



УДК: 691.175.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1

EDN: AEGJCS



Исследование деформативности, ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков

А.И. Валиев¹, А.М. Сулейманов¹²

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

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

Аннотация. *Постановка задачи.* Одним из методов улучшения жесткостных характеристик стеклопластиков в строительной практике является их внешнее армирование с применением углеродных композитов. Деформативность таких систем обусловлена как подбором компонентов, так и изучением их ползучести. Целью данной работы является исследование деформативности, температурно-временной зависимости ползучести стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидных адгезивах с различным количеством пластификаторов. Задачами исследования является: исследование деформирования стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидном связующем с различным содержанием пластификаторов в области упругих деформаций при нормальной температуре, исследование ползучести образцов на четырехточечный изгиб методом ступенчатых изотерм.

Результаты. Исследована деформативность, температурно-временная зависимость ползучести системы «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань». По кривым ползучести с увеличением пластификаторов в составе эпоксидной смолы наблюдается увеличение деформативности систем в исследуемых температурных интервалах. Предложен подход к экспериментальному исследованию температурно-временной зависимости ползучести систем с использованием метода ступенчатых изотерм.

Выводы. Значимость полученных результатов в строительной отрасли заключается в использовании метода ступенчатых изотерм для экспериментального исследования температурно-временной зависимости ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков и рекомендовано при решении научных и инженерных задач.

Ключевые слова: клеевые связующие, стеклопластик, углеродная ткань, система внешнего армирования, ползучесть

Для цитирования: Валиев А.И., Сулейманов А.М. Исследование деформативности, ползучести стеклопластиков, внешне армированных углепластиков // Известия КГАСУ, 2024, № 1(67), с. 6-13, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1, EDN: AEGJCS

Study of deformability, creep behavior of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics

A.I. Valiev¹, A.M. Sulejmanov¹²

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

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

Abstract. *Problem statement.* One of the methods of improving the stiffness characteristics of FRP in construction practice is their external reinforcement with the use of carbon composites.

The deformability of such systems is due to both the selection of components and the study of their creep. The purpose of this work is to study the deformability, temperature and time dependence of creep of fiberglass plastics externally reinforced with carbon fabrics on epoxy adhesives with different amounts of plasticizers. The objectives of the study are: investigation of deformation of fiberglass plastics externally reinforced with carbon fabrics on epoxy binder with different content of plasticizers in the area of elastic deformations at normal temperature, investigation of the creep of samples on four-point bending by the method of step isotherms.

Results. We investigated the deformability, temperature-time dependence of creep of the system "pultrusion fiberglass - epoxy adhesive compositions with different amounts of plasticizers - carbon fabric". According to creep curves with the increase of plasticizers in the composition of epoxy resin, an increase in the deformability of the systems in the studied temperature intervals is observed. An approach to the experimental investigation of the temperature-time dependence of creep of systems using the method of step isotherms is proposed.

Conclusions. The significance of the obtained results in the construction industry lies in the use of the method of step isotherms for the experimental study of the temperature-time dependence of the creep of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics and is recommended in solving scientific and engineering problems.

Keywords: adhesive binders, fiberglass, carbon fabric, external reinforcement system, creep

For citation: Valiev A.I., Sulejmanov A.M. Study of deformability, creep behavior of fiberglass plastics externally reinforced with carbon plastics // News KSUAE, 2024, № 1(67), p. 6-13, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.1, EDN: AEGJCS

1. Введение

Одним из эффективных, долговечных, стойких к агрессивным средам материалов является полимерный композиционный материал [1,2]. В строительной практике полимерные композиты нашли применение при изготовлении пешеходных мостовых сооружений, в системах для замены стальной арматуры в железобетонных настилах, системах для усиления бетона, деревянных и каменных конструкций и др. [3-5].

Определяющим фактором, сдерживающим широкое применение конструкционных полимерных композитов в строительной сфере, является то, что для сооружений, выполненных из полимерных композитов, к примеру, из стеклопластика, по аналогичной конструктивной схеме из металла не всегда выполняется определяющее условие проверки на прочность согласно второму предельному состоянию (по деформациям), что приводит к увеличению поперечных сечений, уменьшению шага конструктивных элементов, стоимости [6-8]. Одним из решений данной проблемы является улучшение жесткостных характеристик материала путем их внешнего армирования с применением углеродных композитов. Однако, при выполнении систем «стеклопластик – клеевой состав – углеродная ткань» необходим комплексный подбор компонентов, в особенности клеевого состава, изучение их деформативности при нормальной температуре, ползучести, в частности климатической стойкости, для достижения требуемой долговечности [9-11].

Вопросам прогнозирования, построения кривых ползучести и их верификации на основе численных моделей посвящено большое количество работ, моделирование поведения упруго-механических характеристик во времени, термомеханического поведения и процессов разрушения представляет большой интерес и предполагает выбор, разработку адекватных методик по результатам анализа свойств и области применения [12-14]. Одним из апробированных методов прогнозирования климатической стойкости для систем внешнего армирования строительных конструкций, в частности железобетонных, является метод ступенчатых изотерм, который основан на испытании одиночного образца с заданным постоянным напряжением и пошаговым увеличением температуры с целью ускорения ползучести [15-17].

Целью работы является исследование деформативности, температурно-временной зависимости стеклопластиков, внешне армированных однонаправленными углеродными тканями на эпоксидных адгезивах с различным количеством пластификаторов.

Для достижения цели необходимо:

- исследование деформирования стеклопластиков, внешне армированных углеродными тканями на эпоксидном связующем с различным содержанием пластификаторов в области упругих деформаций при нормальной температуре испытаний;
- исследование ползучести образцов на четырехточечный изгиб методом ступенчатых изотерм.

2. Материалы и методы

Для проведения исследований систем «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань» были изготовлены плоские образцы балок прямоугольного сечения шириной 40 мм, высотой 4 мм, общей длиной 30,5 мм. Конструкция, размеры, материалы опытных образцов определены в соответствии с поставленными задачами и возможностями по изготовлению и испытанию образцов.

В качестве материалов систем применялись:

- 1) Пултрузионный стеклопластик на основе полиэфирных смол производства ООО «Татнефть-Пресскомполит»;
- 2) Однонаправленная углеродная ткань FibArm Tape 230 производства АО «Юматекс» (Госкорпорация «Росатом»);
- 3) Адгезивы на основе эпоксидной смолы РекАРМ – D5,...D10,...D30 (D-количество пластифицирующей добавки (дибутилфталата) от 5 до 30 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы) и смесевых отвердителей аминного типа компании ООО «Рекон». Выявлено, что с увеличением количества пластификаторов в составе эпоксидной смолы уменьшается прочность при растяжении, модуль упругости. Результаты испытаний клеевых составов на растяжение приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний клеевых составов

| Эпоксидные составы | РекАРМ-D5 | РекАРМ-D10 | РекАРМ-D30 |
|--------------------------------------|-----------|------------|------------|
| Прочность при растяжении, МПа | 38-44 | 45-50 | 17-18 |
| Модуль упругости при растяжении, ГПа | 6,1 | 5,5 | 2-3 |

Технологический процесс подготовки поверхностей к склеиванию является одним из определяющих при формировании несущей способности, долговечности систем.

Нами выделены следующие этапы разработки систем:

- 1) Очистка поверхности пластин из стеклопластика с помощью наждачной бумаги;
- 2) Обезжиривание ацетоном поверхности пластин из стеклопластика и углеродной ткани;
- 3) Приклеивание углеродной ткани в растянутой зоне с помощью соответствующих адгезивов на полиэтиленовых листах;
- 4) Выдерживание опытных образцов при нормальной температуре ((20±2) °С) и влажности ((50-55) %) в течении 7 суток.

Оценка деформативности систем для плоских образцов на четырехточечный изгиб в области упругих деформаций при нормальной температуре выполнено по ГОСТ 56805-2015. Схема испытания, экспериментальный стенд приведены на рис.1. Нагружение образцов производилось при помощи гидравлического домкрата, для измерения прогибов был установлен индикатор часового типа. Измерение нагрузки производилось по манометру.

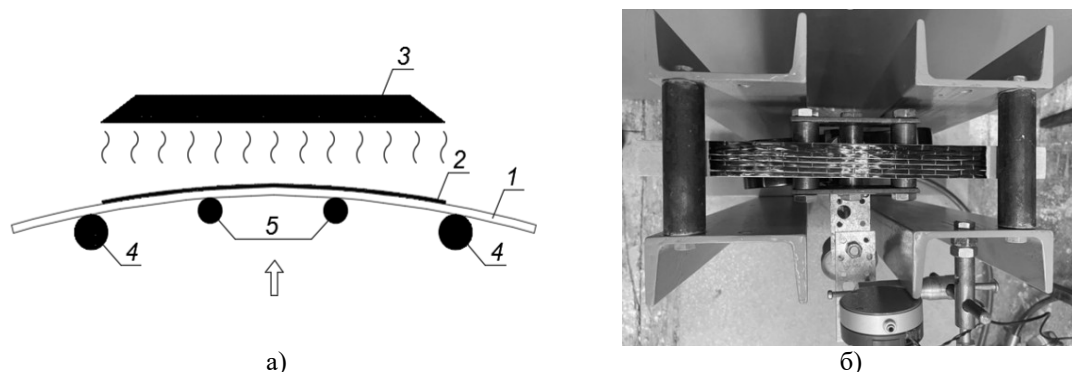


Рис. 1. а) схема испытания (1 – стеклопластик; 2 – углеродная ткань, 3 – электронагреватель, 4 – опоры, 5 – наконечники) б) вид сверху экспериментального стенда (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. a) test scheme (1 - fiberglass; 2 - carbon fiber, 3 - electric heater, 4 - supports, 5 - tips) b) top view of the experimental stand (illustration by the authors)

Определение ползучести систем производилось методом ступенчатых изотерм. К лабораторным образцам прикладывалась постоянная нагрузка (50% от средней разрушающей), пошаговая температура (шаг 5°C) с использованием электронагревателя. Деформации фиксировались с помощью микрометра. Испытания продолжались до разрушения образца/до завершения ползучести. Для оптимизации процесса проведения испытаний разработана компьютерная программа, фиксирующая прогибы и прикладываемую силу и автоматически высчитывающая предел прочности, модуль упругости с построением необходимых графиков.

3. Результаты и обсуждение

Результаты исследования систем на четырехточечный изгиб при нормальной температуре испытаний в области упругих деформаций представлено на рис. 2.

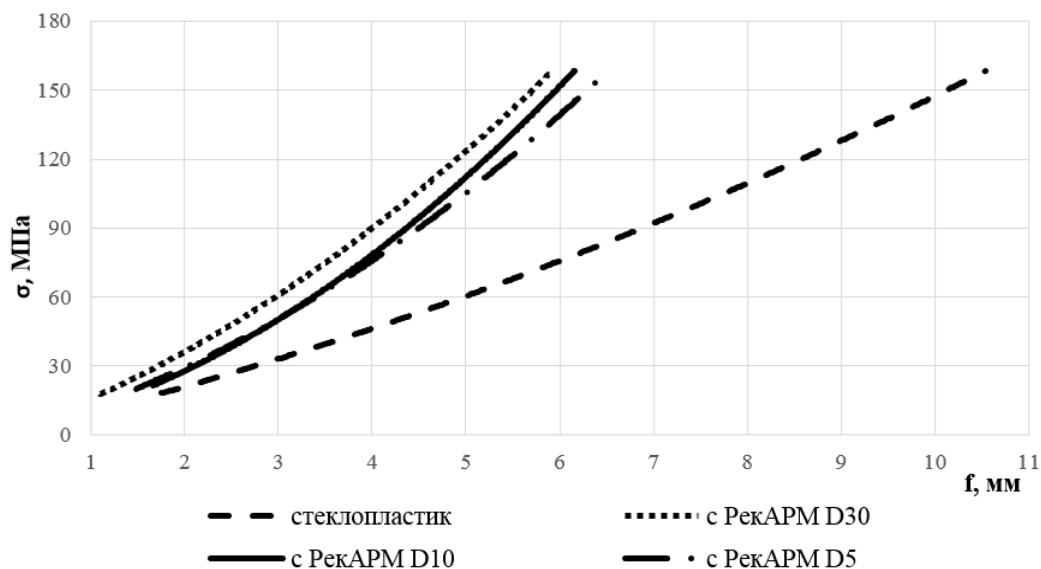


Рис. 2. Диаграмма «напряжения-прогибы» образцов стеклопластика, систем «стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным содержанием пластификаторов – углеродная ткань» в области упругих деформаций (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Deformation diagram of FRP samples, systems "FRP - epoxy adhesive compositions with different content of plasticizers - carbon fabric" in the area of elastic deformations (illustration by the authors)

Согласно диаграмме «напряжения-прогибы (определены по индикатору часового типа)», наибольшей деформативностью обладают стеклопластики, все системы «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань» положительно влияют на уменьшение прогибов,

близки между собой. Предполагаем, увеличение количества пластификаторов в составе эпоксидной смолы способствует повышению эластичности, небольшому увеличению модулей упругостей систем на четырехточечный изгиб при нормальной температуре испытаний.

Одно лишь увеличение предела прочности пултрузионного стеклопластика путем склеивания углеродных композитов в растянутой зоне при нормальной температуре испытаний для достижения требуемой долговечности недостаточно. С этой целью были проведены испытания ползучести систем с использованием составов РекАРМ–D5,...D10,...D30 при температурах от 25°C с шагом 5°C методом ступенчатых изотерм. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

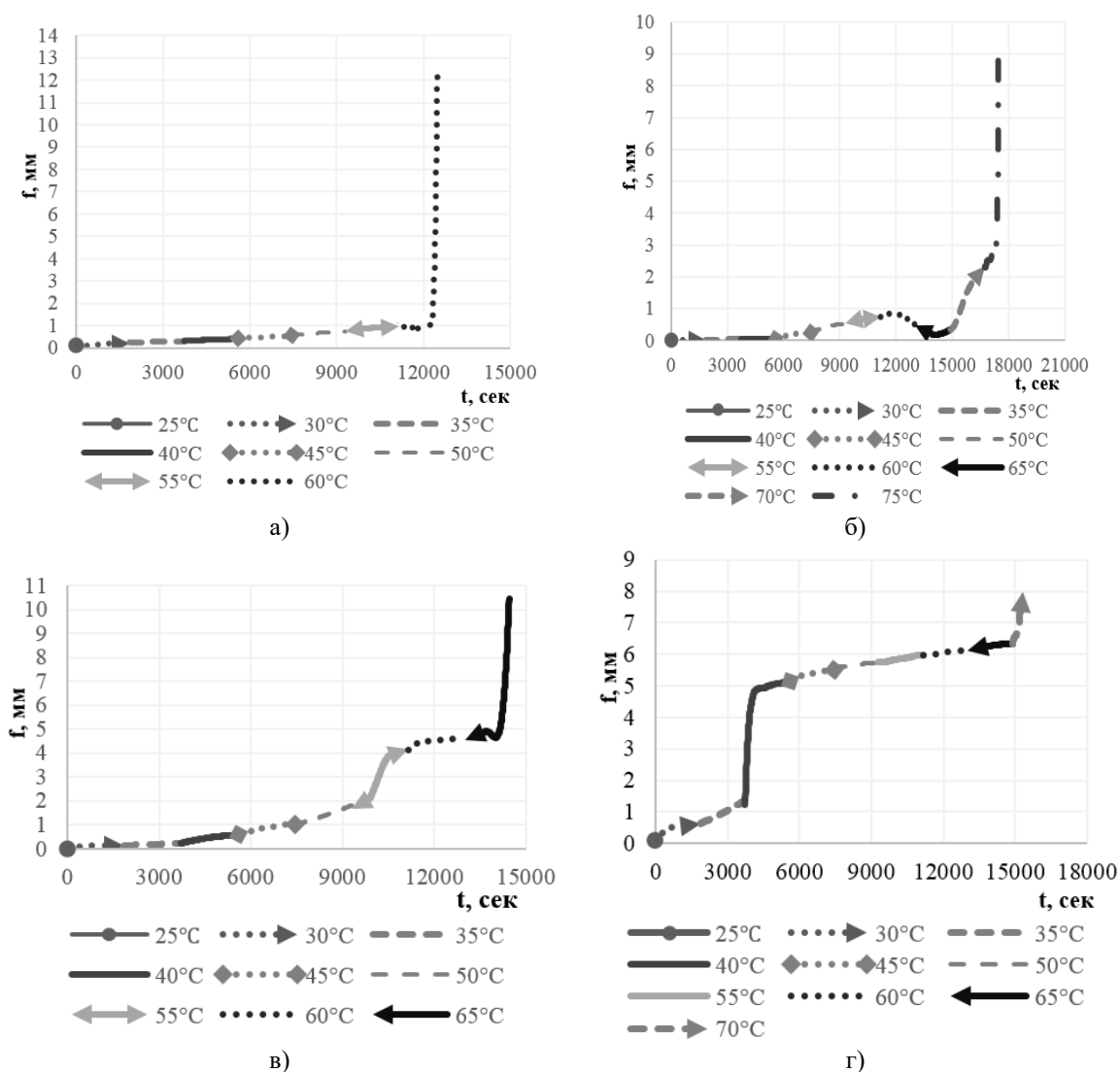


Рис. 3. Кривые ползучести а) стеклопластика; систем «стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным содержанием пластификаторов – углеродная ткань»: б) с РекАРМ D5; в) с РекАРМ D10; г) с РекАРМ D30 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Creep curves of a) fiberglass; systems "fiberglass - epoxy adhesives with different content of plasticizers - carbon fabric": b) with RekARM D5; c) with RekARM D10; d) with RekARM D30 (illustration by the authors)

Хрупкое разрушение пултрузионного стеклопластика при заданном постоянном напряжении происходило при 60°C через 3,3 ч. ступенчатого нагрева образца, для разработанных систем наблюдается отклеивание углепластика от стеклопластика с последующим хрупким разрушением стеклопластика с РекАРМ D5 при 60°C через 3,3 ч., с РекАРМ D10 при 55°C через 2,9 ч., с РекАРМ D30 при 40°C через 1,1 ч. испытания. Необходимо отметить, что при формировании систем также важным является обеспечение хорошей степени подготовленности поверхностей к склеиванию,

смачиваемости углеродных волокон в эпоксидных клеевых составах, адгезии органических смол к неорганическим волокнам, которая может достигаться за счет применения необходимых аппретов при получении волокон либо модификацией клеевых составов (за счет применения реакционноспособных термопластов, введением наночастиц различной природы и др.).

На рис. 4 приведены прогнозируемые кривые ползучести систем с различными клеевыми составами.

