

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3
EDN: EYZUTY



Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1: Влияние изменения модуля упругости адгезива на напряженно-деформированное состояние железобетонной балки

А. Р. Шакиров¹, А. М. Сулейманов^{1,2}, И. А. Старовойтова³

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

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

³ООО «НПФ «РЕКОН», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Наиболее подверженным к воздействию эксплуатационных факторов компонентом систем внешнего армирования является эпоксидный адгезив. Целью данной работы является изучение влияния изменения модуля упругости эпоксидного адгезива на ползучесть усиленной конструкции. Задачами исследования являются: разработка составов эпоксидных адгезивов с регулируемым модулем упругости, проведение испытаний на прочность и ползучесть.

Результаты. В работе представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной системой внешнего армирования. По результатам исследования выявлено, что снижение модуля упругости адгезива приводит к увеличению деформативности и снижает прочность усиленных балок.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении зависимости напряженно-деформированного состояния от физико-механических характеристик адгезивов, применяемых при усилении строительных конструкций. Данные результаты можно применять при разработке адгезивов с заданными характеристиками под определенные эксплуатационные условия.

Ключевые слова: внешнее армирование, долговечность, усиление, углепластик, эпоксидный адгезив

Для цитирования: Шакиров А.Р., Сулейманов А.М., Старовойтова И.А. Адгезивы для систем внешнего армирования строительных конструкций. Часть 1: Влияние изменения модуля упругости адгезива на напряженно-деформированное состояние железобетонной балки // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 23-31, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3, EDN: EYZUTY

The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 1: The effect of changes in the modulus of elasticity on the stress-strain state of a concrete beam reinforced with an external reinforcement system

A. R. Shakirov¹, A.M. Sulejmanov^{1,2}, I. A. Starovoitova³

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

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

³SPC RECON LLC, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The component of external reinforcement systems that is most susceptible to the effects of operational factors is epoxy adhesive. The purpose of this work is to study the effect of changes in the elastic modulus of an epoxy adhesive on the creep of a reinforced structure. *The objectives of the study are:* the development of compositions of epoxy adhesives having regulated elastic modulus, conducting strength and creep tests.

Results. The paper presents the results of stress-strain state studies of reinforced concrete beams reinforced with piles. According to the results of the study, it was revealed that a decrease in the elastic modulus of the adhesive leads to an increase in deformability and reduces the strength of reinforced beams.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in establishing the dependence of the stress-strain state on the physical and mechanical characteristics of adhesives used in strengthening building structures. These results can be used in the development of adhesives with specified characteristics for certain operating conditions.

Keywords: external reinforcement, durability, reinforcement, carbon fiber, epoxy adhesive

For citation: Shakirov A. R., Sulejmanov A.M., Starovoitova I. A. The modulus of elasticity of epoxy adhesives used to strengthen reinforced concrete structures with external reinforcement systems. Part 1: The effect of changes in the modulus of elasticity on the stress-strain state of a concrete beam reinforced with an external reinforcement system // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 23-31, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.3, EDN: EYZUTY

1. Введение

Системы внешнего армирования (СВА) железобетонных конструкций представляю сложную систему, состоящую из железобетонной подложки, эпоксидного адгезива и углеродной ткани. При условном разделении работы каждого элемента СВА, можно предположить, что самым чувствительным элементом к длительному воздействию эксплуатационных факторов является полимерный адгезив, который работая под воздействием касательных напряжений между усиливающим элементом и бетонной подложкой, при совместном воздействии климатических факторов, обеспечивает совместную работу всей системы. При этом в адгезиве реализуется режим ползучести [1, 2].

В области СВА строительных конструкций углеродными композитами существует множество научных трудов [3-5], посвященных изучению их долговечности. Так, например, Карим Бензarti в своих трудах [6-8] изучил влияние ускоренных испытаний на долговечность СВА. К. М. Дальфре [9] провела исследование влияния на разрушение композитных систем усиления атмосферных воздействий, а в работах [10-11] приводятся результаты исследования в суровых климатических условиях. Авторы работы [12] провели испытание на старение эпоксидного адгезива и углеродного ламината методом ускоренных испытаний и натурными испытаниями. По результатам данного исследования отмечается деградация свойств адгезива, а изменение свойств углекомпозиата оказалось незначительным. В работе [13] авторами выявлен переход от

когезионного разрушения к адгезионному после воздействия температурных циклов на образцы, погруженных в воду. Так же отмечается изменение модуля упругости адгезива при данном характере воздействий.

