

УДК: 624.012

DOI: 10.52409/20731523_2023_4_43

EDN: DKATJJ



Исследование численной модели напряжённо-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной углепластиком

А. Р. Шакиров¹, Ф. Р. Шакирзянов¹, А. М. Сулейманов¹²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* При усилении железобетонных конструкций системой внешнего армирования из углепластиков преимущественно применяются эпоксидные адгезивы. Наиболее податливым к воздействию эксплуатационных факторов компонентом данных систем является именно эпоксидный адгезив. Для изучения долговечности конструкций, усиленных системой внешнего армирования, необходимо изучить напряженно-деформированное состояние контактного слоя. Целью данной работы является исследование численной модели напряжённо-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной углепластиком. Задачи исследования: разработка конечно-элементной модели, железобетонной балки, усиленной углепластиком; выполнение расчета и анализ результатов.

Результаты. По результатам расчетов видно, что деформации бетона и деформации углепластика сильно отличаются. Деформации на бетоне существенно больше деформаций на углепластике. Такое развитие деформаций свидетельствует о смещении в зоне контактного слоя между бетоном и углепластиком.

Выводы. Проведено конечно-элементное моделирование железобетонной балки, усиленной системой внешнего армирования. В результате подбора различных моделей удалось разработать наиболее подходящую расчетную модель с хорошей сходимостью результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: внешнее армирование, численный расчет, усиление, углепластик, эпоксидный адгезив

Для цитирования: Шакиров А. Р., Шакирзянов Ф. Р., Сулейманов А. М. Исследование численной модели напряжённо-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной углепластиком // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с.43-52, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_43, EDN: DKATJJ

Research of a numerical model of the stress-strain state of a reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber

A. R. Shakirov¹, F. R. Shakirzyanov¹, A.M. Suleymanov¹²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* When reinforcing reinforced concrete structures with an external reinforcement system made of carbon fiber, epoxy adhesives are mainly used. The component of these systems that is most susceptible to the effects of operational factors is precisely the epoxy adhesive. To study the durability of structures reinforced with external reinforcement system, it is necessary to study the stress-strain state of the contact layer. The purpose of this work is to study a numerical model of the stress-strain state of a reinforced concrete beam

reinforced with carbon fiber. Research objectives: development of a finite element model, reinforced concrete beam reinforced with carbon fiber; calculation and analysis of the results.

Results. According to the results of calculations, it can be seen that concrete deformations and carbon fiber deformations are very different. Deformations on concrete are significantly greater than deformations on carbon fiber. This development of deformations indicates a displacement in the zone of the contact layer between concrete and carbon fiber.

Conclusions. Finite element modeling of a reinforced concrete beam reinforced with an external reinforcement system has been carried out. As a result of the selection of various models, it was possible to develop the most suitable computational model with good convergence of the results with experimental data.

Keywords: external reinforcement, numerical calculation, reinforcement, carbon fiber, epoxy adhesive

For citation: Shakirov A. R., Shakirzyanov F. R., Suleymanov A. M. Investigation of a numerical model of the stress-strain state of a reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber // News KSUAE, 2023, № 4(66), p.43-52, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_43, EDN: DKATJJ

1. Введение

Системы внешнего армирования (СВА) железобетонных конструкций углеродными волокнами широко применяется в строительной практике [1-3]. Наряду с опытом применения данных систем активно развиваются и исследования в данной области как в отечественной науке [4-6], так и у зарубежных коллег [7, 8]. На сегодняшний день разработаны методы конструирования и расчета усиления железобетонных конструкций системами внешнего армирования [9-11] и разработан свод правил СП 164.1325800.2014.

