
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 5–17.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (7): 5–17.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 624.012.35:69.058.2

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-5-17

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЫСОКОПРОЧНЫМ БЕТОНОМ В СЖАТОЙ ЗОНЕ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ АРМАТУРОЙ

Юрий Федорович Рогатнев, Жереми Минани, Олег Олегович Соколов
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния двухслойных изгибаемых элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне и нижним слоем из бетона В30, армированных композитной полимерной (стеклокомпозитной) продольной арматурой. Анализ экспериментальных данных и численное моделирование позволили выявить напряженно-деформированное состояние и несущую способность элементов. Оценено влияние различных процентов армирования на напряженно-деформированное состояние элементов. Результаты экспериментальных и численных исследований позволили определить, что применение высокопрочного бетона в сжатой зоне элемента позволяет в полной мере использовать механические свойства стеклокомпозитной арматуры.

Ключевые слова: арматура композитная полимерная, стеклокомпозитная арматура, высокопрочный бетон, двухслойный элемент, изгибающий элемент, напряженно-деформированное состояние

Благодарности: экспериментальные исследования, представленные в данной работе, проведены на оборудовании ЦКП имени проф. Ю.М. Борисова ВГТУ, при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 075-15-2021-662.

Для цитирования: Рогатнев Ю.Ф., Минани Ж., Соколов О.О. Исследования напряженно-деформированного состояния двухслойных изгибаемых элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне, армированных стеклокомпозитной продольной арматурой // Известия вузов. Строительство. 2022. № 7. С. 5–17. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-5-17.

Original article

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF TWO-LAYER BENDING ELEMENTS WITH HIGH-STRENGTH CONCRETE IN A COMPRESSED ZONE REINFORCED WITH GLASS-COMPOSITE LONGITUDINAL REINFORCEMENTS

Yuri F. Rogatnev, Jeremie Minani, Oleg O. Sokolov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Experimental studies of the stress-strain state of two-layer bendable elements with high-strength concrete in the compressed zone and a lower layer of concrete B30 reinforced with composite polymer (glass composite) longitudinal reinforcement have been carried out. The analysis of experimental data and numerical modeling made it possible to identify the stress-strain state and the bearing capacity of the elements. The influence of various percentages of reinforcement on the stress-strain state of the elements is estimated. The results of experimental and numerical studies have made it possible to determine that the use of high-strength concrete in the compressed zone of the element allows full use of the mechanical properties of glass-composite reinforcement.

Keywords: composite polymer reinforcement, glass composite reinforcement, high-strength concrete, two-layer element, bendable element, stress-strain state

Acknowledgments: the experimental studies presented in this paper were carried out on the equipment of the CCP named after Prof. Yu.M. Borisov VSTU, with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 075-15-2021-662.

For citation: Rogatnev Yu.F., Minani J., Sokolov O.O. Research of the stress-strain state of two-layer bending elements with high-strength concrete in a compressed zone reinforced with glass-composite longitudinal reinforcements. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (7): 5–17. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-763-7-5-17.

Введение. Проведен анализ ряда исследований, в которых даны рекомендации по использованию стеклокомпозитной арматуры (ACK). Отмечается, что предел прочности ACK на растяжение в 2,5 раза выше, чем у стальной арматуры. Однако основным недостатком такой арматуры является ее сравнительно невысокое значение модуля упругости, которое в 3,6 раза меньше, чем у стальной арматуры. Следовательно, изгибаемые элементы, армированные композитной арматурой, имеют повышенную деформативность в сравнении с железобетонными элементами [1–5]. Для изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой, определяющую роль играет критерий относительного прогиба [6–10].

Применение высокопрочного бетона позволяет повысить изгибную жесткость элемента. Применение двухслойных изгибаемых элементов, армированных ACK, имеет смысл, когда нижняя растянутая зона не оказывает влияние на изгибную жесткость и соответственно нецелесообразно использовать в этой части сечения высокопрочный бетон. Поэтому в целях экономии расхода цемента было принято решение применять в нижнем слое бетон класса B30. Поскольку предел прочности бетона на растяжение сравнительно невысок, высокопрочный бетон применяется только в сжатой зоне, и это