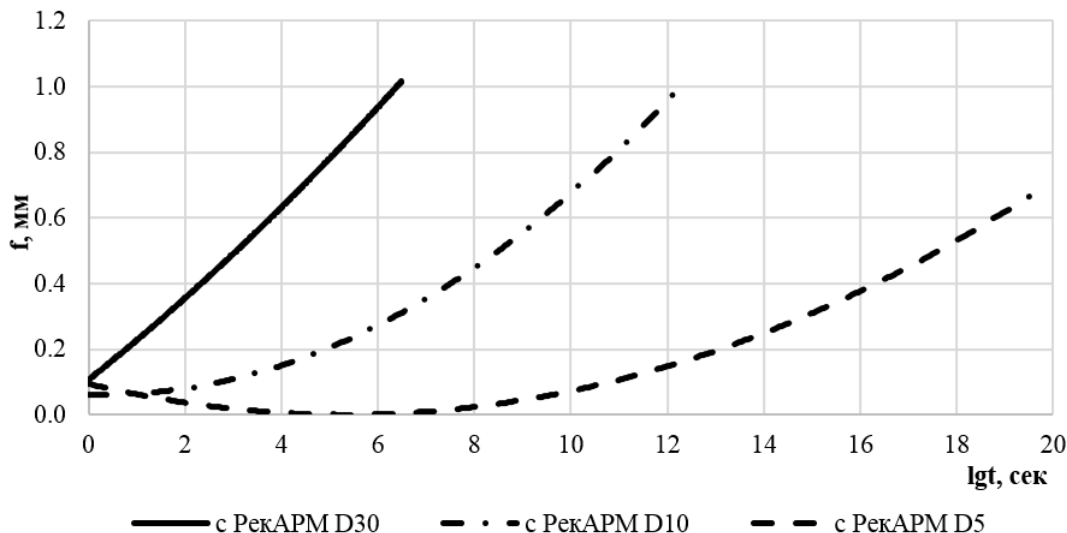


Рис. 4. Прогнозируемые кривые ползучести систем (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Predicted creep curves of systems (illustration by the authors)

По прогнозируемым кривым ползучести наглядно видно, что с увеличением пластификаторов в составе эпоксидной смолы наблюдается увеличение деформативности систем (с РекАРМ D30 > D10 > D5) в исследуемых температурных интервалах, уменьшение долговечности.

Разработка подходов к экспериментальному исследованию ползучести отдельных систем с использованием метода ступенчатых изотерм широко используется при анализе и прогнозировании кривых ползучести. Так, в работах [16, 17] методом ступенчатых изотерм получены единые обобщенные кривые, позволяющие прогнозировать долгосрочную деформацию ползучести и срок службы железобетонных балок, усиленных углепластиковыми. Увеличение скорости ползучести системы позволило выявить, что ползучесть бетона и углепластика обусловлена своего рода проскальзыванием адгезионного слоя между бетоном и углепластиком.

Учитывая вышеизложенное, необходимы также дальнейшие исследования физико-механических характеристик систем уже с учетом всех воздействий эксплуатационных факторов (УФ-излучение и др.) с определением коэффициентов условий работы систем с разработкой инструментариев для их оперативного определения.

4. Заключение

В данной работе представлены результаты исследований систем «пултрузионный стеклопластик – эпоксидные клеевые составы с различным количеством пластификаторов – углеродная ткань»:

1. Выявлено, что одно лишь уменьшение прогибов систем с различными клеевыми связующими (результаты деформирования близки между собой) при нормальной температуре испытаний не является гарантом выбора компонентов для обеспечения требуемой долговечности;

2. Предложен подход к экспериментальному исследованию температурно-временной зависимости ползучести для стеклопластиков, внешне армированных углепластиковыми для плоских образцов в лабораторных условиях с использованием метода ступенчатых изотерм;

3. Для исследуемых систем с увеличением количества пластификатора в составах эпоксидных смол наблюдается увеличение деформативности систем в исследуемых температурных интервалах;

4. Для повышения эффективности стеклопластиков, внешне армированных углепластиками, необходимым является исследование всех воздействий основных эксплуатационных факторов, разработка инструментариев (численных и эмпирических) для моделирования работы систем в заданных условиях, а также прогностического аппарата для оценки их работоспособности.

Список литературы/ References

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. [Kablov E.N. Materials of new generation and digital technologies of their processing // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. № 4. P. 331-334.]
2. Ашрапов А. Х., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К., Хозин В. Г. Исследование поливинилхлоридных композиций с углеродными нанотрубками // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2011. – Т. 3, № 3. – С. 13-24. – EDN ОАКННР. [Ashrapov A. H., Abdrakhmanova L. A., Nizamov R. K., Khozin V. G. Investigation of polyvinyl chloride compositions with carbon nanotubes // Nanotechnology in construction: scientific online journal. - 2011. – Volume 3, No. 3. – pp. 13-24. – ED. ОАКННР.]
3. Богаева И.О., Никишина Ю. С. Направления и практика при создании современных строительных композиционных материалов // Студенческий вестник. — 2022. — № 38-4(230). — С. 5-9. [Bogaeva I.O., Nikishina Yu.S. Directions and practice in the creation of modern construction composite materials // Student Bulletin. - 2022. - No. 38-4(230). — P. 5-9]
4. Цыгвинцев, И.В., Постникова П.И., Сенцов И.В. Применение композитных материалов в строительстве // Инновационное развитие. — 2017. — № 7(12). — С. 26–29. [Tsygvintsev I.V., Postnikova P.I., Sentsov I.V. Application of composite materials in construction // Innovative development. – 2017; No 7(12): P. 26-29.]
5. Евдокимов А.А., Имамединов 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. Кугаевский Н.М., Овчинников И.И. Оценка эффективности усиления железобетонных балок пролетных строений автодорожных мостовых сооружений полимерными композиционными материалами // Вестник Евразийской науки, 2021 №2, <https://esj.today/PDF/09SAVN221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. [Kugaevskiy N.M., Ovchinnikov I.I. (2021). Assessment of the effectiveness of strengthening of reinforced concrete beams of superstructures of road bridges with polymer composite materials. The Eurasian Scientific Journal, [online] 2(13). Available at: <https://esj.today/PDF/09SAVN221.pdf> (in Russian)]
7. Валиев А.И., Сулейманов А.М. Гибридные полимерные композиты конструкционного назначения // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 51–57. [Valiev A.I., Suleimanov A.M. Hybrid polymer composites for structural purposes. Zhilishchnoe Stroitelstvo [Housing Construction]. 2023. No. 12, P. 51-57] DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-51-57>
8. Низамов Р. К., Галеев Р. Р., Абдрахманова Л. А. Обоснование эффективности наполнения ПВХ-композиций тонкодисперсными отходами металлургических производств// Строительные материалы. – 2005. – № 7. – С. 18-20. – EDN HZFWBT. [Nizamov R. K., Galeev R. R., Abdrakhmanova L. A. Substantiation of the effectiveness of filling PVC compositions with finely dispersed waste from metallurgical industries // Building materials. – 2005. – No. 7. – pp. 18-20. – EDN HZFWBT.]

9. Алексеев Н.Н., Коваленко И.А., Столяров О.Н., Мельников Б.Е. Вязкоупругие свойства геосинтетических материалов, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №5 (56). С. 17-32. [Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Viscoelastic properties of geosynthetic materials, Construction of Unique Buildings and Structures, 2017; No 5(56). P.17-32.]
10. Старовойтова И.А., Шакиров А.Р., Зыкова Е.С., Семёнов А.Н., Сулейманов А.М. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций // Строительные материалы. 2021. № 1–2. С. 98–104. [Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zyкова E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. the study of physical and mechanical characteristics of modified adhesive binders for systems of external reinforcement of building structures // Building Materials. 2021. № 1-2. P. 98-104.] DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104>.
11. / J. Schalnath, A. Krairi, T. Wieme, W. Van Paeppegem. Experimental characterization of thermoplastics for use in heat exchangers: presented at the ICEM 2018. Brussels. 2018. Vol. 2. № 8.
12. Kuhl A., Munoz-Rojas P., Munoz-Rojas A., Barbieri R., Benvenuti I.J. A procedure for modeling the nonlinear viscoelastoplastic creep of HDPE at small strains // Polymer engineering and science, 2017, vol. 57, P. 144 - 152.
13. Bergstrom J.S. Mechanics of Solid Polymers. Theory and computational modeling, Elsevier, William Andrew, 2015, 520 p.
14. De Pascalis R., Abrahams I.D., Parnell W.J. On nonlinear viscoelastic deformations: a reappraisal of Fung's quasi-linear viscoelastic model // Proceedings of the Royal Society A. 2014, V.470, 20140058. doi: 10.1098/rspa.2014.0058.
15. Regalado, Arturo & Carpenter, Brice & Jáuregui, David & Weldon, Brad. (2017). Performance Evaluation of a Reinforced Concrete Slab Bridge Retrofitted with Carbon Fiber Reinforcement Polymer Laminate System. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2642. 68-76. 10.3141/2642-09.
16. 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 strengthened with carbon fiber. 2023. No. 4. P. 10-17.] DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X2023-812-4-10-17>
17. Shakirov, Almaz & Suleymanov, Alfred. (2021). Prediction of Creep for a Reinforced Concrete Beam Strengthened with an External Reinforcement System Using the Stepped Isothermal Method. 10.1007/978-3-030-80103-8_12.

Информация об авторах

Валиев Алмаз Илсурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tatcomposite@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

Almaz I. Valiev, postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: tatcomposite@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