Несмотря на обширный опыт применения и очевидные преимущества СВА при усилении строительных конструкций, в отечественной строительной практике преобладают более консервативные методы усиления [14]. Вероятно, что от более широкого применения сдерживает фактор недоверия к данным системам в длительной перспективе. Ведь известно, что строительные конструкции в процессе длительной эксплуатации подвергаются воздействию сочетания различных факторов – нагрузка (постоянная и временная), температура, влага, ультрафиолет и т. п. Таким образом, справедливо возникает вопрос изучения долговечности конструкций, усиленных СВА.

Усиление железобетонных конструкций углеродными волокнами как правило выполняют при помощи эпоксидных адгезивов. Слабым звеном в системе «бетон-эпоксидный адгезив-углепластик» является именно адгезионный слой. Для разработки методик по изучению долговечности СВА необходимо изучить напряженно-деформированное состояние (НДС) усиленной конструкции в целом и самого адгезионного слоя в частности. Необходимо понимать характер развития напряжений и деформаций в зоне контактного слоя.

Для изучения НДС железобетонной балки, усиленной СВА, параллельно были выполнены ряд исследований:

- 1) Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком [15].
- 2) Исследование численной модели напряжённо-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной углепластиком.

Вопросы численного моделирования напряженно-деформированного состояния композитных материалов [16, 17], а также усиления элементов строительных конструкций в целом [18, 19] рассмотрены в работах таких авторов как Николюкин А.Н., Бокарев С. А, Савина С. Н. и др.. В работе Бокарева С. А. [18] проведено численное исследование железобетонной балки, усиленной композитными материалами. При этом авторы приводят сравнение результатов отечественных и зарубежных экспериментальных исследований с результатами численного расчета. По итогам данного сравнения отмечается хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных.

В данной работе была построена конечно-элементная модель в ПК ANSYS с целью выявления закономерностей НДС в зоне контактного слоя. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Разработка конечно-элементной модели, позволяющей адекватно оценить напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной системой внешнего армирования из углепластика, под действием нагрузки.
- 2) Выполнение расчета и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной СВА, по результатам расчета.

2. Материалы и методы

Для моделирования НДС выбран образец по аналогии с экспериментальным исследованием [15] представляющий собой железобетонную балку, усиленную СВА. Расчетная схема образца представлена на рис. 1. Расчетная нагрузка $P=4$ т (39240 Н).

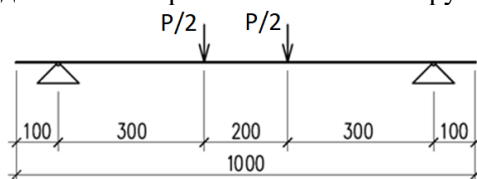


Рис. 1. Расчетная схема (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Calculation scheme (illustration by the authors)

Образец моделировался при помощи модуля SpaceClaim ПК ANSYS (рис. 2). 3D-модель выполнена в виде балки прямоугольного сечения согласно опалубочным чертежам (рис. 3) шириной 120 мм, высотой 140 мм, общей длиной 1000 мм. Арматурные стержни смоделированы двумя объемными стержнями диаметром 8 мм и длиной 1000 мм в нижней зоне.

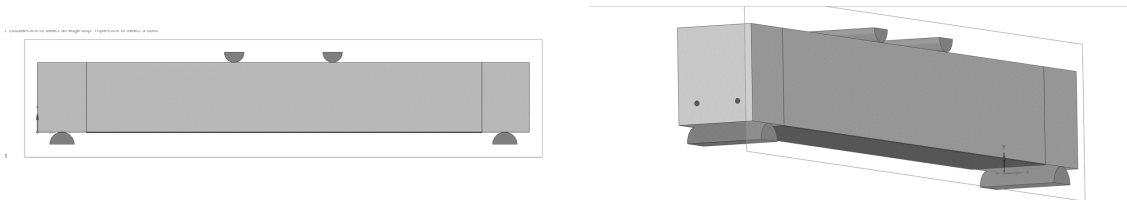


Рис. 2. Моделирование 3D-модели образца в SpaceClaim (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Modeling of a 3D model of a specimen in SpaceClaim (illustration by the authors)

Усиление балки выполнено в нижней растянутой зоне одним слоем углепластика на эпоксидном адгезиве. Ширина углепластика принята на ширину балки в 120 мм, длина усиления 700 мм.

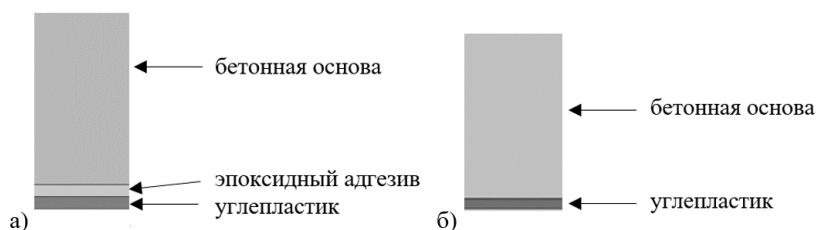


Рис. 3. Варианты моделирования усиления: а) – модель усиления двумя слоями – эпоксидный адгезив и углеволокно толщиной по 1 мм каждый; б) модель усиления одним слоем толщиной 1 мм (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Reinforcement modeling options: a) – reinforcement model with two layers – epoxy adhesive and carbon fiber with a thickness of 1 mm each; b) reinforcement model with one layer with a thickness of 1 mm (illustration by the authors)

Для расчета было смоделировано два варианта модели усиления (рис. 3):

1. Усиление смоделировано двумя слоями:
 - адгезионный слой – объемное тело толщиной 1 мм;
 - углепластик в виде объемного тела в 1 мм.
2. Усиление смоделировано одним объемным элементом толщиной в 1 мм. Контактный слой задан модель контактной зоны (Cohesive zone model – CZM).

В качестве опор и нагружающих катков предусмотрены объемные элементы в виде полуцилиндров. Расположение полуцилиндров принято согласно расчетной схеме (рис.1).

Описание моделей материалов

Для стальной арматуры, опор и нагружающих катков задан стандартный материал Structural Steel из библиотеки материалов ANSYS с характеристиками для стальной арматуры A400. Принятые характеристики стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материала Structural Steel

№	Наименование параметра /Property	Значение величины / Value	Единицы измерения / Unit
1	Плотность / Density	7850	кг/м ³
2	Начальный модуль упругости / Young's Modulus	2.10E+05	МПа
3	Значение предела упругости / Tensile Yield Strength	250	МПа
4	Предел текучести при сжатии / Compressive Yield Strength	250	МПа
5	Предел прочности при растяжении / Tensile Ultimate Strength	400	МПа
6	Коэффициент Пуассона / Poisson's Ratio	0,3	

Характеристики бетона заданы стандартным материалом Concrete из библиотеки материалов ANSYS с характеристиками для бетона класса B15 согласно СП 63.13330.2018. Принятые характеристики бетона приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики материала Concrete B15

№	Наименование параметра / Property	Значение величины / Value	Единицы измерения / Unit
1	Плотность / Density	2300	кг/м ³
2	Начальный модуль упругости / Young's Modulus	2000	МПа
3	Предел текучести при сжатии / Compressive Yield Strength	8,5	МПа
4	Предел прочности при растяжении / Tensile Ultimate Strength	0,75	МПа
5	Коэффициент Пуассона / Poisson's Ratio	0,18	

Характеристики углепластика и эпоксидного адгезива заданы по паспорту производителя. В качестве усиления выбраны углеткань FibArm Tape 230/300 и эпоксидный адгезив FibArm Resin 230+ (табл. 3 и табл. 4).

Таблица 3

Характеристики материала FibArm Tape 230/300

№	Наименование параметра / Property	Значение величины / Value	Единицы измерения / Unit
1	Плотность / Density	1800	кг/м ³
2	Начальный модуль упругости в продольном направлении / Young's Modulus X direction	38200	МПа
3	Начальный модуль упругости в поперечном направлении / Young's Modulus Y, Z direction	8600	МПа
4	Коэффициент Пуассона относительно XY и XZ / Poisson's Ratio XY, XZ	0,27	
5	Коэффициент Пуассона относительно YZ / Poisson's Ratio YZ	0,4	
6	Модуль сдвига относительно XY и XZ / Shear Modulus XY, XZ	32,1	МПа
7	Модуль сдвига относительно YZ / Shear Modulus YZ	8,5	МПа

Таблица 4

Характеристики материала FibArm Resin 230+

№	Наименование параметра / Property	Значение величины / Value	Единицы измерения / Unit
1	Плотность / Density	1800	кг/м ³
2	Начальный модуль упругости / Young's Modulus	63800	МПа
3	Коэффициент Пуассона / Poisson's Ratio	0,35	
4	Модуль упругости при сдвиге / Shear Modulus	236	МПа
5	Объемный модуль / Bulk Modulus	708	МПа
6	Значение предела текучести / Yield Strength	10	МПа

Для выполнения расчета с учетом ползучести эпоксидного адгезива для материала FibArm Resin 230+ дополнительно были введены параметры ползучести. Для описания ползучести была выбрана модель Time Hardening (Упрочнение во времени):

$$\varepsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T} \quad [20]$$

- где ε_{cr} – изменение эквивалентной деформации ползучести во времени;
 σ – напряжение, МПа;
 T – температура, К;
 t – время завершения одной ступени, с;
 $C_1 - C_4$ – константы;
 e – основание натурального логарифма.

Подставляя экспериментальные значения ползучести для эпоксидного адгезива в уравнение ползучести определили константы ползучести: $C_1=1,887$; $C_2=0$; $C_3=0,017$; $C_4=-318$.

Назначение контактов и связей

Для моделирования контактных задач в ПК ANSYS существуют различные инструменты. В данной работе была выбрана модель контактной зоны - Cohesive zone model (CZM). Данная модель рассматривает разрушение в контактной зоне как расслоение поверхностей с образованием межслойной трещины, а от ее развития удерживает сила сцепления. Работа контактной зоны характеризуется нормальными и касательными напряжениями и зазорами расслоения – нормальные зазоры и тангенциальное скольжение. Подразумевается три вида разделения контактной зоны:

- 1) Нарушение сцепления по нормали (отрыв);
- 2) Тангенциальное разделение (сдвиг);
- 3) Смешанный вид разделения по нормали и касательной. [21]

Совместная работа между бетоном и арматурой, бетоном и углепластиком обеспечена типом соединения «Bonded» (связанный). Для контактного слоя между бетоном и углепластиком для второго варианта модели задан параметр разрушения (Fracture) расслоение контакта (Contact Debonding) с заданием модели CZM.

Построение сетки конечных элементов

Размер конечно-элементной сетки для бетона принят 30 мм (рисунок 4). Опоры, стальная арматура, углеволокно смоделированы сеткой размерами по 10 мм.

Параметры расчета

Для достижения сходимости результатов расчета и экспериментального исследования было произведено последовательное моделирование параметров расчета. Следует выделить следующие основные варианты расчетной модели:

- 1) Расчет модели с усилением двойным слоем:
 - а) расчет с заданным параметром ползучести для эпоксидного адгезива;
 - б) расчет без учета параметра ползучести.
- 2) Расчет модели с усилением одним слоем и материалом контактного слоя (CZM).

Для предотвращения перемещения опор заданы неподвижные опоры. Нагрузка приложена на поверхности нагружающих катков параметром «Force».

Для расчета были заданы следующие результаты расчетов:

- 1) Total deformation – полные перемещения;
- 2) Equivalent Elastic Strain – эквивалентные упругие деформации;
- 3) Normal Elastic Strain – нормальные упругие деформации;
- 4) Equivalent Stress – эквивалентные напряжения;
- 5) Contact Tool: Sliding Distance – контактные результаты: относительное смещение в зоне контакта.