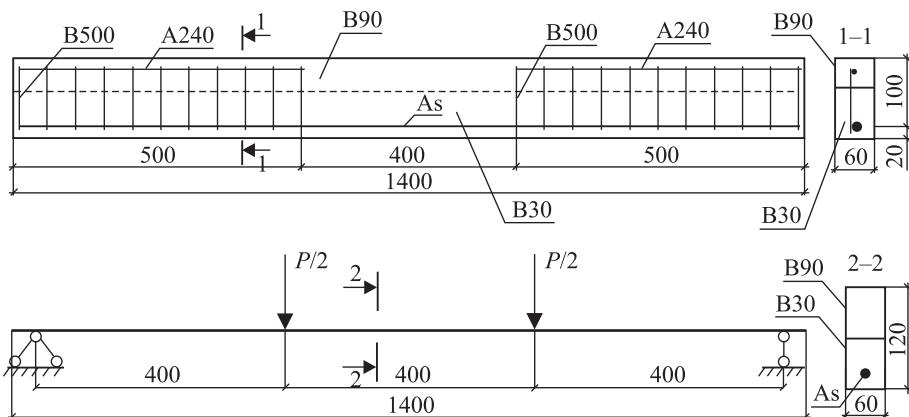


Рис. 1. Геометрические параметры и схема испытания двухслойных балок прямоугольного сечения

Fig. 1. Geometrical parameters and testing scheme of double-layer rectangular beams является значительным экономическим преимуществом использования двухслойных изгибающихся элементов [11–16].

Материалы и методы исследования. Экспериментальные исследования проведены на однопролетных двухслойных элементах прямоугольного сечения. Размер сечения – 60×120 мм, пролет – 1200 мм, общая длина элемента – 1400 мм, высота верхнего слоя из высокопрочного бетона – 60 мм. В качестве поперечной арматуры использована стальная арматура класса В500 диаметром 6 мм. Для объединения арматуры в плоский каркас использована монтажная стальная арматура класса В500 диаметром 6 мм. Соединение поперечной стальной арматуры и продольной арматуры АСК выполнено вязальной проволокой.

Размеры двухслойных изгибающихся элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне, их армирование и схема испытания представлены на рис. 1, геометрические параметры – в табл. 1.

Характеристики механических свойств АСК [17] и бетона приведены в табл. 2 и 3.

Элементы были испытаны на гидравлическом прессе INSTRON-1500 кН кратковременной статической нагрузкой по схеме однопролетной шарнирно

Таблица 1. Геометрические параметры исследуемых двухслойных изгибающихся элементов

Table 1. Geometric parameters of the studied two-layer bendable elements

Шифр образца	h , мм	b , мм	h_0 , мм	$h_{\text{ВПБ}}$	l_0 , мм	d , мм	p_f , %
Б АСК-6-1	120	60	105	60	1200	6	0,45
Б АСК-6-2	120	60	104	60	1200	6	0,45
Б АСК-8-1	120	60	106	60	1200	8	0,80
Б АСК-8-2	120	60	102	60	1200	8	0,80
Б АСК-10-1	120	60	105	60	1200	10	1,25
Б АСК-10-2	120	60	103	60	1200	10	1,25

В табл. 1: h – высота сечения; b – ширина сечения; h_0 – рабочая высота сечения; $h_{\text{ВПБ}}$ – высота слоя высокопрочного бетона; l_0 – пролет элемента; d – диаметр АСК; p_f – процент армирования.

Таблица 2. Механические характеристики АСК

Table 2. Mechanical characteristics of the ASK

Диаметр, мм	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Относительное удлинение
6	1081,7	40300	0,02684
8	1008,2	53300	0,01891
10	930,8	52380	0,01746

Таблица 3. Механические характеристики бетона при сжатии и растяжении

Table 3. Mechanical characteristics of concrete under compression and tension

Класс бетона	При сжатии			При растяжении	
	Призменная прочность на сжатие R_b , МПа	Модуль упругости E_b , МПа	Относительная деформация, соответствующая пределу прочности ε_b	Прочность на растяжение R_{bt} , МПа	Относительная деформация, соответствующая пределу прочности ε_{bt}
B90	67,04	40998	0,00164	5,36	0,00028
B30	22	32500	0,00128	2,68	0,00043

опертой балки. Нагрузка на элементы передавалась через распределительную траверсу. В середине пролета элемента были установлены тензорезисторы. В процессе испытаний фиксировались следующие показатели: значение нагрузки, прогиб элемента в середине пролета, значения продольных деформаций растянутой арматуры и бетона. Схема испытаний элементов приведена на рис. 2.

Численное моделирование двухслойных элементов осуществлено в программном комплексе ANSYS 2021 R2 с расчетной моделью по рис. 3.

Расчет выполнен с учетом физической нелинейности материала. Приняты объемные конечные элементы Solid 65 для моделирования бетона и линейные конечные элементы Beam 188 для моделирования арматуры. Деформированное состояние численной модели соответствовало представлениям о деформированном состоянии изгибаемых элементов (рис. 4).

Результаты и обсуждение. В процессе испытания двухслойных балок со АСК контактная трещина на границе между двумя слоями не возникала.



Рис. 2. Устройство для испытания двухслойных элементов, армированных продольной арматурой из АСК

Fig. 2. Device for testing two-layer elements reinforced with longitudinal reinforcement from ASK

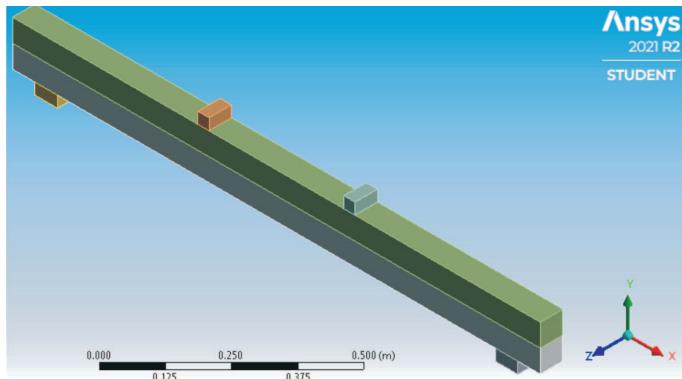


Рис. 3. Общий вид численной модели элемента

Fig. 3. General view of the numerical model of the element

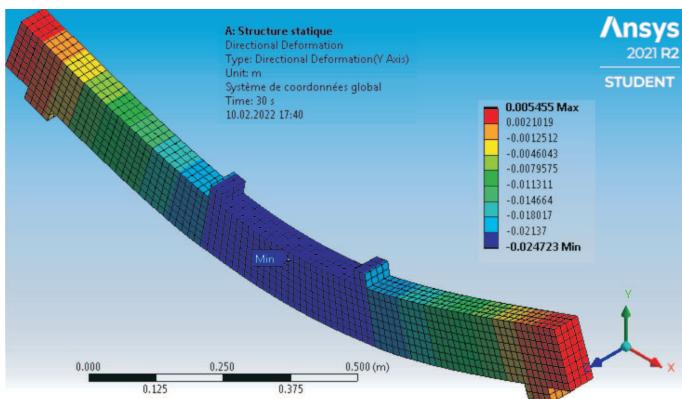


Рис. 4. Вид деформированного состояния численной модели

Fig. 4. View of the deformed state of the numerical model

Нижний слой бетона В30 и верхний слой высокопрочного бетона В90 работали совместно до разрушения.

При испытании элементов с $p_f = 0,45\%$ разрушение происходило по одной из трещин в зоне чистого изгиба.

На рис. 5 показан характер одновременного разрушения растянутой и сжатой зон элементов с $p_f = 0,45\%$.



Рис. 5. Характер разрушения элементов с $p_f = 0,45\%$

Fig. 5. The nature of the destruction of elements with $p_f = 0.45\%$

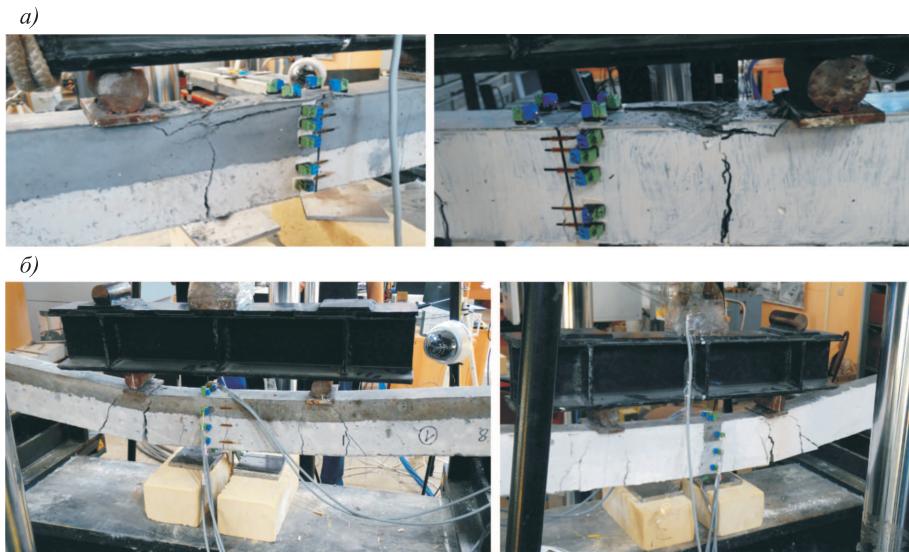


Рис. 6. Характер разрушения элементов с процентами армирования $p_f = 0,8\%$ (а) и $p_f = 1,25\%$ (б)

Fig. 6. The nature of the destruction of elements with a percentage of reinforcement $p_f = 0.8\%$ (a) and $p_f = 1.25\%$ (b)

Разрушение двухслойных балок с процентами армирования $p_f = 0,8\%$ и $p_f = 1,25\%$ происходило по сжатой зоне нормального сечения, в непосредственной близости от точки приложения нагрузки (рис. 6, 7). Разрушение элементов, так же как и элементов с процентом армирования $p_f = 0,45\%$,

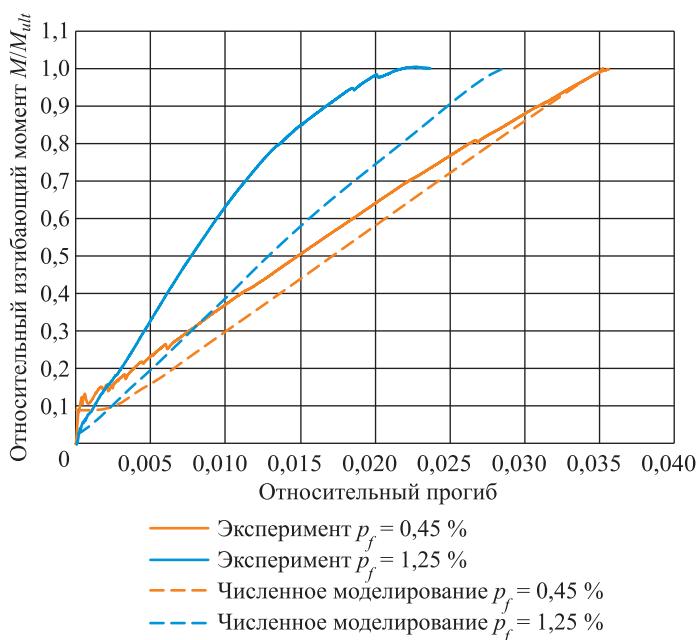


Рис. 7. Зависимость относительных прогибов от изгибающего момента при различных процентах армирования

Fig. 7. The dependence of relative deflections on the bending moment at different percentages of reinforcement

сопровождалось значительной шириной раскрытия нормальных трещин – более 2 мм на уровне продольной арматуры с их развитием по всей высоте элемента. Во всех элементах наблюдались наклонные трещины значительно меньшей ширины, которые, предположительно, вызваны смещением продольной арматуры относительно его первоначального положения.

Полученные экспериментальные и численные данные по несущей способности сечения и прогибам элементов представлены в табл. 4, где $M_{ult, \text{эксп}}$ – экспериментальный предельный изгибающий момент; $M_{ult, \text{ANSYS}}$ – предельный изгибающий момент по ANSYS; $f_{max, \text{эксп}}$ – экспериментальный прогиб при максимальной нагрузке; $f_{max, \text{ANSYS}}$ – прогиб при максимальной нагрузке по ANSYS; x_{cr} – значения высоты сжатой зоны до момента трещинообразования; $x_{ult, \text{эксп}}$ – экспериментальное значение высоты сжатой зоны до момента разрушения элементов; $x_{ult, \text{ANSYS}}$ – численное значение высоты сжатой зоны до момента разрушения элементов.

В силу низкого модуля упругости АСК трещинообразование начиналось на ранних стадиях нагружения. Образование нормальных трещин зафиксировано на уровне, соответствующем 8–17 % от разрушающей нагрузки на элемент. Увеличение ширины раскрытия трещин имеет линейный характер от начала приложения нагрузки до разрушения элемента.

Численные значения несущей способности и прогибов двухслойных изгибаемых элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне и нижним слоем из бетона В30, армированных продольной арматурой АСК, превышали экспериментальные значения. Элементы Б АСК–6–1 и Б АСК–6–2 показали хорошую сходимость экспериментальных и численных результатов – расходления составили не более 6 %.

Для всех элементов значения прогибов при максимальной нагрузке превысили предельное значение 9,75 мм, составляющее 1/123 пролета элемента. Предельные значения прогибов составляют 1/27–1/43 по экспериментальным данным и 1/28–1/36 по результатам расчетов.

Таблица 4. Экспериментальные значения несущей способности, относительного прогиба и высоты сжатой зоны элементов со стеклокомпозитной арматурой

Table 4. Experimental values of bearing capacity, relative deflection and height of the compressed zone of elements with glass composite reinforcement

Шифр образца	Предельный изгибающий момент, кН · м		Относительный прогиб		Относительная высота сжатой зоны		
	$M_{ult, \text{эксп}}$	$M_{ult, \text{ANSYS}}$	$f_{ult, \text{эксп}}/l_0$	$f_{ult, \text{ANSYS}}/l_0$	x_{cr}/h_0	$x_{\text{эксп}}/h_0$	x_{ANSYS}/h_0
Б АСК–6–1	2,92	2,94	0,037	0,035	0,4	0,21	0,15
Б АСК–6–2	2,76	2,94	0,036	0,035	–	–	0,15
Б АСК–8–1	3,08	4,72	0,024	0,028	0,6	0,20	0,30
Б АСК–8–2	3,1	4,72	0,026	0,028	0,5	0,17	0,30
Б АСК–10–1	3,26	6,7	0,026	0,029	0,5	0,15	0,30
Б АСК–10–2	3,72	6,7	0,023	0,029	–	–	0,30

В результате обработки экспериментальных данных получены графики зависимости прогибов (рис. 8), деформаций и напряжений (рис. 9) в нормальном сечении элемента с процентом армирования $p_f = 0,8\%$ от изгибающего момента.

В момент трещинообразования (M_{crc}), благодаря высокой частоте снятия показаний относительных деформаций, выявлен характер изменения деформированного состояния элемента (см. рис. 8).

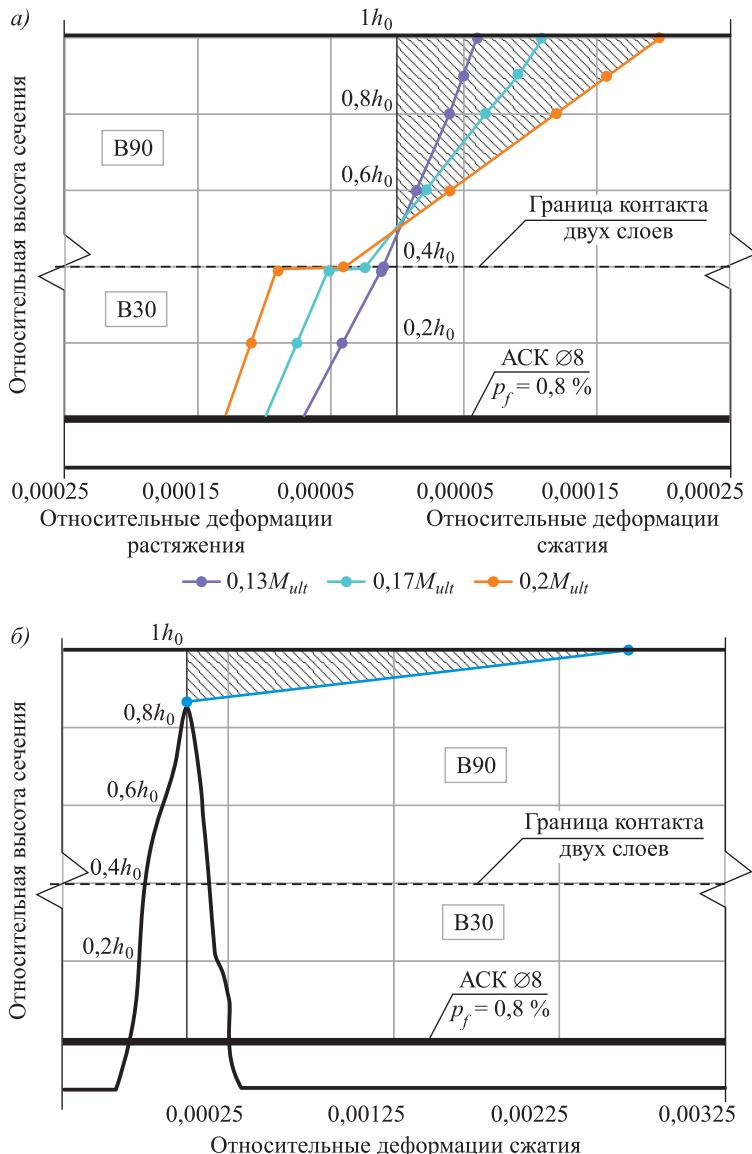


Рис. 8. Зависимость от изгибающего момента относительных деформаций в нормальном сечении элемента в момент образования поперечных трещин (а) и при предельном изгибающем моменте (б)

Fig. 8. Dependence on the bending moment of relative deformations in the normal section of the element at the moment of formation of transverse cracks (a) and at the limiting bending moment (b)

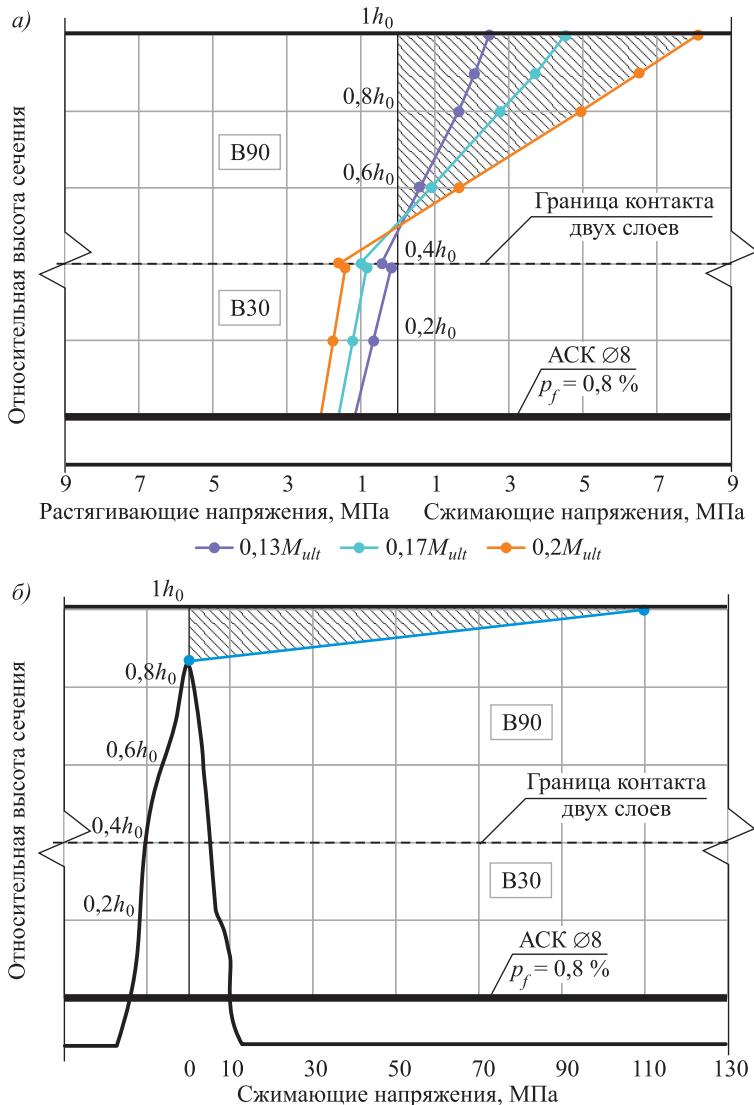


Рис. 9. Зависимость от изгибающего момента напряженного состояния нормального сечения элемента в момент образования поперечных трещин (а) и при предельном изгибающем моменте (б)

Fig. 9. Dependence on the bending moment of the stress state of the normal section of the element at the moment of formation of transverse cracks (a) and at the limiting bending moment (b)

Установлено, что до значения изгибающего момента $0,13M_{ult}$ сохраняется линейный закон распределения относительных деформаций – как для каждого отдельно взятого слоя, так и для всего элемента в целом. При значении изгибающего момента $0,64M_{cr}$ происходит неравномерное перераспределение напряжений и деформаций без нарушения контакта из-за различных деформативных и прочностных характеристик материалов слоев. В [18] возникновение такого перераспределения в составных конструкциях объясняется разномодульностью материалов. Значение растягивающего напряжения в нижнем слое бетона на уровне продольной арматуры составляет $0,67R_{b,t}$,

что соответствует значению, при котором происходит начало микротрецинообразования и, следовательно, отклонение от начального модуля упругости. В связи с этим полученный характер перераспределения напряжений и деформаций и его развитие можно объяснить различными деформативными и прочностными свойствами материалов двух слоев и микроразрушениями в нижнем слое.

Фактические и вычисленные значения высоты сжатой зоны при предельном изгибающем моменте приведены в табл. 4. По данным [19, 20], для обеспечения максимальной несущей способности двухслойного элемента значение относительной высоты сжатой зоны бетона должно находиться в диапазоне 20–40 %. При различных процентах продольного армирования ($p_f = 0,45; 0,80$ и $1,25\%$) экспериментальные значения относительной высоты сжатой зоны бетона до и после момента образования трещин составляли 38–57 и 13–30 % соответственно. В предельном состоянии относительная высота сжатой зоны бетона по ANSYS 2021 R2 составила 14,3 – 28,6 %. Высота сжатой зоны двухслойных бетонных элементов с арматурой АСК не превышала высоту слоя высокопрочного бетона, т.е. поверхность контакта слоя высокопрочного бетона и обычного бетона находилась в пределах растянутой зоны.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для проверки и уточнения рабочих гипотез, а также при проектировании пролетных строений путепроводов, мостов, производственных зданий и сооружений.

Выводы. 1. Изгибающий момент, при котором элемент достигает предельных прогибов – 1/123 пролета элемента, в соответствии с СП 20.13330. 2016 «Нагрузки и воздействия», составляет 51,8 % от предельного разрушающего момента.

2. При расчете и конструировании двухслойных изгибаемых элементов с высокопрочным бетоном в сжатой зоне, армированных продольной арматурой из АСК, первостепенной задачей является расчет по предельно допустимым относительным прогибам.

Список источников

1. Степанова В.Ф., Степанов А.Ю. Неметаллическая композитная арматура для бетонных конструкций // Научно-технический и производственный журнал. 2013. № 1. С. 45–47.
2. Максимов С.П., Башкова Ю.Б., Микляева Т.А., Максимова А.Е. Пути повышения модуля упругости композитной арматуры // Universum: Технические науки. Электрон. науч. журн. 2015. № 11 (22). С. 1–9.
3. Виноградова Н.А., Теплова Ж.С. Сдерживающие факторы использования композитной арматуры // Молодой ученый. 2016. № 17 (121). С. 31–35.
4. Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Бережной Д.В., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р. О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями // Транспортные сооружения. 2018. № 2 (5). С. 1–18. <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf>
5. Уманский А.М., Беккер А.Т. Применение базальтопластиковой арматуры в конструкциях морских гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. № 6 (282). С. 61–75.

6. Хишиах М., Маилян Д.Р., Польской П.П., Блягоз А.М. Прочность и деформативность изгибаемых элементов из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой // Новые технологии. 2012. № 4. С. 147–152.
7. Дронов А.В., Дрокин С.В., Фролов Н.В. Экспериментальное исследование сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном // Пром. и гражд. стр-во. 2016. № 11. С. 80–83.
8. Гиздатуллин А.Р., Хусаинов Р.Р., Хозин В.Г., Красников Н.М. Прочность и деформативность бетонных конструкций, армированных полимеркомпозитными стержнями // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2. С. 32–41.
9. Ветрова О.А. Экспериментальные исследования деформативности бетонных блоков, армированных композитной арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Vol. 24, № 1. С. 103–114.
10. Аль-ишибаи Карам Али, Ярцев В.П., Першин В.Ф. Армирование бетонных изделий полимерными композиционными материалами: современное состояние и перспективы // Науковедение. 2017. Т. 9, № 6. С. 1–9. <https://naukovedenie.ru/PDF/165TVN617.pdf>
11. Рогатнев Ю.Ф., Потапов Ю.Б., Барабаш Д.Е., Панфилов Д.В., Джавид М.М. Расчет прогибов железобетонных изгибаемых элементов с верхним слоем из высококачественного бетона // Научный вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 26–36.
12. Рогатнев Ю.Ф., Джавид М.М. Экспериментальные исследования прочности нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с арматурой класса А500С // Строительная механика и конструкции. 2014. № 2 (9). С. 73–78.
13. Iskhakov I., Rybakov Y., Holschemacher K. Experimental investigation of continuous two-layer reinforced concrete beams // Structural Concrete. 2017. No. 8. P. 205–215.
14. Iskhakov I., Rybakov Y. Two-layer concrete bridge beams as composite elements // Structural Concrete. 2013. No. 3(14). P. 1–12.
15. Tho V.D., Korol E.A., Vatin N.I., Duc H.M. The stress-strain state of three-layer precast flexural concrete enclosure structures with the contact interlayers // Buildings. 2021. Vol. 88, no. 11. P. 1–17.
16. Eswaramoorthi P., Suresh M. Performance of high strength concrete beam under flexure and shear failure // International Journal of Civil Engineering. 2017. No. 1. P. 261–265.
17. Хорохордин А.М., Усачев А.М., Коротких Д.Н. Сравнительная оценка механических свойств полимерной композитной арматуры // Стройт. материалы. 2018. № 7. С. 71–75.
18. Колчунов В.И., Панченко Л.А. Расчет составных тонкостенных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 1999. 283 с.
19. Iskhakov I., Ribakov Y. A design method for two-layer beams consisting of normal and fibered high strength concrete // Materials and Design. 2007. No. 8. P. 1672–1677.
20. Iskhakov I., Ribakov Y. Experimental investigation and comparison of pre-stressed single-layer and repaired two-layer reinforced concrete beams // Structural concrete. 2020. No. 2. P. 1–12.

References

1. Stepanova V.F., Stepanov A.Yu. Non-metallic composite reinforcement for concrete structures. *Nauchno-tehnicheskiy i proizvodstvennyy zhurnal = Scientific-technical and industrial journal*. 2013; (1): 45–47. (In Russ.).
2. Maksimov S.P., Bashkova Yu. B., Miklyaeva T.A., Maksimova A.E. Ways to increase the modulus of elasticity of composite reinforcement. *Universum: Tekhnicheskiye nauki. Elektronnyy nauchnyy zhurnal = Universum: Technical sciences. Electron. Scientific journal*. 2015; (11): 1–9. (In Russ.).

