ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 691.32

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.669-679

Влияние анизотропии упругих свойств стеклопластиковой арматуры на прочность сжатых бетонных элементов

М.Г. Плюснин, С.В. Цыбакин

*Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА),
156530, Костромская обл., пос. Караваево, Учебный городок, д. 34*

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на растущий интерес к применению стеклопластиковой арматуры (СПА) в различных бетонных конструкциях, ее использование в сжатой зоне бетона исследовано недостаточно. Применение СПА в сжатых бетонных элементах ограничено сочетанием низкого значения ее модуля упругости и малых предельных деформаций бетона при сжатии. Ряд исследователей предлагают для решения этой проблемы увеличивать предельные деформации бетона за счет поперечного армирования. Однако, в отличие от стальной арматуры, упругие свойства композитной арматуры зависят от направления напряжений, что обусловлено существенным отличием модулей упругости стекловолокна и связующего. Следовательно, напряженно-деформированное состояние (НДС) сжатых бетонных элементов с продольной СПА и часто расположенной поперечной арматурой будет отличаться от НДС аналогичных железобетонных элементов.

Материалы и методы. Для оценки влияния анизотропии упругих свойств СПА на ее работу при сжатии в условиях сдерживания поперечных деформаций бетона были проведены физический эксперимент и численное моделирование в ПК ЛИРА-САПР. Физическая нелинейность материалов в модели не учитывалась.

Результаты. Выполнена оценка влияния анизотропии упругих свойств СПА на прочность сжатых бетонных элементов при продольном армировании. Эксперимент показал, что расположение продольной СПА в сжатой зоне бетона в отсутствие поперечного армирования привело к снижению средней прочности испытанных образцов на 9,2 %, а характер разрушения образцов с СПА отличался от характера разрушения контрольных образцов. В результате численного моделирования выявлено, что причиной снижения прочности служит анизотропия упругих свойств СПА, которая оказывает влияние на НДС бетона при сжатии.

Выводы. Анализ результатов эксперимента и численного моделирования показал, что причиной снижения прочности является низкий модуль упругости СПА при сжатии в поперечном направлении по сравнению с аналогичной характеристикой бетона. Степень снижения прочности также будет зависеть от соотношения модуля упругости бетона и модуля упругости СПА при сжатии в продольном направлении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композитная арматура, прочность на сжатие, модуль упругости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Плюснин М.Г., Цыбакин С.В. Влияние анизотропии упругих свойств стеклопластиковой арматуры на прочность сжатых бетонных элементов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 6. С. 669–679. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.669-679

The effect of anisotropy of elastic properties of GFRP reinforcement on strength of compressed concrete structural elements

Mikhail G. Plyusnin, Sergey V. Tsybakin

*Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA), 34 Uchebniy gorodok, Karavaevo poselok,
Kostroma oblast, 156530, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Despite the growing interest to the use of GFRP reinforcement in various concrete structures, its use in the concrete compressed zone is not investigated sufficiently. The use of GFRP reinforcement in compressed concrete elements is limited by a combination of low value of its modulus of elasticity and small ultimate deformation of concrete during compression. A number of researchers suggest solving this problem by means of increase the ultimate concrete deformation due to lateral reinforcement. However, unlike steel reinforcement, the elastic properties of composite reinforcement depend on the stress direction, which is due to the significant difference between the moduli of elasticity of the fibre glass and the binder. Consequently, the stress-deformation state of compressed concrete elements with longitudinal GFRP reinforcement and close-set lateral reinforcement will differ from the stress-deformation state of steel-reinforced concrete elements.

Materials and methods. To clarify the effect of the anisotropy of fibre-glass reinforcement elastic properties on its work in the concrete compressed zone, a physical experiment and numerical simulation using the LIRA-SAPR software were carried out. Physical nonlinearity of materials was not taken into account in the model.

Results. An assessment of the effect of anisotropy of elastic properties of fibre-glass reinforced plastic (GFRP) reinforcement on the strength of compressed concrete elements was accomplished for longitudinal reinforcement. The experiment showed that the location of the longitudinal GFRP reinforcement in the concrete compressed zone in the absence of lateral reinforcement led to a decrease in the average strength of the tested samples by 9.2 %, while the fracture nature of GFRP-reinforced samples differed from the fracture nature of control samples. As a result of the numerical simulation, it was revealed that the cause of the strength reduction is the anisotropy of the elastic properties of GFRP reinforcement, which affects the stress-deformation state of compressed concrete.

Conclusions. The analysis of the results of experiment and numerical simulation showed that the reason for the decrease in strength is the low modulus of elasticity of GFRP when compressed in the lateral direction as compared with the similar characteristic of concrete. The degree of strength reduction will also depend on the relation between the moduli of elasticity of concrete and GFRP when compressed in the longitudinal direction.

KEYWORDS: composite reinforcement, compression strength, modulus of elasticity

FOR CITATION: Plyusnin M.G., Tsybakin S.V. The effect of anisotropy of elastic properties of GFRP reinforcement on strength of compressed concrete structural elements. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(6):669-679. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.669-679

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время при строительстве зданий и сооружений все чаще применяется композитная арматура. Наиболее распространенным ее видом является стеклопластиковая арматура (СПА), что обусловлено ее относительно низкой стоимостью. Существуют нормативные документы, регламентирующие характеристики композитной арматуры¹ и методы расчета бетонных конструкций с применением данной арматуры², а также множество исследований, рассматривающих различные аспекты ее применения [1–20]. Нормы² явно не запрещают применение композитной арматуры в сжатой зоне бетонных конструкций, однако при расчете прочности таких конструкций значение расчетного сопротивления композитной арматуры на сжатие принимается равным нулю. Конструктивные требования, перечисленные в СП 63.13330.2012² не содержат особых указаний об использовании композитной арматуры в сжатой зоне бетонных элементов.

Анализ имеющихся публикаций показал, что в основном исследователями рассматриваются вопросы применения композитной арматуры в растянутой зоне изгибаемых элементов. Особенности работы данной арматуры в центрально и внецентренно сжатых элементах рассмотрены в публикациях [3–5, 9, 17–20]. В этих работах отмечается, что

основным препятствием для применения композитной СПА в качестве рабочей при сжатии является ее низкий модуль упругости, который определяется в основном матрицей из эпоксидной смолы. Это не позволяет реализовать высокие прочностные свойства СПА. По данным, приведенным в труде [3], значение модуля упругости СПА при сжатии варьируется в диапазоне 7,3...29,5 ГПа в зависимости от длины испытуемого образца и способа его закрепления в испытательной машине. В статье [5] приводится значение модуля упругости СПА при сжатии, равное 30 ГПа. В любом случае модуль упругости СПА при продольном сжатии существенно меньше, чем при растяжении, сравним с начальным модулем упругости бетона классов В15...В25 и меньше начального модуля упругости бетонов более высоких классов. Таким образом, напряжения в СПА ограничиваются предельными деформациями бетона при сжатии, равными 0,002 при кратковременном действии нагрузки и 0,0025 при длительном действии нагрузки в соответствии с действующими нормами². При таких деформациях и значении модуля упругости СПА, равном 30 ГПа, напряжения в СПА составят всего 60 МПа при кратковременном действии нагрузки и 75 МПа при длительном действии нагрузки. Для компенсации данного недостатка СПА авторы работ [5, 17–20] предлагают увеличивать количество поперечной арматуры для сдерживания поперечных деформаций и, соответственно, увеличения продольных, что позволит более полно использовать прочностные свойства СПА при сжатии. Однако в этом случае за счет ограничения поперечных деформаций бетона происходит увеличение усилия обжатия продольной композит-

¹ ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия.

² СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. (с Изменениями № 1, 2).

ной арматуры в поперечном направлении. При этом из-за того, что армирующие волокна в арматуре направлены вдоль ее оси, поперечные напряжения будут восприниматься в большей степени связующим, модуль упругости которого по данным [13] составляет 2,5...4,1 ГПа, что существенно ниже начального модуля упругости бетона. Таким образом, анизотропия упругих свойств СПА может оказать влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) бетона в условиях ограничения поперечных деформаций и повлиять на прочность армированных данной арматурой сжатых бетонных элементов. При этом действующий ГОСТ¹ по композитной арматуре нормирует только модуль упругости при растяжении. Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение анизотропии модуля упругости СПА при сжатии и оценка ее влияния на прочность армированных данной арматурой сжатых бетонных элементов в условиях сдерживания поперечных деформаций.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Экспериментальное исследование НДС бетона и продольной арматуры непосредственно внутри замкнутых хомутов из поперечной арматуры затруднено. Это требует наличия дорогостоящей аппаратуры и изготовления сложных в изготовлении образцов. Однако существует достаточно простой способ моделирования НДС в условиях ограничения поперечных деформаций. Общеизвестно, что при стандартных испытаниях бетонных образцов на прочность при сжатии на гранях, контактирующих с плитами испытательного пресса, возникают силы трения, которые сдерживают поперечные деформации бетона аналогично косвенному армированию. Это является причиной снижения призменной прочности бетона по сравнению с его кубиковой прочностью. Таким образом, НДС бетона и СПА в областях стандартного кубического образца, расположенных рядом с плитами пресса будет схоже с НДС внутри сжатого армированного образца с часто расположенными замкнутыми хомутами поперечной

арматуры. При этом после разрушения образца его грань, которая находилась в контакте с плитой прессы, может быть исследована визуально. В сочетании с компьютерным моделированием физического эксперимента это позволит достичь поставленной цели без использования сложной экспериментальной установки и измерения деформаций.

Исходя из вышесказанного, для оценки влияния анизотропии модуля упругости СПА на прочность сжатых бетонных элементов с продольным армированием был проведен эксперимент с кубическими образцами размером 100 × 100 × 100 мм из бетона В15. Для уменьшения разброса прочностных и деформационных характеристик образцов все они были изготовлены из одного замеса в количестве 8 штук. Четыре из них — контрольные, а другие четыре были армированы одним стержнем СПА АСК диаметром 6 мм, размещенным продольно посередине образца. Необходимое положение стержня СПА обеспечивалось за счет двух растяжек из вязальной проволоки диаметром 1 мм, которые располагались у граней куба. После выдержки образцов в нормальных условиях твердения в течение 28 суток они были испытаны на прочность при сжатии.

Параллельно с физическим экспериментом в ПК ЛИРА-САПР было проведено численное моделирование данного эксперимента, физическая нелинейность материалов не учитывалась. Была сформирована модель испытанного образца со стержнем СПА посередине. Граничные условия соответствовали процессу испытания образца на прессе. Нижняя грань образца закреплялась по осям X , Y и Z . Верхней грани задавалось фиксированное перемещение по оси Z на 0,5 мм и закрепление по осям X , Y . Силы трения имитировались запрещением перемещений по осям X и Y . Модуль упругости бетона принят равным 30 ГПа. Модули упругости арматуры приняты разными в продольном и поперечном направлениях. Значения модуля упругости СПА при сжатии в продольном направлении определены исходя из данных, приведенных в трудах [3, 5]. Значение модуля упругости СПА в поперечном направлении принято по данным работы [13] равным 4 ГПа. В качестве контрольного рассчитан случай,

Табл. 1. Сочетания продольного и поперечного модуля упругости СПА при численном моделировании

Table 1. Combinations of longitudinal and lateral modulus of elasticity of GFRP reinforcement for numerical simulation

№ п/п / Item number	Модуль упругости при сжатии в продольном направлении, ГПа / Modulus of compression at longitudinal direction, GPa	Модуль упругости при сжатии в поперечном направлении, ГПа / Modulus of compression at lateral direction, GPa
1	30	30
2	30	4
3	20	4

когда продольный и поперечный модули упругости арматуры одинаковы и равны 30 ГПа. Сочетания модулей упругости СПА, для которых проводилось численное моделирование, приведены в табл. 1. Так как проанализированные источники информации не содержат достаточной информации об анизотропии коэффициента Пуассона СПА, то значение коэффициента Пуассона СПА было принято одинаковым во всех направлениях и равным 0,2. Таким образом, модель носит качественный характер и с целью упрощения учитывает только анизотропию модуля упругости СПА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты испытаний образцов на прочность при сжатии приведены в табл. 2.

Форма разрушения всех образцов соответствовала удовлетворительному разрушению образцов кубов по приложению Е ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Средняя прочность образцов с арматурой оказалась меньше на 9,2 %, чем прочность образцов без арматуры. Разрушение всех образцов с арматурой имело одну особенность — радиальные трещины вокруг арматурного стержня на гранях, соприкасавшихся с плитами пресса. Образцы без арматуры трещин на гранях, соприкасавшихся с плитами пресса, не имели. Фотографии образцов с СПА после испытаний приведены на рис. 1 и 2.

Результаты численного моделирования приведены на рис. 3–9. На рис. 3–5 показаны изополя главных напряжений σ_1 в плоскости параллельной осям YOZ и проходящей через ось симметрии образца. Для более подробного анализа НДС в об-

Табл. 2. Результаты испытания образцов на прочность при сжатии

Table 2. Results of sample tests for compression strength

№ п/п / Item number	Прочность армированных образцов, МПа / Strength of reinforced samples, MPa	Прочность неармированных образцов, МПа / Strength of plain samples, MPa
1	16,6	17,3
2	14,5	16,0
3	16,0	19,7
4	16,2	16,5
Среднее значение / Mean value	15,8	17,4

Рис. 1. Образец с СПА после разрушения: на верхней грани видны радиальные трещины, отходящие от арматуры

Fig. 1. Sample with GFRP reinforcement after fracture: radial cracks running off the reinforcement are seen on the upper face

Рис. 2. Образец с СПА после разрушения: на верхней грани видны радиальные трещины, отходящие от арматуры

Fig. 2. Sample with GFRP reinforcement after fracture: radial cracks running off the reinforcement are seen on the upper face

ласти верхней грани в месте контакта с арматурой на рис. 6–9 представлены изополя главных напряжений σ_1 и изополя перемещений вдоль оси Y для фрагмента верхней части модели.

Изополе σ_1 при равных значениях модуля упругости СПА в продольном и поперечном направлении (рис. 3) не отличается от распределения главных напряжений в неармированных бетонных кубах. Изолинии на границе между отрицательными и положительными значениями главных напряжений соответствуют стандартной поверхности разрушения для кубического бетонного образца. На грани образца в месте расположения арматуры значения напряжений максимальны и не имеют резких колебаний. Соответственно, в случае равенства продольного и поперечного модулей упругости СПА при сжатии, предпосылки для возникновения радиальных трещин на грани образца, прилегающего к плите испытательного пресса, отсутствуют. Так как результаты численных исследований с данными деформативными характеристиками не соответствуют результатам эксперимента, то можно с высокой

долей вероятности предположить, что модуль упругости СПА в поперечном направлении существенно меньше модуля упругости СПА при сжатии в продольном направлении.

Результаты численного моделирования при отличающихся друг от друга значениях продольного и поперечного модуля упругости СПА (рис. 4–9) имеют ряд особенностей:

1. Главные напряжения σ_1 имеют локальный минимум в месте расположения арматуры (рис. 4–7), очертания изополей на верхней грани модели соответствуют месту возникновения радиальных трещин при испытании реальных образцов.

2. В отличие от распределения напряжений для неармированного образца в средней части модели рядом с арматурой образуются зоны с локальным изменением характера деформаций (рис. 8, 9), которые так же соответствуют зонам возникновения радиальных трещин при испытании образцов.

3. Численный эксперимент показал, что уменьшение модуля упругости арматуры при поперечном сжатии относительно модуля упругости бетона спо-

ЛИТЕРА

Загрузка 1

Изополя главных напряжений N1

Средний слой

Единицы измерения — МН/м²

LETTER

Loading 1

Isofields of N1 principal stresses

Middle layer

Measurement unit is MN/m² (MPa)

Рис. 3. Изополе σ_1 при продольном и поперечном модуле упругости СПА, равным 30 ГПа

Fig. 3. Isofield σ_1 for GFRP reinforcement longitudinal and lateral modulus of elasticity equal to 30 GPa

ЛИТЕРА
Загрузка 1
Изополя главных напряжений N1
Средний слой
Единицы измерения — МН/м²

LETTER
Loading 1
Isofields of N1 principal stresses
Middle layer
Measurement unit is MN/m² (MPa)

Рис. 4. Изополе σ_1 при продольном модуле упругости СПА 30 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа

Fig. 4. Isofield σ_1 for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 30 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa

ЛИТЕРА
Загрузка 1
Изополя главных напряжений N1
Средний слой
Единицы измерения — МН/м²

LETTER
Loading 1
Isofields of N1 principal stresses
Middle layer
Measurement unit is MN/m² (MPa)

Рис. 5. Изополе σ_1 при продольном модуле упругости СПА 20 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа

Fig. 5. Isofield σ_1 for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 20 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa

Рис. 6. Изополе σ_1 при продольном модуле упругости СПА 30 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа: фрагмент модели

Fig. 6. Isofield σ_1 for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 30 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa: a fragment of model

Рис. 7. Изополе σ_1 при продольном модуле упругости СПА 20 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа: фрагмент модели

Fig. 7. Isofield σ_1 for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 20 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa: a fragment of model

ЛИТЕРА

Загружение 1

Изополя перемещений по $Y(G)$

Средний слой

Единицы измерения — мм

LETTER

Loading 1

Isofields of displacements along $Y(G)$ axis

Middle layer

Measurement unit is mm

Рис. 8. Изополе перемещений по оси Y при продольном модуле упругости СПА 30 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа: фрагмент модели

Fig. 8. Isofield of displacements along Y axis for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 30 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa: a fragment of model

ЛИТЕРА

Загружение 1

Изополя перемещений по $Y(G)$

Средний слой

Единицы измерения — мм

LETTER

Loading 1

Isofields of displacements along $Y(G)$ axis

Middle layer

Measurement unit is mm

Рис. 9. Изополе перемещений по оси Y при продольном модуле упругости СПА 20 ГПа, поперечном модуле упругости СПА 4 ГПа: фрагмент модели

Fig. 9. Isofield of displacements along Y axis for GFRP reinforcement longitudinal modulus of elasticity equal to 20 GPa and lateral modulus of elasticity equal to 4 GPa: a fragment of model

способствует поперечным растягивающим деформациям бетона в месте расположения арматуры и приводит к появлению радиальных трещин на верхней грани образца, выявленных в результате физического эксперимента. Об этом свидетельствует увеличение разницы между максимальными и минимальными значениями σ_1 (рис. 6, 7) и возникновение рядом с СПА областей с изменением направления перемещений в бетоне и арматуре (рис. 9).

Таким образом, причиной снижения прочности образцов при сжатии, выявленной при испытаниях, является наличие в бетоне менее упругой в продольном направлении СПА. В целом результаты численного моделирования при отличающихся друг от друга значениях продольного и поперечного модуля упругости СПА совпадают с характером разрушения образцов, полученных в результате эксперимента, и подтверждают влияние анизотропии упругих свойств СПА на прочность сжатых бетонных элементов, армированных данной арматурой. Соответственно, данная особенность композитной арматуры, не только СПА, но и других ее видов, должна быть учтена при разработке методик расчета сжатых бетонных элементов с ее использованием.

ВЫВОДЫ

1. СПА имеет различные модули упругости при сжатии в продольном и поперечном направлении. Данное свойство обусловлено технологией изготовления и присуще всем видам композитной арматуры.

2. В результате экспериментов и численного моделирования выявлено влияние анизотропии упругих свойств СПА на НДС армированных ею бетонных элементов.

3. Низкое значение модуля упругости СПА в поперечном направлении по сравнению со значением модуля упругости бетона увеличивает риск образования трещин в бетоне на границах с арматурой и приводит к снижению прочности сжатых бетонных элементов армированных СПА.

4. Снижение модуля упругости СПА при сжатии по сравнению с модулем упругости бетона вызывает снижение прочности сжатых бетонных элементов армированных СПА.

5. Анизотропия упругих свойств СПА должна учитываться при разработке методики расчета сжатых бетонных элементов армированных данной арматурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Староверов В.Д., Бароев Р.В., Цурупа А.А., Кристалевич А.К. Композитная арматура: проблемы применения // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 171–178.
2. Николаев В.Н., Степанова В.Ф. Применение композитной полимерной арматуры для опор контактной сети с анкерным креплением на фундаментах // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 79–84.
3. Лапишинов А.Е. Исследование работы СПА и БПА на сжатие // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 52–57. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.52-57
4. Лапишинов А.Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 96–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.10.96-105
5. Лапишинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 20–30.
6. Борисова Т.А., Зиннуров Т.А., Куклин А.Н. Исследование влияния температурного воздействия на работу стеклопластиковой арматуры в бетонных конструкциях // Известия Казанского государственного

архитектурно-строительного университета. 2018. № 2 (44). С. 136–144.

7. Баталова Н.А. Применение стеклопластиковой арматуры в строительстве, преимущества и недостатки в сравнении со стальной // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. 2016. № 5 (27). С. 23–26.

8. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22–26.

9. Плевков В.С., Балдин И.В., Кудяков К.Л., Невский А.В. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5 (58). С. 91–101.

10. Бенин А.В., Семенов С.Г. Особенности испытаний композитной полимерной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 42–46.

11. Сапунова А.А., Плюснин М.Г. Оценка минимального процента армирования изгибаемого бетонного элемента прямоугольного сечения при использовании композитной арматуры // Актуальные

проблемы науки в агропромышленном комплексе : сб. ст. 68-й Междунар. науч.-практ. конф. в 3-х т. 2017. С. 42–46.

12. Olczyk N., Błyszko J., Techman M., Zielinski A. Stress analysis of slabs reinforced with GFRP rebar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471 (3). P. 032056. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032056

13. Kosior-Kazberuk M., Wasilczyk R. Influence of static long-term loads and cyclic freezing/thawing on the behaviour of concrete beams reinforced with BFRP and HFRP bars // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 174. P. 04013. DOI: 10.1051/mateconf/201817404013

14. Shahad AbdulAdheem Jabbar, Saad B.H. Farid. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures // Karbala International Journal of Modern Science. 2018. Vol. 4. Issue 2. Pp. 216–227. DOI: 10.1016/j.kijoms.2018.02.002

15. Ahmed El Refai, Farid Abed, Abdullah Al-Rahmani. Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. Pp. 518–529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.063

16. Benmokrane B., Chaallal O., Masmoudi R. Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete

structures // Construction and Building Materials. 1995. Vol. 9. Issue 6. 1995. Pp. 353–364. DOI: 10.1016/0950-0618(95)00048-8

17. AlAjarmeh O.S., Manalo A.C., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P., Nguyen K.T.Q. Compressive behavior of axially loaded circular hollow concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 194. Pp. 12–23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.016

18. Karim H., Sheikh M.N., Hadi M.N.S. Axial load-axial deformation behaviour of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and helices // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 1147–1157. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.219

19. Khorramian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading // Engineering Structures. 2017. Vol. 151. Pp. 761–773. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.064

20. Hadhood A., Mohamed H.M., Ghrib F., Benmokrane B. Efficiency of glass-fiber reinforced-polymer (GFRP) discrete hoops and bars in concrete columns under combined axial and flexural loads // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 114. Pp. 223–236. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.063

Поступила в редакцию 25 марта 2019 г.

Принята в доработанном виде 2 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 27 мая 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Плюснин Михаил Геннадиевич** — старший преподаватель кафедры строительных конструкций, заведующий лабораторией лицензирования строительных материалов, **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА)**, 156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34, apraiser3@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-1007-7186;

Цыбакин Сергей Валерьевич — кандидат технических наук, доцент, декан архитектурно-строительного факультета, **Костромская государственная сельскохозяйственная академия (Костромская ГСХА)**, 156530, Костромская обл., пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34, sv44kostroma@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-5924-5406.

REFERENCES

1. Staroverov V.D., Baroev R.V., Tsurupa A.A., Krishtalevich A.K. Fiber-reinforced polymer reinforcement: the problems of application. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 3(50):171-178. (rus.).
2. Nikolayev V.N., Stepanova V.F. Application of composite polymeric reinforcement for supports of the contact network with anchorage on the foundations. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:79-84. (rus.).
3. Lapshinov A.Ye. Study of the work of SPA and BPA on compression. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:52-57. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.1.52-57 (rus.).

4. Lapshinov A.Ye. Prospects of potential application of non-metallic FRP reinforcement in frp-reinforced concrete compressive members as main longitudinal non-prestressed reinforcement. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:52-57. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.10.96-105 (rus.).
5. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. To the influence of transverse reinforcement to strength and deformability of concrete compressive members reinforced with FRP reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2018; 78(4): 20-30. (rus.).

6. Borisova T.A., Zinnurov T.A., Kuklin A.N. Investigation of the influence of temperature impact on the work of fiberglass reinforcement in concrete structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 2(44):136-144. (rus.).
7. Batalova N.A. The use of glass-fiber reinforcement in construction industry, advantages and limitations compared with steel. *Modern science: current problems and solutions*. 2016; 5(27):23-26. (rus.).
8. Rimshin V.I., Merkulov S.I. About normalization of characteristics of rod non-metallic composite reinforcement. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 5:22-26. (rus.).
9. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskij A.V. Strength and deformability of polymer composites under tensile and compressive loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; 5(58):91-101. (rus.).
10. Benin A.V., Semenov S.G. Peculiarities of composite polymeric bars tests. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 9:42-46. (rus.).
11. Sapunova A.A., Plyusnin M.G. The value of minimum reinforcement ratio for flexible concrete member with rectangular cross section in using composite reinforcement. *Actual problems of science in the agro-industrial complex : collection of articles of the 68th international scientific-practical conference in three volumes*. 2017; 42-46. (rus.).
12. Olczyk N., Błyszko J., Techman M., Zielinski A. Stress analysis of slabs reinforced with GFRP rebar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471(3):032056. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032056
13. Kosior-Kazberuk M., Wasilczyk R. Influence of static long-term loads and cyclic freezing/thawing on the behaviour of concrete beams reinforced with BFRP and HFRP bars. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 174:04013. DOI: 10.1051/mateconf/201817404013
14. Shahad AbdulAdheem Jabbar, Saad B.H. Farid. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. *Karbala International Journal of Modern Science*. 2018; 4(2):216-227. DOI: 10.1016/j.kijoms.2018.02.002
15. Ahmed El Refai, Farid Abed, Abdullah Al-Rahmani. Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. *Construction and Building Materials*. 2015; 96:518-529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.063
16. Benmokrane B., Chaallal O., Masmoudi R. Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 1995; 9(6):353-364. DOI: 10.1016/0950-0618(95)00048-8
17. AlAjarmeh O.S., Manalo A.C., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P., Nguyen K.T.Q. Compressive behavior of axially loaded circular hollow concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals. *Construction and Building Materials*. 2019; 194:12-23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.016
18. Karim H., Sheikh M.N., Hadi M.N.S. Axial load-axial deformation behaviour of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and helices. *Construction and Building Materials*. 2016; 112:1147-1157. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.219
19. Khorramian K., Sadeghian P. Experimental and analytical behavior of short concrete columns reinforced with GFRP bars under eccentric loading. *Engineering Structures*. 2017; 151:761-773. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.064
20. Hadhood A., Mohamed H.M., Ghrib F., Benmokrane B. Efficiency of glass-fiber reinforced-polymer (GFRP) discrete hoops and bars in concrete columns under combined axial and flexural loads. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 114:223-236. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.063

Received March 25, 2019

Adopted in a modified form on April 2, 2019

Approved for publication May 27, 2019

B I O N O T E S : **Mikhail G. Plyusnin** — senior lecturer of the Department of building structures, Head of the laboratory of licensing of building materials, **Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA)**, 34 Training camp, settlement Karavaevo, Kostroma region, 156530, Russian Federation, apraiser3@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-1007-7186;

Sergey V. Tsybakin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, **Kostroma State Agricultural Academy (Kostroma SAA)**, 34 Training camp, settlement Karavaevo, Kostroma region, 156530, Russian Federation, sv44kostroma@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-5924-5406.