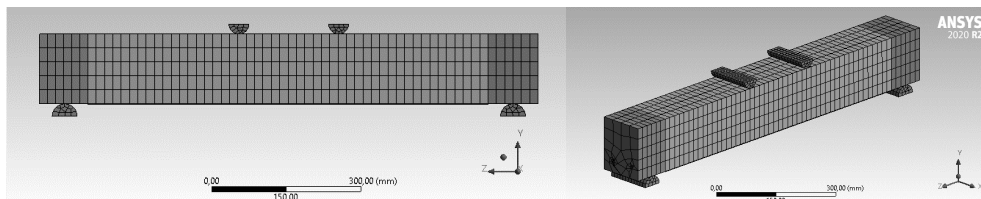


Рис. 4. Сетка конечных элементов (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Finite element grid (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

При расчете модели с двойным слоем без учета ползучести максимальный прогиб балки составил 0,6 мм. Что многократно отличается от экспериментальных данных. Для сходимости расчетных значений с экспериментальными данными был выполнен расчет с учетом ползучести адгезива. Данное решение не позволило получить адекватных результатов.

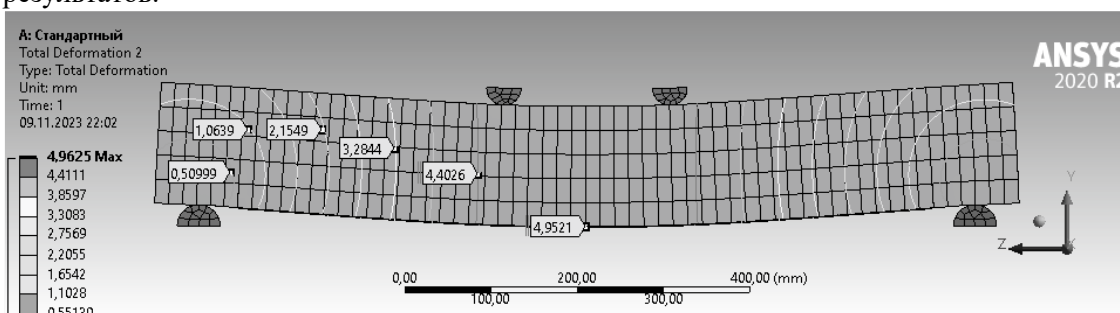


Рис. 5. Распределение перемещений (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Distribution of displacements (illustration by the authors)

Хорошая сходимость результатов расчетов с экспериментальными данными была достигнута на модели с усилением одним слоем и модель контактной зоны. Далее более подробно рассмотрим полученные результаты.

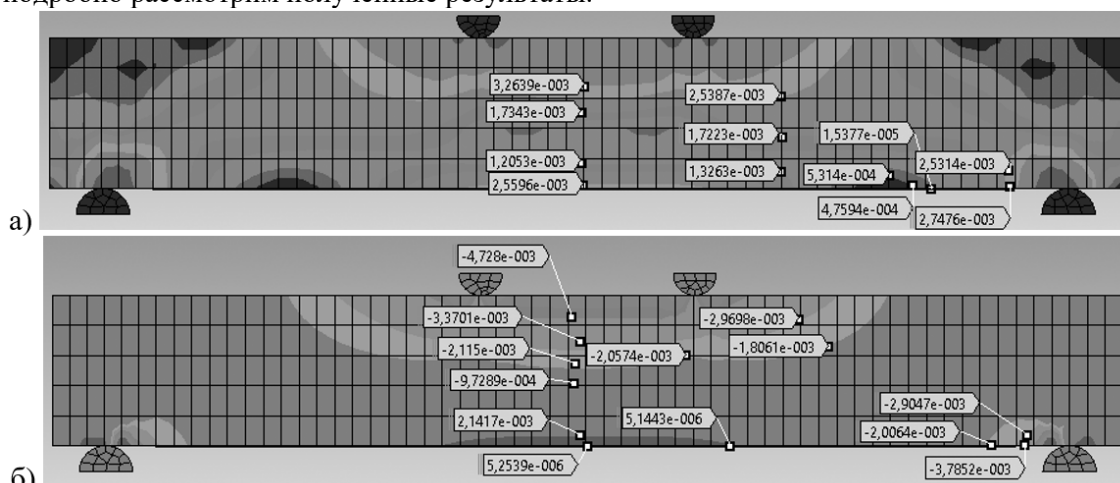


Рис. 6. Распределение деформаций: а – эквивалентные упругие деформации; б – нормальные упругие деформации (иллюстрация авторов)
 Fig. 6. Distribution of deformations: a – equivalent elastic deformations; б – normal elastic deformations (illustration by the authors)

По результатам расчета модели с усилением одним слоем и моделью контактной зоны максимальный прогиб под нагрузкой 39240 Н составил 4,95 мм (рисунок 5). По результатам экспериментов прогиб при нагрузке 39240 Н составил 6 мм [15]. Отклонение результатов расчета с экспериментальными по прогибам составляет 17%. В работе [18] авторы приводят сходимость результатов расчетов с экспериментальными данными по несущей способности в пределах от -20 до $+4$ % и от -24 до -6 %.

По распределению деформаций (рис. 6) видно, что в растянутой зоне бетона максимальные деформации образуются в середине пролета и на приопорных зонах по краям углепластика. Деформации на самом углепластике минимальны – $4,05 \cdot 10^{-6}$ (мм/мм), а распределение деформаций происходит равномерно по всей длине усиления.

Аналогичная картина наблюдается и по распределению эквивалентных напряжений (рис. 7). В зоне усиления максимальные напряжения возникают по середине пролета и на приопорных зонах – на концах углепластика.

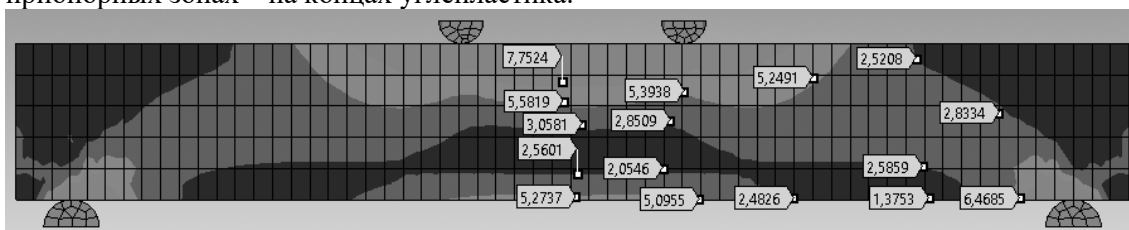


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Distribution of equivalent stresses (illustration by the authors)

В растянутой зоне образца по контактному слою между бетоном и углепластиком образовалась деформация смещения. Из результатов Sliding Distance относительное смещение в зоне контакта составило 0,5 мм (рисунок 8).

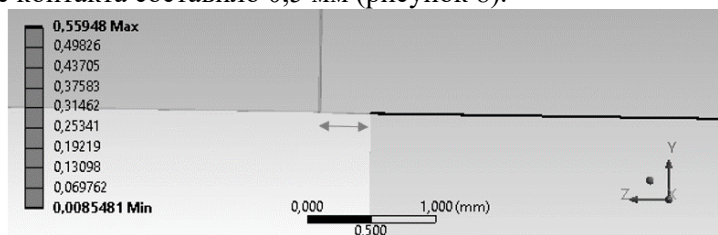


Рис. 8. Смещение по контактной зоне (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Displacement along the contact zone (illustration by the authors)

Как показывают результаты расчета, деформации бетона и деформации углепластика сильно отличаются – деформации на бетоне существенно больше деформаций на углепластике. Данное поведение НДС образца можно объяснить тем, что модуль упругости углепластика в разы превышает модуль упругости бетона. Под действием изгибающей нагрузки в бетоне образуются трещины, возникают деформации растяжения. Углепластик в свою очередь воспринимает те же усилия растяжения с незначительными деформациями. При этом такое разное сопротивление растягивающим усилиям приводит к смещению в зоне контактного слоя.

4. Заключение

Проведено конечно-элементное моделирование железобетонной балки, усиленной СВА в ПК Ansys. В результате подбора различных моделей удалось разработать наиболее подходящую расчетную модель с отклонением результатов с экспериментальными данными по прогибам всего на 13%. Анализ численной модели показал, что в напряженно-деформированном состоянии бетон и углепластик деформируются по-разному. При этом деформации на углепластике минимальны – $4,05 \cdot 10^{-6}$ (мм/мм). Графический анализ деформаций по контактному слою позволил визуализировать смещение по границе контакта между бетоном и углепластиком со значением 0,5 мм.

Список литературы/ References

1. Kobayashi A., Hidekuma Y., Tateishi A. Strengthening of steel and concrete structures using CFRP in Japan // IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, August 21–22, 2015, Dhaka, Bangladesh. P. 597–606.
2. Zhuang N., Dong H., Chen D., Ma Y. Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites // Hindawi Advances in Materials Science and Engineering, Published 2018, 9 pages.
3. Смолина М.В. Прохорова А.Е. Опыт применения системы внешнего армирования железобетонных пролетных строений автодорожных мостов композитными материалами в условиях Крайнего Севера // Техническое регулирование в транспортном строительстве. - 2016 г. - №1. [Smolina M.V. Prokhorova A.E. Experience of using the system of external reinforcement of reinforced concrete superstructures of road bridges with composite materials in the conditions of the Far North // Technical regulation in transport construction. - 2016.. - No. 1.]
4. Бокарев С.А. Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Интернет-журнал "Науковедение". - 2013 г. - №3. [Bokarev S.A. Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and elevated temperatures of reinforced concrete samples strengthened with polymer composite materials// Online journal "Science Studies". - 2013.. - No. 3.]
5. Евдокимов А.А., Имаметдинов Э.Ш., Малаховский С.С.. Усиление строительных конструкций из бетона системой внешнего армирования из углепластика // ТРУДЫ ВИАМ №10 (92) 2020. [Evdokimov A.A., Imametdinov E.Sh., Malakhovskiy S.S.. Strengthening concrete building structures via external reinforcement system from carbon plastic// PROCEEDINGS OF VIAM No. 10 (92) 2020.] DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-73-80.
6. Овчинников И.И. Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении // Интернет-журнал "Науковедение". - 2016 г. - №3 : Т. 8. [Ovchinnikov I.I. Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhalkin E.S. Analysis of experimental studies on strengthening reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments with static loading // Online journal "Science Studies". - 2016.. - No. 3 : Vol. 8.]
7. Azevedo, Thalles & Ferreira, Danilo & Sanchez, Joel & Sampaio, Eduardo & Assis, Joaquim. (2020). Mechanical behavior to shear of reinforced concrete beams reinforced with carbon fibers bonded with epoxy adhesive. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782). 5. 10.21575/25254782rmetg2020vol5n21158.
8. Chung, Deborah. (2022). A Review of Self-Sensing in Carbon Fiber Structural Composite Materials. World Scientific Annual Review of Functional Materials. 01. 10.1142/S2810922822300045.
9. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е.. Методика расчета на прочность нормальных сечений железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием на основе углеродных материалов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования – 2017 Vol. 18 No 1 20—28. [O.D. Rubin, Lisichkin S.E., Frolov K.E.. The method of calculating the strength of normal sections of reinforced concrete structures of hydraulic facilities strengthened with external reinforcement based on carbon materials // Bulletin of the RUDN. Series: Engineering Research – 2017 Vol. 18 No. 1 20-28.] DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-1-20-28.
10. Ключев С.В., Рубанов В.Г., Павленко В.И., Гурьянов Ю.В., Гинзбург А.В. Расчет строительных конструкций усиленных углеволокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – №5. – С. 54 – 56. [Klyuev S.V., Rubanov V.G., Pavlenko V.I., Guryanov Yu.V., Ginzburg A.V. Calculation of carbon fiber reinforced building structures // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. - 2013. – No. 5. – P. 54-56.]

11. Khmelidze, Tamaz & Khutsishvili, Shalva & Jerenashvili, Qetevan. (2022). Strength Calculation of Ferroconcrete Column Reinforced by Carbon Composite Tape. Works of Georgian Technical University. 124-132. 10.36073/1512-0996-2022-3-124-132.
12. Kuzina, E & Rimshin, V. (2020). Calculation Method Analysis for Structure Strengthening with External Reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 753. 022004. 10.1088/1757-899X/753/2/022004.
13. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Каргузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. 181 с. [Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. – М., JSC "Publishing House "Stroyizdat", 2007. 181 p.]
14. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Примеры усиления аварийных железобетонных конструкций // Жилищное строительство. 2018. № 5. С. 19–23. [Arleninov P.D., Krylov S.B. Examples of strengthening of dangerous reinforced concrete structures. Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2018. No. 5, pp. 19–23]
15. Сулейманов А.М., Шакиров А.Р. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 10–17. [Suleymanov A.M., Shakirov A.R. Experimental study of the stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber. 2023. No. 4. P. 10-17.] DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-10-17>
16. Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И. Численное моделирование композитной арматуры для задачи сцепления с бетоном. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019, №5. [Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Kolomnikova I.I. Numerical modeling of composite reinforcement for the task of adhesion to concrete. // Bulletin of V.G. Shukhov BSTU, 2019, No. 5.] DOI: [10.34031/article_5ce292ca089623.21062637](https://doi.org/10.34031/article_5ce292ca089623.21062637)
17. Barabash, Maria & Genzerskyi, I & Pikul, Anatol & Bashynska, Olga. (2017). Composite materials and composite structures modeling methods on «lira-sapr». Building constructions. Theory and Practice. 1. 90-98. 10.32347/2522-4182.1.2017.90-98. Бокарев С. А., Смердов Д. Н.. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами. // Вестник ТГАСУ № 2, 2010. [Bokarev S. A., Smerdov D. N.. The nonlinear analysis of bending reinforced concrete structures strengthened by composite materials // Bulletin of TSASU No. 2, 2010]
18. Савин С. Н., Демишин С. В. Эффективность усиления железобетонных колонн внешним армированием углеволокном // Жилищное строительство Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.; Ладья;. 2011. - № 7. - С. 35-36 RU-ToGUA. [Savin S. N., Demishin S. V. Efficiency of strengthening of reinforced concrete columns by external carbon fiber reinforcement // Housing construction Monthly scientific, technical and production journal. М.; Ladya;. 2011. - No. 7. - P. 35-36 RU-ToGUA]
19. ANSYS Mechanical APDL Element Reference. Release 13.0. November 2010.
20. Кашеварова Г.Г., Мартиросян А.С., Травуш В.И. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62–75. [Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Computational and experimental research of the contact debonding process when rigid reinforcement is pressed into concrete. PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. No. 3. P. 62-75.] DOI: [10.15593/perm.mech/2016.3.04](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.04)

Информация об авторах

Шакирзянов Фарид Рашитович, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: faritbox@mail.ru

Шакиров Алмаз Райнурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: alma-94@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, член-корр. Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru

Information about the authors

Farid R. Shakirzyanov, Candidate of physical and mathematical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: faritbox@mail.ru

Almaz R. Shakirov, graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: alma-94@mail.ru

Alfred M. Suleymanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, corr.-m. Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru