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibaemyh zhelezobonnyh elementov, armirovannyh v szhatoj i rastyannoj zone nemetallicheskoj kompozicionnoj armaturoj]. Transport of the Urals. 2014. No. 4. Pp. 49–54. (rus)
  8. Aram M.R., Czaderski C., Motavalli M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams. Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 82–841. doi:10.1016/j.compositesb.2007.10.006
  9. Matthys S. Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Ghent University, Department of structural engineering. 2000
  10. Pham H., Al-Mahaidi R. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams. Composite Structures. 2004. Vol. 66. Pp. 601–610. doi:10.1016/j.compstruct.2004.05.008
  11. Teng G.J., Smith T.S., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. Construction and Building Materials. 2003. Vol.17. Pp. 447–462. doi:10.1016/S0950-0618(03)00043-6
  12. Alam M.A., Jumaat M.Z. Behavior of U and L shaped end anchored steel plate strengthened reinforced concrete beams. European Journal of Scientific Research. 2008. Vol. 22. Pp. 184–196.
  13. Ceroni F., Pecce M., Matthys S., Taerwe L. Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets. Composites Part B: Engineering. 2008. Vol. 39. Pp. 429–441. doi:10.1016/j.compositesb.2007.05.002
  14. Jumaat M.Z., Alam M.A. Experimental and numerical analysis of end anchored steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened r. c. beams. Int. J. Phys. Sci. 2010. Vol.5. Pp. 132–144.
  15. Pham H., Al-Mahaidi R. Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams. J. Compos Constr., ASCE. 2006. Vol. 10. Pp. 48–59. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:1(48)
  16. Wang Y.C., Hsu K. Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates. Composite Structures. 2009. Vol. 88. Pp. 323–332. doi:10.1016/j.compstruct.2007.12.001
  17. Xiong G.J., Jiang X., Liu J.W., Chen L. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams. Construction and Building Materials. 2007. Vol. 21. Pp. 402–408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.08.005
  18. Arduini M., Nanni A. Behaviour of pre-cracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets. ASCE Journal of Composites for Construction. 1997. Vol. 1. No. 2. Pp. 63–70. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(63)
  19. Norris T., Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. ASCE. J. Struct. 1997. Vol. 123. Pp. 903–911. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)
  20. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded cfrp laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams. J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. No. 4. Pp. 30–54. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000454
  21. Fayyadh M.M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams

- under different damage levels based on flexural stiffness. *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 37. Pp. 125–134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.021
22. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates. *Build. Struct.* 2005. Vol. 35. Pp. 214–225.
23. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets. *J. Wuhan Univ. Technol.* 2009. Vol. 31. Pp. 5–15.
24. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of rc beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load. *ACI Struct. J.* 2003. Vol. 100. Pp. 231–239.
25. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load. *Int. J. Solids Struct.* 2006. Vol. 43. Pp. 1372–1387. doi:10.1016/j.ijstr.2005.03.076
26. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets. *Eng. Mech.* 2004. Vol. 21. Pp. 7–19.
27. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads. *Eng. Mech.* 2006. Vol. 23. Pp. 6–21.
28. Grace N.F., Abdel-Sayed G., Soliman A.K., Saleh K.R. Strengthening of reinforced concrete beams using fibre reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal.* 1999. Vol. 96. No. 5. Pp. 865–874.
29. Ross C.A., Jerome D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates. *ACI Structural Journal.* 1999. Vol. 96. No. 2. Pp. 65–71.
30. Sebastian W.M. Significance of mid-span de-bonding failure in FRP-plated concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering.* 2001. Vol. 127. No. 7. Pp. 792–798. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(792)
31. Smith S.T., Teng J.G. FRP-strengthened RC beams I: Review of debonding strength models. *Engineering Structures.* 2002. Vol. 24. No. 4. Pp. 385–395. doi:10.1016/S0141-0296(01)00105-5
32. Yang Z.J., Chen J.F., Proverbs D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated R. C. beams. *Construction and Building Materials.* 2003. Vol. 17. No. 1. Pp. 3–13. doi:10.1016/S0950-0618(02)00090-9
33. Aiello M.A., Ombres L. Cracking and deformability analysis of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheet. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering.* 2004. Vol. 16. No. 5. Pp. 292–399. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(392)
34. Obaidat Y.T., Susanne H., Ola D., Ghazi A., Yahia A. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. *Construction and Building Materials.* 2010. Vol. 25. Pp. 591–597. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.082
35. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Connelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastic. *ACI Structural Journal.* 1991. Vol. 88(4). Pp. 490–500.
36. Garden H.N., Holloway L.C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Composite Structures.* 1998. Vol. 42. Pp. 175–188. doi:10.1016/S0263-8223(98)00070-1
37. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with FRP plates. I: Experimental study. *Journal of Structural Engineering.* 1991. Vol. 117(11). Pp. 3417–3433.
38. Buyukozturk O., Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP. *Journal of composites for construction.* 1998. Vol. 2(3). Pp. 138–144. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417)
39. Ishchuk Y.L. Program for studying the strength, rigidity and cracking resistance of reinforced concrete bending elements, reinforced with polymeric composition materials [Programma issledovaniya prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti zhelezobetonnykh izgibayemykh elementov, usilennykh polimerkompozitsionnymi materialami]. *CONFERENCE International student construction forum – 2016, BSTU, Belgorod, 2016.* Pp. 349–353. (rus)
40. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of the deformability of bending reinforced concrete elements of various cross sections [Eksperimental'nyye issledovaniya prochnosti, treshchinostoykosti i deformativnosti zhelezobetonnykh balok trapetsiyevidnogo i pryamougol'nogo poperechnykh secheniy]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2017. No. 4. 56–59. (rus)
41. Smolyago G.A., Ishchuk Y.L. Technology of using polymer-composite materials in the reconstruction of civil buildings [Tekhnologiya primeniya polimerkompozitnykh materialov pri rekonstruktsii grazhdanskikh zdaniy]. In: Nikulina, O.M. (eds.) *CONFERENCE Actual problems of renovation of the city's housing stock: the relationship of economic, technical and legal aspects, BelSU, Belgorod, 2016.* 366–370. (rus)

*Information about the authors*

**Smolyago, Gennadiy A.** DSc, Professor. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Obernikhina, Yana L.** Assistant. E-mail: yana.ishuk@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 03.11.2021*

**Для цитирования:**

Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 25–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38

**For citation:**

Smolyago G.A., Obernikhina Y.L. Strength and deformation of bended reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 25–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38