В работах Селивановой Е. О. [1, 2] изучено развитие ползучести, отмечается необходимость учета вязкоупругих деформаций для усиленных конструкций при действии больших постоянных нагрузок. В работе [14] экспериментально подтверждается влияние температурно-силовых факторов на НДС железобетонных конструкций, усиленных СВА.

Из результатов данных исследований можно сделать вывод, что наиболее подверженным воздействию эксплуатационных факторов компонентом систем внешнего армирования является эпоксидный адгезив. Таким образом, при изучении долговечности конструкций, усиленных системами внешнего армирования с применением углеродных волокон, целесообразно уделить внимание долговечности эпоксидных адгезивов.

Цель исследования: изучение зависимости напряженно-деформированного состояния железобетонной балки, усиленной СВА, при изменении модуля упругости эпоксидного адгезива.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать составы эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
2. Провести экспериментальное исследование прочности железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.
3. Провести экспериментальное исследование на ползучесть методом ступенчатых изотерм железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.

В данной работе было изучено влияние изменения модуля упругости эпоксидного адгезива на НДС железобетонной балки, усиленной СВА.

2. Материалы и методы

Приготовление составов эпоксидных адгезивов

В исследованиях были использованы двухкомпонентные клеевые связующие на основе эпоксидных смол и смесевых отвердителей аминного типа РекАРМ-Б [15- 17].

Основа адгезива (компонент А) включала эпоксидную смолу на основе бисфенола А с эпоксидным эквивалентом $EEW = 210-215$ г/экв., монофункциональный эпоксидный активный разбавитель, пластификатор и реологическую добавку. Отвердитель (компонент Б) состоял из смеси алифатических и ароматических аминов в соотношении $\sim 1:1$.

Для изменения упруго-прочностных характеристик клеевого связующего в данной работе варьировалось содержание пластифицирующей добавки (дибутилфталата) в основе клея – от 5 до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы (таблица 1).

Таблица 1

Составы клеевых связующих

Компоненты состава и их показатели	Значение для состава:		
	РекАРМ-D5	РекАРМ-D10	РекАРМ-D30
Эпоксидная смола с целевыми добавками	100 масс. ч.	100 масс. ч.	100 масс. ч.
Количество пластификатора на 100 масс. ч. смолы	5 масс. ч.	10 масс. ч.	30 масс. ч.
EEW основы клеевого связующего	224,8 г/экв.	235,5 г/экв.	278,4 г/экв.
HEW смесевого отвердителя	60,9 г/экв.		
Соотношение компонентов А:Б	100:27,1	100:25,89	100:21,9

Приготовление образцов и проведение испытаний

Подготовка клеевых связующих для проведения испытаний включала: смешение компонентов клея, заливку его в формы и отверждение. Отвердитель вводили в основу клеевого связующего при постоянном перемешивании, после добавления отвердителя смешение компонентов осуществляли в течение 2 мин при температуре $+(21\pm 2)$ °С. Для определения физико-механических характеристик (прочности и модуля упругости при растяжении) были изготовлены образцы-лопатки, размеры которых представлены на рис.1. Смесь компонентов клеевого связующего заливали в металлические формы через 5-10 мин после смешения компонентов и выдерживали в течение 7 суток при температуре $+(21\pm 2)$ °С. По истечению 7 суток проводили термообработку образцов при температуре 60 °С в течение 120 минут.

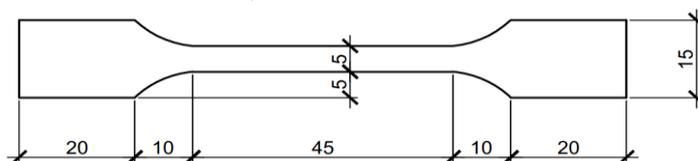


Рис. 1. Размеры образцов лопаток (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Dimensions of the blade samples (illustration by the authors)

Испытания проводились на растяжение на универсальной испытательной машине ИР 5082 со скоростью 1 мм/мин. Деформации снимались с помощью экстензометра ИДН 10/25. Температуру стеклования определяли при помощи установки динамического механического анализа (ДМА) PerkinElmer DMA 8000.

