

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45

***Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А.**

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: olegxxii@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ РУБАШКОЙ

Аннотация. Цель исследования – экспериментально изучить совместную работу сталефибробетонных (СФБ) рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения для дальнейшей разработки методики расчёта данного способа усиления изгибаемых элементов. Основные результаты исследования состоят в оценке прочности, жёсткости, трещиностойкости, а также характере разрушения с картиной развития трещин для рассмотренных 4 образцов (двух с рубашкой усиления, двух – контрольных – без усиления). Установлено, что применение СФБ рубашки толщиной 45 мм и с процентом содержания фибры 2,5 % (при расходе 196 кг/м³) увеличивает разрушающую нагрузку на 20 %, жёсткость от 3,4 до 11 раз по мере нагружения, трещиностойкость до 2,8 раз. Выполнено сравнение полученных результатов с компьютерным моделированием в ПК ANSYS: расхождение нагрузки трещинообразования, разрушения и значения прогибов для натуральных образцов и компьютерной модели находятся в пределах 6,3 %, что говорит о достоверности численных результатов и о возможности применения предложенных компьютерных моделей в дальнейших исследованиях по теме статьи.

Ключевые слова: усиление, сталефибробетон, изгибаемый элемент, экспериментальные исследования, ошибки проектирования.

Введение. К сожалению, часто необходимость усиления железобетонных конструкций вызвана ошибками при проектировании или монтаже, перечень которых весьма многообразен. Так по данным экспертов по технической диагностике зданий группы компаний «Городской центр экспертиз» [1] на долю строительно-монтажных работ приходится 32 % случаев, низкое качество строительных материалов – 9 %, ошибки при проектировании – 6 % (статистика за период с мая 2017 г. по май 2018 г.). Причём эти ошибки могут быть обнаружены ещё на стадии строительства, точнее до приложения проектных нагрузок на данную конструкцию. Тогда она может не иметь повреждений и быть изготовлена из нового недавно затвердевшего бетона. Использование в таких ситуациях для усиления наиболее экономичных методов и материалов является актуальной задачей. Весьма перспективным для этого является сталефибробетон (СФБ). Он обладает относительно высокой прочностью на сжатие, высокой прочностью на растяжение, деформационным упрочнением при растяжении (при определенном объеме стальных волокон) и очень низкой проницаемостью, поскольку используется оптимизированная плотная матрица [1, 2, 3]. Отметим, что сталефибробетонные рубашки уже были успешно применены при усилении вертикальных и горизонтальных несущих элементов здания школы в Дзагароло в Италии, а также на других объектах.

К настоящему времени проведены экспериментальные и численные исследования усиленных бетонных балок с помощью сверхвысокопрочного сталефибробетона UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete) и высокопрочного бетона, результаты которых показали увеличение изгибной и сдвиговой жёсткости, как в предельном, так и в эксплуатационном состоянии [4, 5, 6]. В [7, 8] показано, что усиление железобетонных балок, повреждённых на 80–90 %, существенно увеличивает их несущую способность и жёсткость. Серия экспериментальных исследований, проведенных на железобетонных балках, усиленных сверхвысокопрочным сталефибробетоном в качестве дополнительного растянутого элемента, показывает значительное увеличение прочности в 2,0–2,8 раза по сравнению с контрольными балками [9, 10]. Также было исследовано усиление колонн и плит перекрытия [11, 12], результаты показали значительное увеличение прочности на изгиб и сдвиг. Большинство исследовательских работ [13–18] подчеркивают две существенные особенности сверхвысокопрочного фибробетона: долговечность и прочность. Исследования механических свойств UHPFRC показали, что прочность на сжатие может достигать 150 МПа, увеличение процента стальных волокон приводит к увеличению прочности на изгиб [19]. Подтверждением эффективности использования СФБ служат исследования работы изгибаемых

железобетонных элементов, усиленных СФБ рубашками, на основе компьютерного моделирования в ПК ANSYS [20].

Важно также отметить, что на сегодняшний день в нормативной литературе [СП 349.1325800.2017] расчёт усиленных конструкций сводится к формулам расчёта железобетонных конструкций [СП 63.13330], то есть напряженно-деформированное состояние усиленной конструкции рассматривается в предельном состоянии с оговоркой, что необходимо использовать коэффициенты условий работы для недостаточной разгрузки равным 0,9 для бетона и арматуры.

В связи со всем вышеизложенным целью данной работы ставилось экспериментально изучить совместную работу сталефибробетонных рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения для дальнейшей разработки методики расчёта данного способа усиления изгибаемых элементов.

При этом, на первом этапе экспериментального исследования, для упрощения задачи приняты следующие предпосылки:

– бетон для изготовления балок и рубашек, принимается приблизительно одного возраста,

поэтому различие реологических свойств более старого бетона и относительно нового не учитывается;

– необходимость в усилении вызвана ошибками при проектировании или при строительном-монтажных работах, что выявляется до приложения проектных нагрузок – это допускает не рассматривать начальные повреждения в виде силовых трещин.

Методика натурных испытаний железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой.

На первом этапе исследований авторами было проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния балок, усиленных СФБ рубашкой, результаты которого опубликованы в [20]. При этом достоверность результатов моделирования была подтверждена сравнением с опытными данными [6] и оно позволило вскрыть механизмы разрушения и действительную работу усиленных конструкций, расширить область исследований и, в конечном счёте, уже в данной статье рационально спланировать программу физического эксперимента (табл. 1) по изучению совместной работы СФБ рубашки и железобетонной балки.

Таблица 1

Программа натурального испытания

| № серии | | 1 | 2 |
|----------------------------|----------------------|---|--|
| Маркировка балок | | Б-2, Б-4 | Б-1р, Б-3р |
| Количество | | 1+1 | 1+1 |
| Параметры ж/б балки | Сечение, мм | 120x220 | 120x220 |
| | Длина, мм | 1810 | 1810 |
| | Армирование | 2Ø10 А400 | 2Ø10 А400 |
| | Класс бетона | В25 ($R_b=31,9$ МПа; $R_{bt}=2,07$ МПа; $E_b=29\ 787$ МПа) | В25 ($R_b=31,9$ МПа; $R_{bt}=2,07$ МПа; $E_b=29\ 787$ МПа) |
| Параметры рубашки усиления | Класс бетона матрицы | - | В25 ($R_{fb}=35,8$ МПа; $R_{fbt}=2,21$ МПа; $R_{fbt}=4,43$ МПа; $E_{fb}=31\ 353$ МПа) |
| | Армирование | - | Размер фибры: 0,7x0,8x35мм |
| | Толщина, мм | - | 45 |

Таким образом, для проведения натурального эксперимента были изготовлены 2 серии образцов:

1 серия – железобетонные балки без усиления – контрольные образцы – два «близнеца» Б-2, Б-4 (рис. 1, а);

2 серия – балки, усиленные СФБ рубашкой – близнецы Б-1р, Б-3р (рис. 1, б).

Программа эксперимента представлена в таблице 1.

Балки были изготовлены на казанском заводе ЖБИ-3 в опалубочных формах для оконных перемычек габаритами 1810x220x120 из бетона

класса В25. Дозировка материалов на 1 м³: цемент М350 – 475 кг, песок – 600 кг, щебень и гравий – 1150 кг, вода – 125 кг, пластификатор – 5 кг, универсальная добавка РСТ – 7 кг.

Армирование балок в зоне чистого изгиба было выполнено только у нижней грани стержнями 2Ø10 мм А400 (коэффициент армирования $\mu=0,59\%$). На приопорных участках балок (в «пролёте среза») дополнительно устанавливались стержни и у верхней грани 2Ø6 А400 (коэффициент армирования $\mu=0,216\%$) для того, чтобы обеспечить возможность установки поперечных хомутов – Ø6 А240 с шагом 100 мм.

При этом принятое армирование отвечало следующим расчётным требованиям:

– армирование поперечной хомутами принималось с запасом для исключения возможности разрушения по наклонным сечениям;

растянутая продольная арматура подбиралась таким образом, чтобы разрушение по нормальному сечению происходило при достижении

арматуры предела текучести (случай пластичного разрушения, $\zeta < \zeta_R$).

Испытание балок проводилось в лаборатории кафедры ЖБиКК КГАСУ (г. Казань). Нагрузка производилась с помощью испытательной машины ГРМ-1 (мощностью 50 тс, рис. 2) по схеме, представленной на рис. 3.

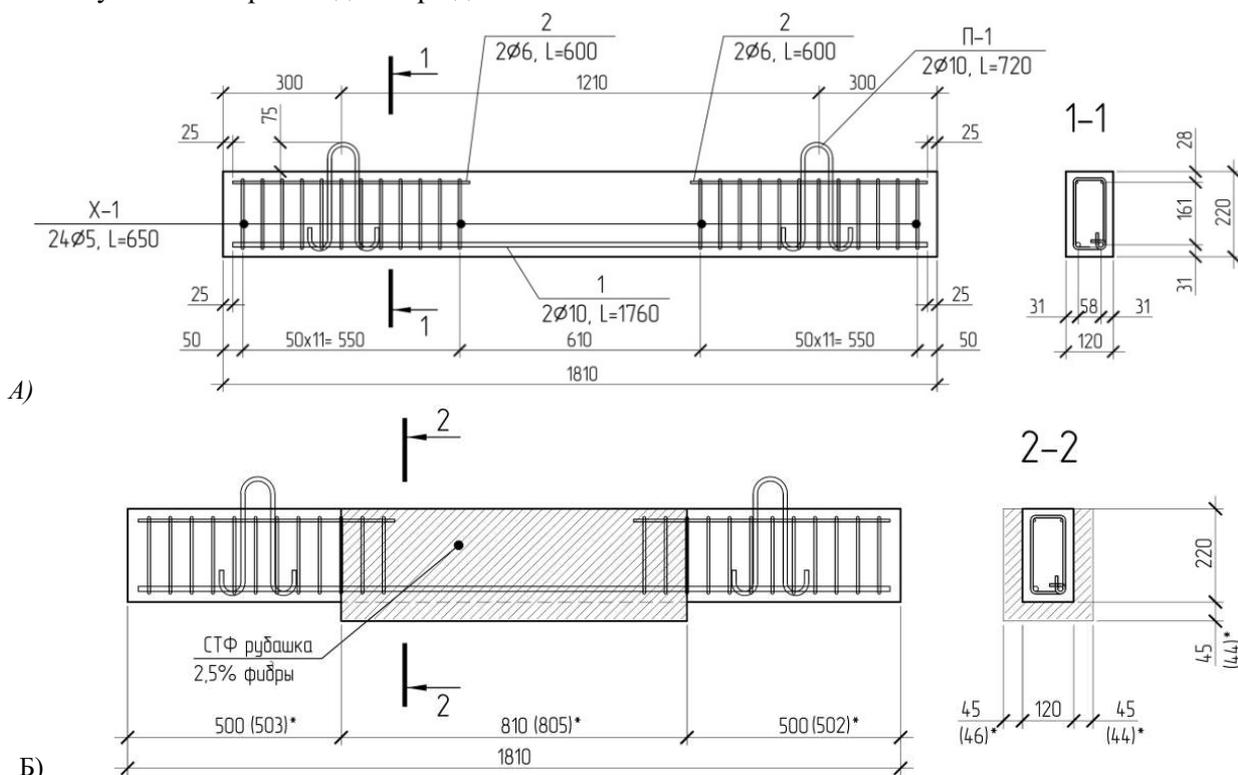


Рис. 1. Схема армирования и геометрические размеры балок (44)* - фактический размер с отклонением от проектного значения



Рис. 2. Испытательная машина ГРМ-1 и готовая к эксперименту усиленная балка Б-1р.

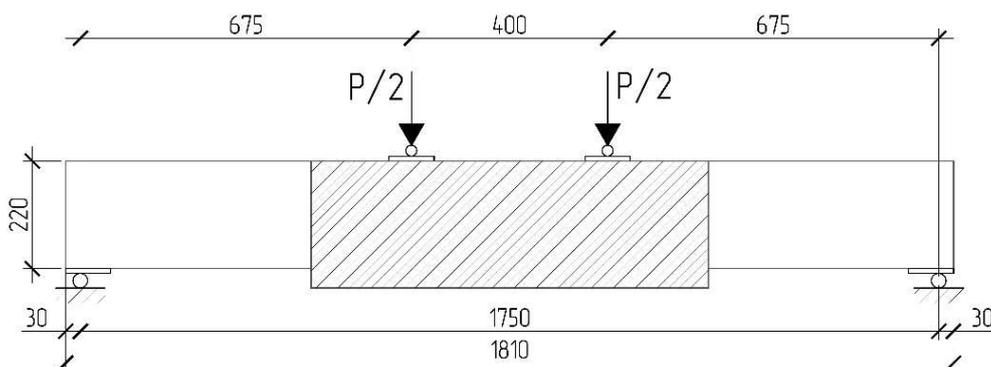


Рис. 3. Расчётная схема испытания балок

Для измерений деформаций в характерных точках балок, наклеивались тензорезисторы, что показано на рис. 4. При этом часть тензодатчиков наклеивалась на рабочую арматуру, другая часть – на бетон балки и ещё часть – на бетон рубашки. Все тензорезисторы были подключены к тензометрической станции ZET 017-T8 через мостовую схему.

До возведения рубашки на бетонной поверхности усиляемых балок создавалась шероховатость с помощью электрического перфоратора. Это, как показали результаты опытов далее, обеспечило надёжное сцепление рубашки с балкой (рис. 5). При этом СФБ рубашка бетонировалась непосредственно в

лаборатории путем заливки бетонной смеси, приготовленной по рекомендациям [ОДМ 218.2.014-2011], в открытую сверху опалубку соответствующих размеров. Сталефибробетонная смесь вибрировалась штыкованием.

Для фиксации прогибов и подвижки опор использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм и штангенциркуль с ценой деления 0,02 мм. Схема расположения измерительных приборов показана на рисунке 2. Нагрузка прикладывалась с шагом 300–400 кг, что соответствовало 5–7 % от разрушающей нагрузки.

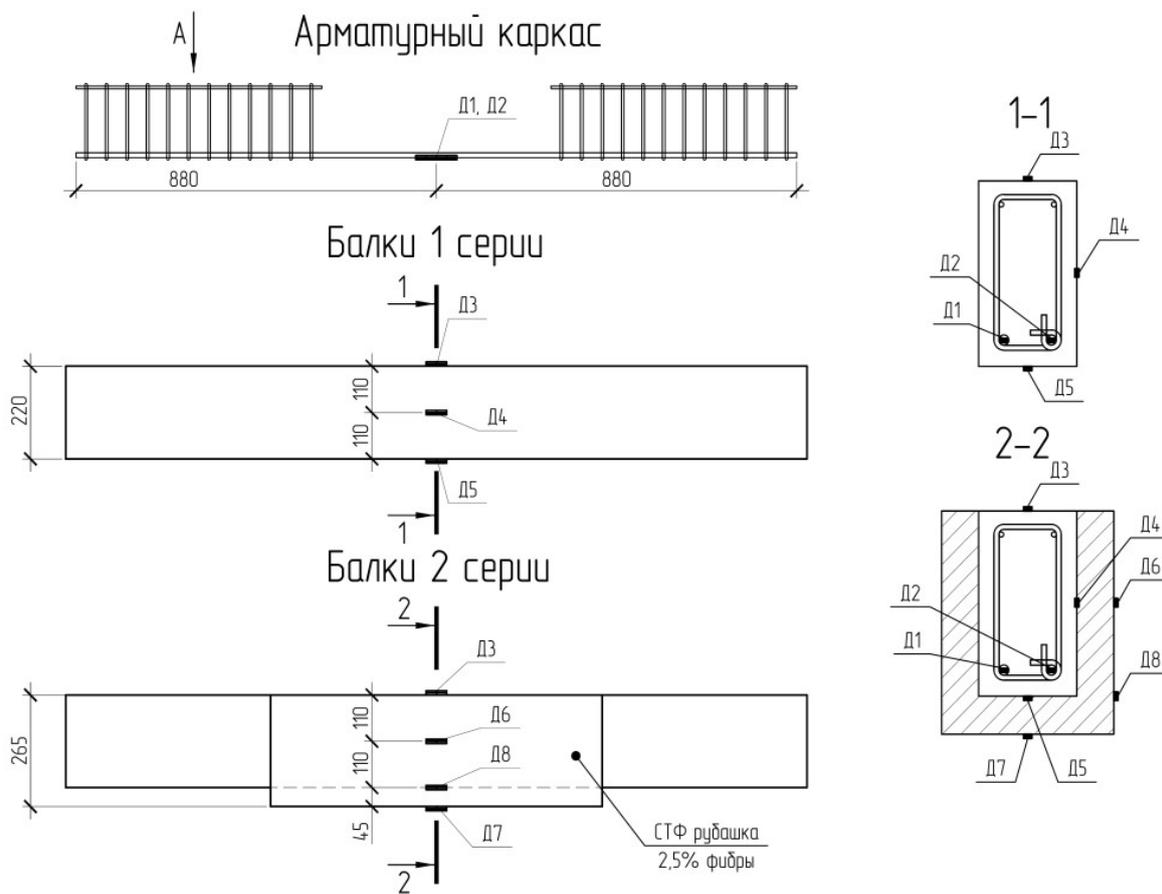


Рис. 4. Схема расположения тензодатчиков в балках

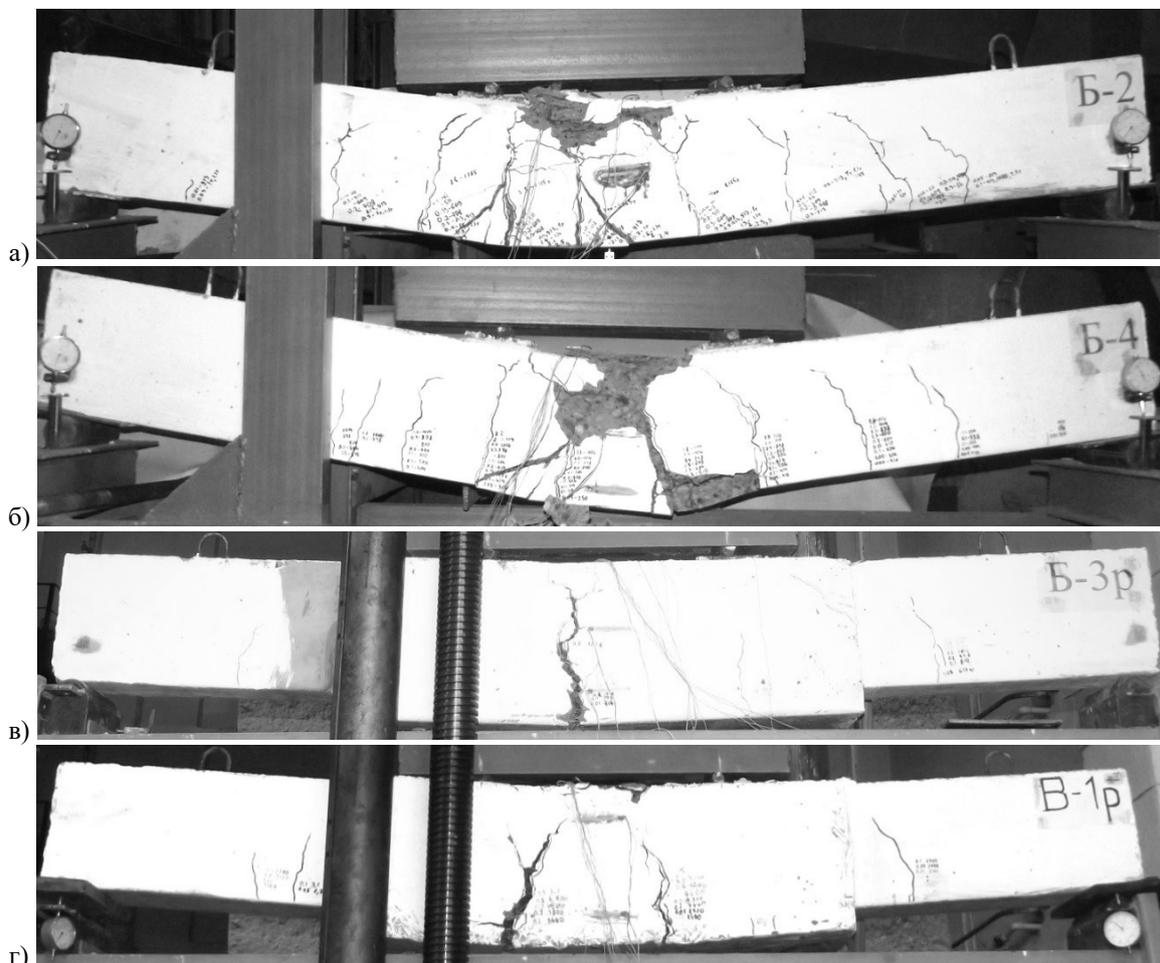


Рис. 5. Шероховатая поверхность усиленной балки

Результаты натурального испытания.

По результатам испытаний установлено, что все образцы разрушились по нормальному сечению вследствие образования вертикальных

трещин и достижения напряжений в арматуре предела текучести. Картина разрушенных образцов показана на рис. 6.

Рис. 6. Образцы после разрушения
а), б) 1-ой серии, в), г) 2-ой серии

Первые трещины в контрольных образцах появились при нагрузке, поданной прессом, $P_{crc}=1$ тс, разрушающая нагрузка составила $P_{ult}=4,8$ тс. График прогиба балок показан на рис. 7.

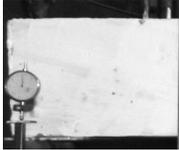
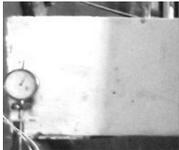
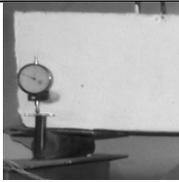
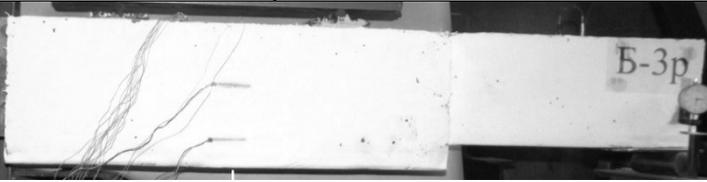
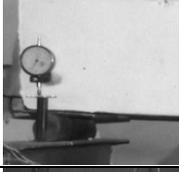
Первые трещины на поверхности бетона для усиленной балки Б-3р появились при нагрузке, поданной прессом, 2,468 тс, на поверхности СФБ рубашки при нагрузке 2,868 тс. Для балки В-1р на поверхности бетона при – 1,352 тс, на

поверхности рубашки при – 2,452 тс. Разрушающая нагрузка для балки Б-3р составила 5,84 тс, для Б-1р – 5,45 тс. График прогиба балок показан на рис. 7.

Картина развития трещин для балок 1 и 2 серии показана в табл. 2.

Таблица 2

Картина развития трещин

| Нагрузка | Балки 1-ой серии | |
|---|---|--|
| I стадия до $P_{crc,b} = 0,2 * P_{ult}$ |  |  |
| II стадия до P_{ult} |  |  |
| III стадия $P_{ult} = 4,8$ тс |  |  |
| Нагрузка | Балки 2-ой серии | |
| I стадия до $P_{crc,b}^* = 0,278 * P_{ult}$ |  |  |
| II стадия до $P_{crc,fb}^* = 0,62 * P_{ult}$ |  |  |
| III стадия до P_{ult} |  |  |
| IV стадия $P_{ult} = 5,84$ тс |  |  |

Примечание: $P_{crc,b}^*$ – нагрузка появления псевдопластических деформаций в бетоне (основной части балки) вследствие трещинообразования; $P_{crc,fb}^*$ – нагрузка появления трещин в СТФ рубашке.

По мере нагружения нарушение совместной работы СФБ рубашки и железобетонной балки не наблюдалось до нагрузки близкой к разрушающей $0,93P_{ult}$. При этом в работе усиленной конструкции выявлены 4 характерные стадии, что совпало с результатами компьютерного моделирования [20]:

I стадия – упругая работа – линейная зависимость между внешними и внутренними

усилиями, заканчивается стадией Ia, при которой эпюра напряжений в растянутой зоне бетона искривляется;

II – неупругая работа – появление и развитие псевдопластических деформаций в бетоне (основной части балки) вследствие микротрещинообразования, дальнейшее накопление повреждений в материале – нарушение линейной зависимости;

III – появление и развитие видимых трещин в СТФ рубашке;
 IV – стадия разрушения – потеря несущей способности балки при достижении предела текучести арматуры.

Несущая способность балок, усиленных СФБ, увеличивается в 1,2 раза (рис. 7).

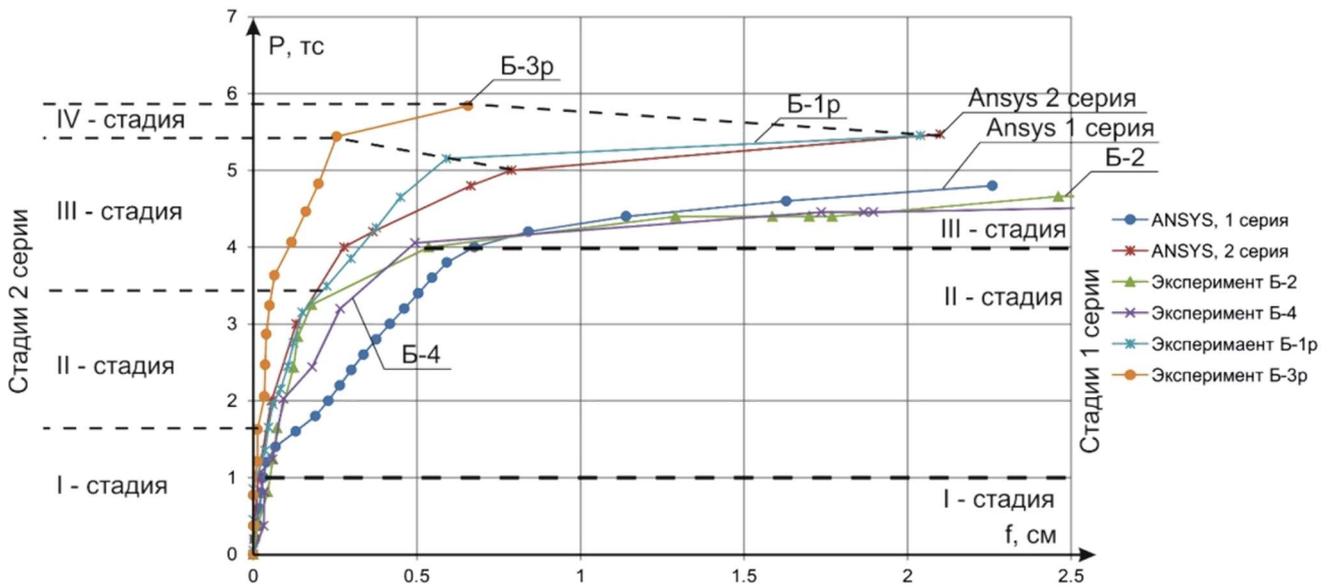


Рис. 7. График «прогиб – нагрузка»

На рис. 8 приведена ширина раскрытия трещины, по которой произошло разрушение, для всех балок.

Напряжения в арматуре в середине пролёта показаны на рис. 9. Эпюры напряжения в бетоне, СФБ в нормальном сечении показаны на рис. 10–12.

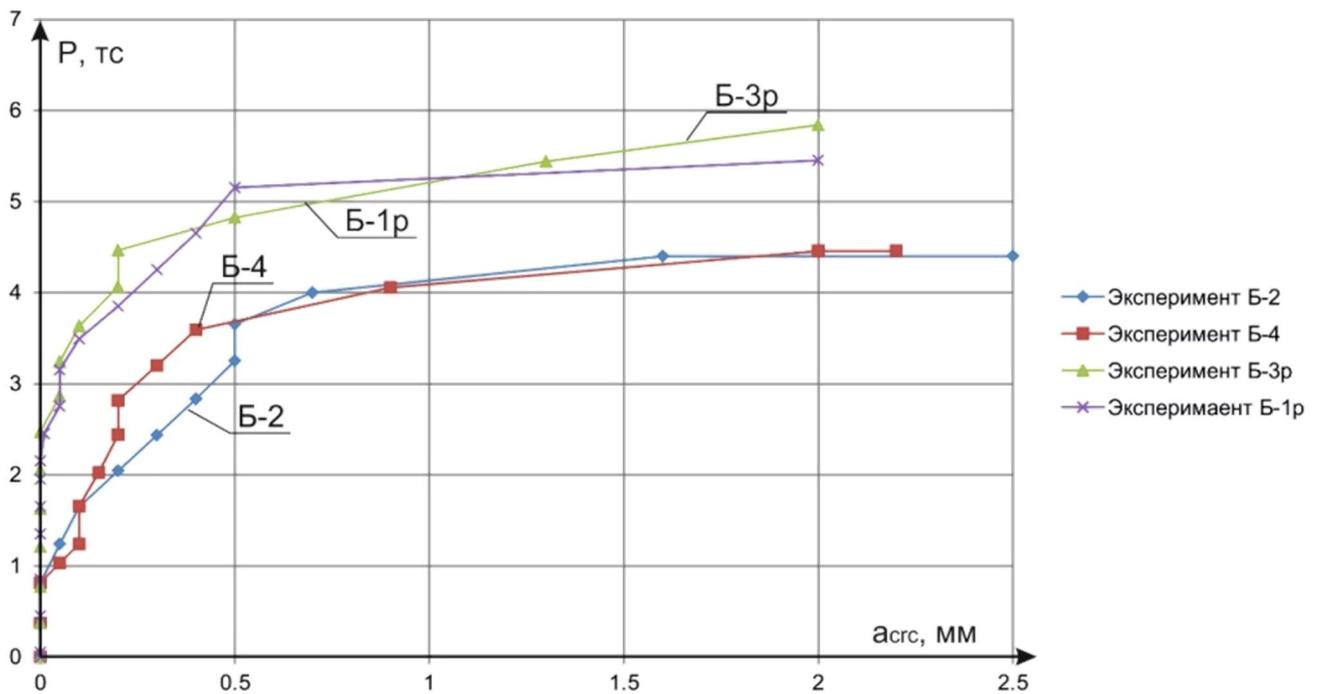


Рис. 8. График «Ширина раскрытия трещины – нагрузка»

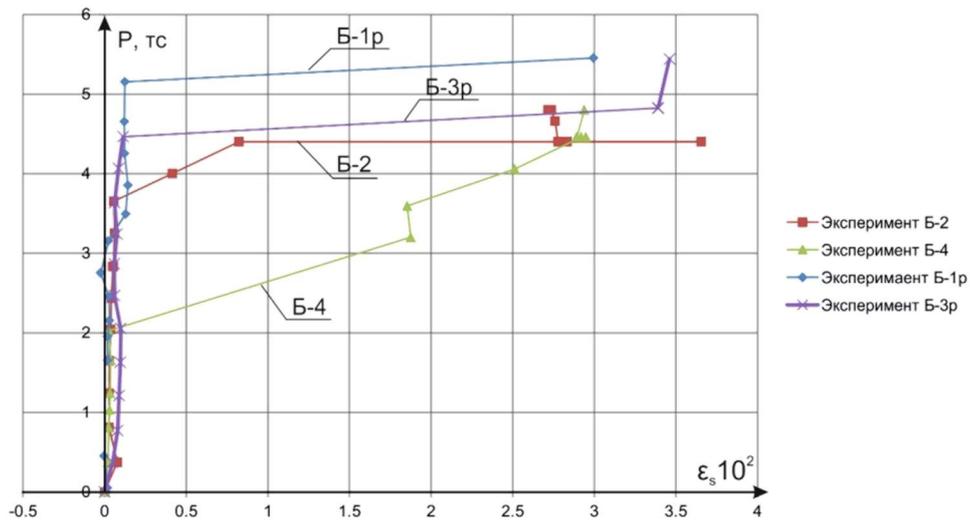


Рис. 9. График «Деформации в арматуре – нагрузка»

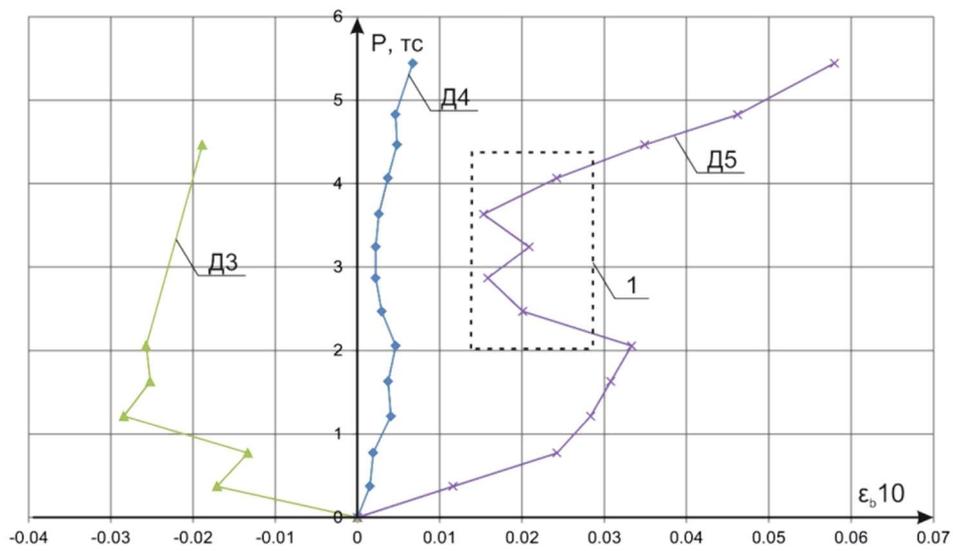


Рис. 10. График «Деформации в бетоне – нагрузка» для балок 2 серии: 1 – этап включения рубашки в работу после образования трещин в бетоне усиленной балки

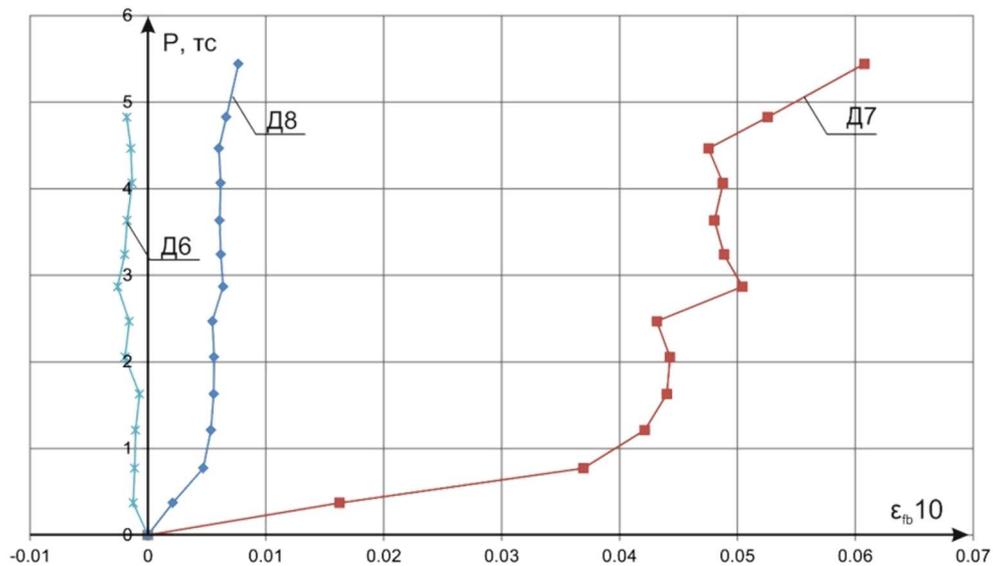


Рис. 11. График «Деформации в СФБ – нагрузка» для балок 2 серии

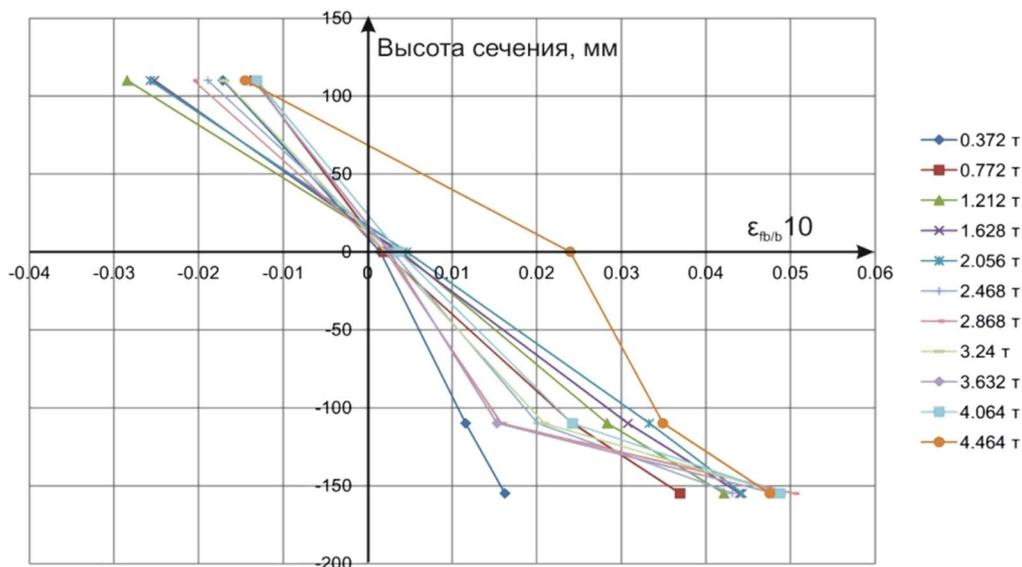


Рис. 12. Эпюры продольных деформаций в бетоне для балок 2 серии в нормальном сечении по мере нагружения

Выводы:

1. Установлено, что применение СФБ рубашки увеличивает разрушающую нагрузку на 20 %, жёсткость от 3,4 до 11 раз (в зависимости от уровня нагрузки), нагрузку появления трещин с 1 тс до 2,4–2,8 тс, нагрузку при допустимом раскрытии трещин $a_{cr,ult}=0,3$ мм (из условия ограничения проницаемости при непродолжительном раскрытии трещин) с 2,436 тс до 4,252 тс. Уменьшает количество трещин более чем в 2 раза, ширину раскрытия трещин (при нагрузке $0,85P_{ult}$ с 0,9 мм до 0,4 мм). Усиление сталефибробетоном наиболее целесообразно в средах с высокой влажностью и коррозионной активностью, а также в пожароопасных условиях, где применение традиционных способов усиления из металлических элементов сопряжено с дополнительными затратами по их защите.

2. Выполнено сравнение полученных результатов с компьютерным моделированием в ПК ANSYS: расхождение нагрузки трещинообразования, разрушения и значения прогибов для натуральных образцов и компьютерной модели находятся в пределах 6,3 %, что говорит о достоверности численных результатов и о возможности применения предложенных компьютерных моделей в дальнейших исследованиях по теме статьи.

3. Установлены 4 характерные стадии работы усиленных балок, что совпало с результатами ранее проведённого компьютерного моделирования [20].

4. Выявлено, что отслоение рубашки от железобетонных балок происходило при нагрузке близкой к разрушающей ($0,93P_{ult}$). Поэтому создание шероховатости на бетонной

поверхности усиленных балок обеспечивает их хорошее сцепление с рубашкой.

5. При появлении трещин в СФБ рубашке эпюра деформаций в нормальном сечении искривляется, что говорит о нарушении гипотезы плоских сечений. Поэтому в случае её использования в расчётных методиках необходимо вводить поправки.

Заключение. С помощью физического эксперимента удалось изучить совместную работу сталефибробетонных (СФБ) рубашек усиления и железобетонных балок на всех стадиях нагружения. Полученные опытные данные будут использованы при разработке программы физического эксперимента – с целью изучения влияния различных деформационных свойств «старого» бетона конструкции и «нового» сталефибробетона усиления, степени начальной нагрузки усиливаемой балки, а также для разработки методики расчёта и рекомендаций по усилению железобетонных балок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Двенадцатый ежегодный статистический отчет по обрушениям от ГЦЭ (с мая 2017 по май 2018) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gce.ru/press/otchet/> (дата обращения 28.03.2019).
2. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) // Materials and Structures. 2014. No 47(3). Pp. 475–491.
3. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behaviour of Ultra –High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars

(RUHPFRC) // International Journal of Fatigue. 2014. No 59. Pp. 145–152.

4. Martín-Sanz H., Chatzi E., Brühwiler E. The use of ultra-high performance fiber reinforced cement-based composites in rehabilitation projects // A Review: dig. of art. 9th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FRAMCOS-9). Berkeley California. 2016. Pp. 221.

5. Hussein L., Amleh L. Structural Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete-Normal Strength Concrete or High Strength Concrete Composite Members // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 1105–1116.

6. Habel K., Denarié E., Bruhwiler E. Experimental Investigation of Composite Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members // ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. Pp. 10–20.

7. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and Repair of RC Beams with Fibre Reinforced Concrete // Cement Concrete Compos. 2010. Vol. 32. Pp. 731–739.

8. Prem P.R., Murthy A.R., Ramesh G., Bharatkumar B.H., Iyer N.R. Flexural Behaviour of Damaged RC Beams Strengthened with Ultra-High Performance Concrete // Advances in Structural Engineering. 2015. Vol. 3. Pp. 2057–2069.

9. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) // Engineering Structures. 2016. Vol. 106. Pp. 370–384.

10. Noshiravani T., Brühwiler E. Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear // ACI Structural Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 251–262.

11. Mohammed T., Abu Bakar B. H., Bunnori, N. M. Torsional Improvement of Reinforced Concrete Beams using Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFC) Jackets –

Experimental Study // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 106. Pp. 533–542.

12. El-Enein H.A., Azimi H., Sennah K., Ghrib F. Flexural strengthening of reinforced concrete slab-column connection using CFRP sheets // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 57. Pp. 126–137.

13. Monti, G., Liotta, M. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear // Construction and Building Materials. 2007. No. 21(4). Pp. 799–809.

14. Rahman S., Molyneux T., Patnaikuni I. Ultra high performance concrete: recent applications and research // Australian Journal of Civil Engineering. 2005. Vol. 2. No. 1. Pp. 13–20.

15. Graybeal B.A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. McLean, Virginia. 2006. Pp. 176.

16. Graybeal B.A., Baby F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. No. 2. Pp. 113–121.

17. Ahlborn T., Harris D. K. Strength and durability characterization of ultra-high performance concrete under variable curing conditions // In Transportation Research Board Annual Meeting. 2011. Vol. 22. No. 51. Pp. 68–75.

18. Tai Y. S., Pan H. H., Kung Y. N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. No. 7. Pp. 2416–2424.

19. Magureanu C., Sosa I., Negrutiu C., Heghes B. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete // Aci Materials Journal. 2012. No 109(2). Pp. 177-184.

20. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной рубашкой, на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS» // Известия КГАСУ. 2017. No. 1. С. 111–120.

Информация об авторах

Радайкин Олег Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». E-mail: olegxxii@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1.

Шарафутдинов Линар Альфредович, аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». E-mail: sh_linar@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1.

Поступила в декабре 2019 г.

© Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А., 2020

*Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: olegxxii@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH STEEL FIBER JACKET

Abstract. The purpose of the study is to experimentally study the joint work of steel fiber reinforced concrete (SFB) reinforcement jacket and reinforced concrete beams at all stages of loading to further develop a methodology for calculating this method of reinforcing bending elements. The main results of the study consist in assessing the strength, stiffness, fracture toughness, as well as the nature of fracture with a picture of the development of cracks for the examined 4 samples (two with a jacket of reinforcement, two – control - without reinforcement). It has been established that the use of SFB jacket with a thickness of 45 mm and with a fiber content percentage of 2,5 % (at a flow rate of 196 kg/m³) increases the breaking load by 20 %, stiffness from 3,4 to 11 times as it is loaded, crack resistance 2,4–2,8 times. The results are compared with computer modeling in ANSYS PC: the discrepancy in the load of crack formation, fracture and deflection values for full-scale samples and a computer model are within 6,3 %, which indicates the reliability of the numerical results and the possibility of using the proposed computer models in further studies on topic of the article.

Keywords: reinforcement, steel fiber reinforced concrete, flexible element, experimental studies, design errors.

REFERENCES

1. Twelfth annual statistical report on collapses from the GCE (from May 2017 to May 2018) [Dvenadcatyj ezhegodnyj statisticheskij otchet po obrusheniyam ot GCE (s maya 2017 po maj 2018)]. URL: <http://www.gce.ru/press/otchet/> (date of treatment: 28.03.2019)
2. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Materials and Structures*. 2014. No. 47(3). Pp. 475–491.
3. Makita T., Brühwiler E. Tensile fatigue behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete combined with steel rebars (RUHPFRC). *International Journal of Fatigue*. 2014. No. 59. Pp. 145–152.
4. Martín-Sanz H., Chatzi E., Brühwiler E. The use of ultra-high performance fiber reinforced cement-based composites in rehabilitation projects. A Review: dig. of art. 9th International conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FRAMCOS-9). Berkeley California. 2016. Pp. 221.
5. Hussein L., Amleh L. Structural Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete-Normal Strength Concrete or High Strength Concrete Composite Members. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. Pp. 1105–1116.
6. Habel K., Denarié E., Bruhwiler E. Experimental Investigation of Composite Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete and Conventional Concrete Members. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. Pp. 10–20.
7. Martinola G., Meda A., Plizzari G. A., Rinaldi Z. Strengthening and Repair of RC Beams with Fibre Reinforced Concrete. *Cement Concrete Compos.* 2010. Vol. 32. Pp.731–739.
8. Prem P.R., Murthy A.R., Ramesh G., Bharatkumar B.H., Iyer N.R. Flexural Behaviour of Damaged RC Beams Strengthened with Ultra-High Performance Concrete. *Advances in Structural Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 2057–2069.
9. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Engineering Structures*. 2016. Vol. 106. Pp. 370–384.
10. Noshiravani T., Brühwiler E. Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear. *ACI Structural Journal*. 2013. Vol. 110. Pp. 251–262.
11. Mohammed T., Abu Bakar B.H., Bunnori, N.M. Torsional Improvement of Reinforced Concrete Beams using Ultra High-Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFC) Jackets – Experimental Study. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 106. Pp. 533–542.
12. El-Enein H.A., Azimi H., Sennah K., Ghrib F. Flexural strengthening of reinforced concrete slab-column connection using CFRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 57. Pp. 126–137.
13. Monti, G., Liotta, M. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear. *Construction and Building Materials*. 2007. No. 21(4). Pp. 799–809.
14. Rahman S., Molyneux T., Patnaikuni I. Ultra high performance concrete: recent applications and research. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2005. Vol. 2. No 1. Pp. 13–20.
15. Graybeal B.A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. McLean, Virginia. 2006. Pp. 176.

16.Graybeal B.A., Baby F. Development of direct tension test method for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*. 2013. Vol. 110. No 2. Pp. 113-121.

17.Ahlborn T., Harris D. K. Strength and durability characterization of ultra-high performance concrete under variable curing conditions. In *Transportation Research Board Annual Meeting*. 2011. Vol. 22. No. 51. Pp. 68–75.

18.Tai Y.S., Pan H.H., Kung Y.N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241. No. 7. Pp. 2416–2424.

19.Magureanu C., Sosa I., Negrutiu C., Heghes B. Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete. *Aci Materials Journal*. 2012. No. 109(2). Pp. 177–184.

20. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. By evaluating the strength, hardness and fracture toughness of bent reinforced-concrete elements, strengthened concrete of steel fiber jacket on the basis of computer modeling in PC «ANSYS» [К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной рубашкой, на основе компьютерного моделирования в ПК «ANSYS»]. *News of the KSUAE*. 2017. No. 1. Pp. 111–120. (rus)

Information about the authors

Radaykin, Oleg V. PhD, Assistant professor. E-mail: olegxxii@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Sharafutdinov, Linar A. Postgraduate student. E-mail: sh_linar@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45

For citation:

Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. Experimental studies of reinforced concrete beams strengthened with steel fiber jacket. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3. Pp. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-34-45