3. Vinogradova N.A., Teplova Zh.S. Restraining factors for the use of composite reinforcement. *Molodoy uchenyy = Young scientist.* 2016; (17): 31–35. (In Russ.).
4. Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Berezhnoy D.V., Umarov B.Sh., Volter A.R. Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement. *Transportnye sooruzheniya = Transport facilities.* 2018; (2): 1–18. (In Russ.). <https://t-s.today/PDF/02SATS218.pdf>
5. Umanskiy A.M., Bekker A.T. The use of basalt-plastic reinforcement in the structures of marine hydraulic structures. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva = Izvestia VNIIG im. B.E. Vedeneev.* 2016; (6): 61–75. (In Russ.).
6. Khishmakh M., Mailyan D.R., Polskoy P.P., Blyagoz A.M. Strength and deformability of bending elements made of heavy concrete, reinforced with fiberglass and steel reinforcement. *Novyye tekhnologii = New technologies.* 2012; (4): 147–152. (In Russ.).
7. Dronov A.V., Drokin S.V., Frolov N.V. Experimental study of the adhesion of fiberglass reinforcement to concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction.* 2016; (11): 80–83. (In Russ.).
8. Gizdatullin A.R., Khusainov R.R., Khozin V.G., Krasnikova N.M. Strength and deformability of concrete structures reinforced with polymer composite rods. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal = Civil Engineering Journal.* 2016; (2): 32–41. (In Russ.).
9. Vetrova O.A. Experimental studies of the deformability of concrete beams reinforced with composite reinforcement. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the South-Western State University.* 2020; 24(1): 103–114. (In Russ.).
10. Al-shiblawi Karam Ali, Yartsev V.P., Pershin V.F. Reinforcement of concrete products with polymer composite materials: current state and prospects. *Naukovedeniye = Science studies.* 2017; 9(6): 1–9. (In Russ.). <https://naukovedenie.ru/PDF/165TVN617.pdf>
11. Rogatnev Yu.F., Potapov Yu.B., Barabash D.E., Panfilov D.V., Dzhavid M.M. Calculation of deflections of reinforced concrete bending elements with a top layer of high-quality concrete. *Nauchnyy vestnik MGSU = Scientific Bulletin of MGSU.* 2016; (3): 26–36. (In Russ.).
12. Rogatnev Yu.F., Dzhavid M.M. Experimental studies of the strength of normal sections of reinforced concrete bending elements with reinforcement class A500C. *Stroitel'naya mehanika i konstruktsii = Construction mechanics and structures.* 2014; (2): 73–78. (In Russ.).
13. Iskhakov I., Ribakov Y., Holschemacher K. Experimental investigation of continuous two-layer reinforced concrete beams. *Structural Concrete.* 2017; (18): 205–215.
14. Iskhakov I., Ribakov Y. Two-layer concrete bridge beams as composite elements. *Structural Concrete.* 2013; (3): 1–12.
15. Tho V.D., Korol E.A., Vatin N.I., Duc H.M. The Stress-Strain State of Three-Layer Precast Flexural Concrete Enclosure Structures with the Contact Interlayers. *Buildings.* 2021; 88(11): 1–17.
16. Eswaramoorthi P., Suresh M. Performance of high strength concrete beam under flexure and shear failure. *International Journal of Civil Engineering.* 2017; (1): 261–265.
17. Khorokhordin A.M., Usachev A.M., Korotkikh D.N. Comparative evaluation of the mechanical properties of polymer composite reinforcement. *Stroitel'nyye materialy = Building Materials.* 2018; (7): 71–75. (In Russ.).
18. Kolchunov V.I., Panchenko L.A. Calculation of composite thin-walled structures. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities (ASV), 1999. 283 p. (In Russ.).

19. Iskhakov I., Ribakov Y. A design method for two-layer beams consisting of normal and fibered high strength concrete. *Materials and Design*. 2007; (8): 1672–1677.
20. Iskhakov I., Ribakov Y. Experimental investigation and comparison of pre-stressed single-layer and repaired two-layer reinforced concrete beams. *Structural concrete*. 2020; (2): 1–12.

Информация об авторах

Ю.Ф. Рогатнев – кандидат технических наук, доцент

Ж. Минани – аспирант

О.О. Соколов – аспирант

Information about the authors

Yu.F. Rogatnev – PhD, Ass. Professor

J. Minani – Post-graduate Student

O.O. Sokolov – Post-graduate Student

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022

Одобрена после рецензирования 24.06.2022

Принята к публикации 30.06.2022

The article was submitted 25.05.2022

Approved after reviewing 24.06.2022

Accepted for publication 30.06.2022