Для проведения испытаний на железобетонных балках были изготовлены опытные образцы балки из бетона класса В15 с сечением 120x140(h) мм, общей длиной $L=1000$ мм. Армирование балок выполнено в нижней зоне двумя стержнями $\varnothing 8$ А400 длиной 1000.

Балки в продольном направлении усиливались одним слоем углеродной ленты FibArm Tape 230 шириной 120 мм при этом продольные холсты не доводились до опор на расстояние 50 мм. Для пропитки и приклеивания углеродных лент к бетону применялись эпоксидные составы РекАРМ-D5, РекАРМ-D10 и РекАРМ-D30 (табл. 1) с различным содержанием пластифицирующей добавки. С применением каждого состава клеевого связующего было усилено по две балки. В дальнейшем на одной из балок были проведены кратковременные испытания, на другой – испытания на ползучесть методом ступенчатых изотерм.

Определение кратковременной прочности производилось на лабораторном стенде на четырёхточечный изгиб (рисунок 2). Нагружение проводилось при помощи гидравлического домкрата с насосной станцией. Для измерения прогибов в середине пролета установили индикатор часового типа. Нагрузку измеряли при помощи манометра.



Рис. 2. Проведение испытаний на балках (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Testing on beams (illustration by the authors)

Определение ползучести железобетонных балок, усиленных СВА, методом ступенчатых изотерм проводилось по методике, предложенной в работах [14, 15]. Испытания на ползучесть проводились под нагрузкой 70% от разрушающей.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний на растяжение образцов-лопаток получены значения прочности и модуля упругости при растяжении эпоксидных адгезивов. При введении пластификатора от 5 до 10 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы увеличивается прочность адгезива при растяжении и незначительно снижается модуль упругости, температура стеклования не изменяется. Увеличение пластификатора до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы приводит к резкому снижению прочности при растяжении и модуля упругости (в 2-3 раза) и уменьшению температуры стеклования до +30 °С, что существенно ограничивает возможности использования такого связующего в реальной практике.

Такая же противоположная зависимость изменения модуля упругости и прочности на растяжение эпоксидных адгезивов наблюдается в работах и других авторов. Например, в работе [18] наблюдается снижение прочности на растяжение с увеличением содержания углеродных нанотрубок, а модуль упругости при этом наоборот увеличивается. Характеристики составов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики составов

Эпоксидные составы	РекАРМ-D5	РекАРМ-D10	РекАРМ-D30
Прочность при растяжении	38-44 МПа	45-50 МПа	17-18 МПа
Модуль упругости при растяжении	6,04 ГПа	5,5 ГПа	2-3 ГПа
Температура стеклования	51 °С	52 °С	30 °С

Испытания железобетонных балок, усиленных СВА, при кратковременном нагружении показывают, что развитие прогибов балки с адгезивами РекАРМ-D5 и РекАРМ-D10 происходит одинаково до нагрузки 2200 кгс (рис. 3). Далее у балки с адгезивом РекАРМ-D5 наблюдается резкое снижение развития деформаций до момента разрушения при нагрузке 3108 кгс. Балка с адгезивом РекАРМ-D10 разрушается при нагрузке 3324 кгс. У балки с адгезивом РекАРМ-D30 значения прогибов заметно больше, чем у предыдущих образцов. Однако предельная нагрузка для этой балки выше – 3541 кгс.

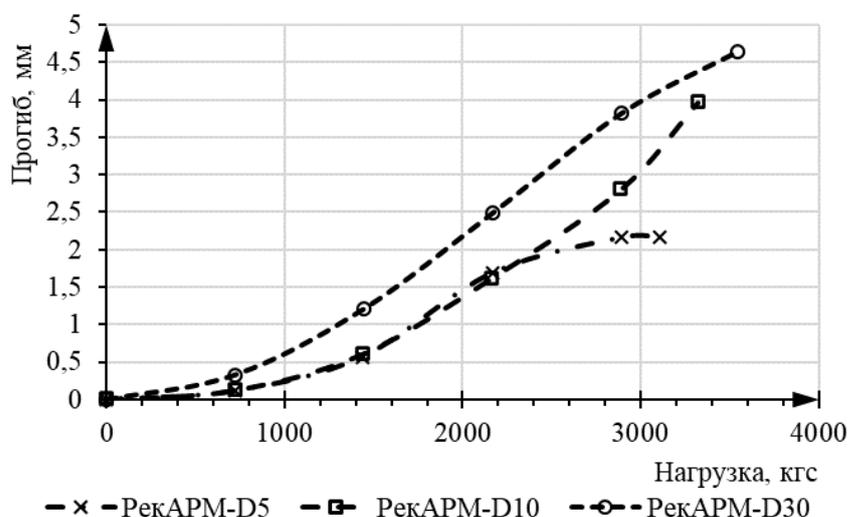


Рис. 3. График зависимости прогибов балки от нагрузки (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Graph of the dependence of beam deflections on load (illustration by the authors)

Далее балки испытывались в режиме ползучести под постоянной нагрузкой равной 70% от разрушающей для каждого образца с соответствующим адгезивом. Температура испытаний повышалась ступенчато на 5°C. Начальная температура составила 25°C. Каждая температура выдерживалась в течение 60 минут.

На рисунке 4 представлены ступенчатые изотермические кривые ползучести балок. Балка, усиленная адгезивом РекАРМ-D5, разрушилась при температуре 60°C, с адгезивом РекАРМ-D10 разрушение произошло при температуре 55°C. Из-за низкой температуры стеклования балка, усиленная с адгезивом РекАРМ-D30, разрушилась при температуре 35°C.

По полученным ступенчатым кривым ползучести построены обобщенные кривые прогноза ползучести железобетонной балки (рисунок 5). Ползучесть балок, усиленных адгезивами РекАРМ-D-5 и РекАРМ-D10, на начальном отрезке развивается практически одинаково. Далее, с течением времени, у балки с адгезивом РекАРМ-D10 происходит ускорение процесса ползучести. Ползучесть балки, усиленной при помощи адгезива РекАРМ-D30, протекает с большей скоростью, чем с адгезивами РекАРМ-D5 и РекАРМ-D10.

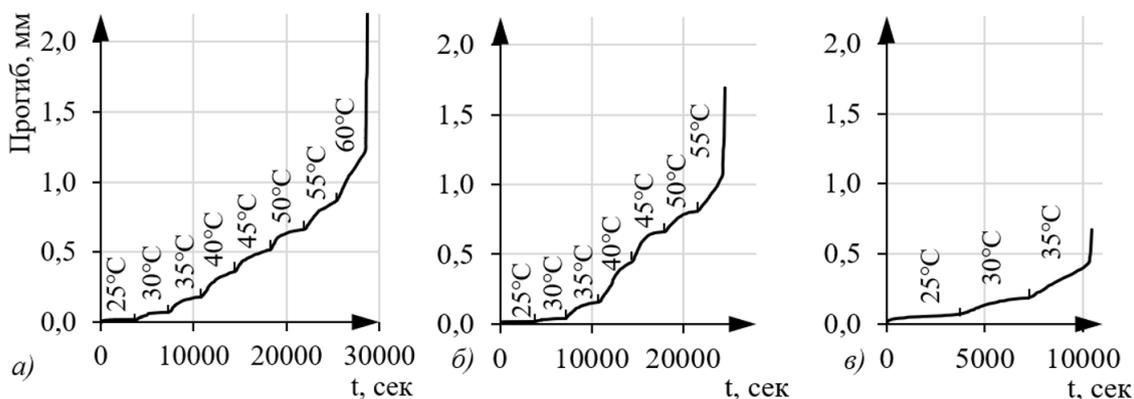


Рис. 4. Графики ступенчатых изотермических кривых ползучести: а) балка с адгезивом РекАРМ-D5; б) балка с адгезивом РекАРМ-D10; в) балка с адгезивом РекАРМ-D30 (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Graphs of stepwise isothermal creep curves: a) beam with RecARM-D5 adhesive; b) beam with RecARM-D10 adhesive; c) beam with RecARM-D30 adhesive (illustration by the authors)

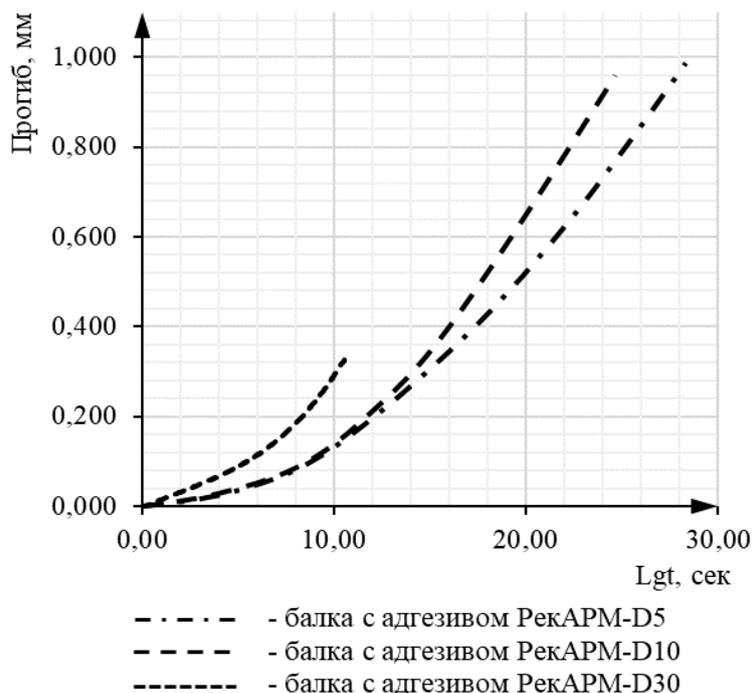


Рис. 5. Графики обобщенных кривых прогноза ползучести (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Graphs of generalized creep prediction curves (illustration by the authors)

4. Заключение

Разработаны составы эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости.

Экспериментальное исследование прочности железобетонных балок, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости, показало снижение несущей способности.

При исследовании на ползучесть методом ступенчатых изотерм на железобетонных балках, усиленных СВА с применением эпоксидных адгезивов с различными модулями упругости, выявлено влияние данного параметра на долговечность.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований выявлена зависимость НДС железобетонной балки, усиленной СВА, от характеристик эпоксидных адгезивов. Снижение модуля упругости адгезива приводит к увеличению деформативности железобетонной балки, усиленной СВА.

Список литературы/ References

1. Селиванова, Е. О., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования ползучести в композиционных материалах, усиливающих изгибаемые железобетонные элементы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 2 (33). – С. 95-99. [Selivanova, E. O., Smerdov D. N. Experimental study of creep in composite materials, bending reinforcement concrete elements // Academic journal Uralniiproekt RAASN. – 2017. – № 2 (33). - P. 95-99.]
2. Селиванова, Е. О., Смердов Д.Н. Исследования свойств ползучести в элементах систем внешнего армирования при длительном воздействии нагрузки // Политранспортные системы: материалы IX Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года. – Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 53-56. [Selivanova, E. O., Smerdov D. N. Studies of creep properties in elements of external reinforcement systems under prolonged stress // Polytransport systems: proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 17-18, 2016. – Siberian State University of Railway Engineering. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Engineering, 2017. P. 53-56.]
3. 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. – Vol. 8. – № 3. [Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. Analysis of experimental studies on strengthening of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. Domestic experiments under static loading // Online journal “NAUKOVEDENIE”. – 2016. – Vol. 8. – № 3.]
4. Леонова, А. Н., Софьяников О.Д., Скрипкина И.А. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами при воздействии агрессивной среды // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 4. – С. 496-509. [Leonova, A. N., Sofyanikov O. D., Skripkina I. A. Features of reinforcement of metal structures with composite materials under the influence of aggressive environment // Bulletin of MGSU. – 2020. – Vol. 15. – No 4. – P. 496-509.]
5. Денисова, А. Д., Кужман Е. Д., Шеховцов А. С. Влияние температуры на работу композиционного материала, применяемого при усилении железобетонных конструкций, при растяжении // Жилищное строительство. – 2023. – № 5. – С. 46-53. [Denisova, A.D., Kuzhman E. D., Shekhovtsov A. S. The influence of temperature on the work of a composite material used to strengthen reinforced concrete structures during stretching // Housing construction. – 2023. – No 5. – P. 46-53.]
6. Benzarti K., Chataigner S., Quiertant M. [et al.] Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays // Construction and Building Materials. – 2011. – № 25 (2). – P. 523-538.

7. Benzarti K., Quiertant M., Marty C. Effects of Accelerated Ageing on the Adhesive Bond Between Concrete Specimens and External CFRP Reinforcements // *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*. – Springer, Berlin, Heidelberg., 2011.
8. Quiertant M., Benzarti K., Schneider J. Effects of Ageing on the Bond Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer/Concrete Adhesive Joints: Investigation Using a Modified Double Shear Test // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2017. – № 45 (6).
9. Dalfré G. M., Parsekian G. A., Ferreira D. C. Degradation of the EBR-CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering, *Rev // IBRACON Estrut. Mater.* – 2021. – Vol. 14. – № 2.
10. Nasser Al Nuaimi, Muazzam Ghous Sohail, Rami Hawileh . Durability of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Laminates under Harsh Climatic Conditions // *Journal of Composites for Construction*. – 2021.
11. Vdovin, E. A., Stroganov V. F. Modification of cement-bound mixtures with sodium formate additives for the construction of pavement bases at low air temperatures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019, ISM 2019, Kazan, 12–13 сентября 2019 года. Vol. 786*. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012065. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012065. – EDN CZWWRN.
12. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing // *Materials*. – 2021. – № 14.
13. Liu Shuai, Pan Yunfeng, Li Hedong. Durability of the Bond between CFRP and Concrete Exposed to Thermal Cycles // *Materials*. – 2019. – № 14.
14. Смердов Д. Н. Экспериментальные исследования влияния температурной релаксации и напряжения полимерных композиционных материалов, работающих в составе изгибаемых железобетонных элементов, при длительном воздействии нагрузок // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 150-163. [Smerdov D. N. Experimental studies of the effect of temperature relaxation and stress of polymer composite materials working as part of bent reinforced concrete elements under prolonged exposure to loads // *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building*. – 2022. – Vol. 24. – No 1. – P. 150-163.]
15. Shakirov, A. Sulejmanov A. Prediction of Creep for a Reinforced Concrete Beam Strengthened with an External Reinforcement System Using the Stepped Isothermal Method // *Lecture Notes in Civil Engineering: Proceedings of STCCE 2021. Selected Papers, Switzerland, April, 28, 2021. Vol. 169*. – Switzerland: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG, GEWERBESTRASSE 11, CHAM, SWITZERLAND, CH-6330, 2021. – P. 113-121. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_12. – EDN JAUFFX.
16. Шакиров А. Р., Пичкалев А. А., Сулейманов А. М. Разработка метода оценки ползучести железобетонных балок, усиленных системами внешнего армирования, методом температурно-временной аналогии // *Международная научно-техническая конференция «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XI академических чтений РААСН»*. – Саранск, 2020. – С. 366-374. [Shakirov A. R., Pichkalev A. A., Suleymanov A.M. Development of a method for assessing the creep of reinforced concrete beams strengthened with external reinforcement systems by the method of temperature-time analogy // *International scientific and Technical Conference "Durability, strength and mechanics of destruction of building materials and structures: materials of the XI academic readings of the Russian Academy of Sciences"*. – Saransk, 2020. – P. 366-374.]
17. Бурнашев А. И., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К. Наномодифицированная древесная мука - эффективный наполнитель поливинилхлоридных композиций // *Строительные материалы*. – 2011. – № 9. – С. 72-74. – EDN ONLEDT. [Burnashev A. I., Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K. Nanomodified wood flour is an effective

filler for polyvinyl chloride compositions// Building materials. - 2011. – No. 9. – PP. 72-74. – EDN ONLEDT.]

18. Кычкин А. А., Кычкин А. К., Туисов А. Г. Влияние углеродных нанотрубок на упруго-прочностные свойства эпоксидного связующего // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 201-207. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. – EDN AOIQRТ. [Kychkin, A., Kychkin, A.K., Tuisov, A.G., Lebedev, M.P. Anan'eva, E.S. (2023). Influence of one-wall carbon nano-tubes on the elastic-strength properties of epoxy binding. Polzunovskiy vestnik, (2), 201-207. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.026. EDN: AOIQRТ.]

Информация об авторах

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

Старовойтова Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, ООО «Научно-производственная фирма «Рекон», г. Казань, Россия

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru

Information about the authors

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

E-mail: alma-94@mail.ru

Alfred M. Sulejmanov, 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

Irina A. Starovoitova, Ph.D. tech. Sciences, Research and Production Company "Rekon" LLC, Kazan, Russia

E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru