

УДК: 691.328.4
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145
EDN: KGTNOV



Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры

Илшат Т. Мирсаяпов¹, В.А. Лим², А.И. Мирсаяпов², А.М. Сулейманов¹

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

²Казанский Гипронииавиапром им. Б.И. Тихомирова,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Интерес со стороны предприятий строительной отрасли к изделиям из полимерных композитных материалов с каждым годом растет. Наряду с известными достоинствами полимерной композитной арматуры существуют недостатки, которые препятствуют её применению в масштабном строительстве. Наиболее характерным недостатком является низкий модуль упругости по сравнению со сталью. Данное несовершенство возможно устранить путем использования в конструкциях высокомодульной полимерной композитной арматуры. Цель работы заключается в оценке эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых элементах. Задачами исследования являются: оценка прочности по нормальным сечениям изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой, а также сравнения показателей несущей способности бетонных балок, армированных стальной, низкомодульной и высокомодульной полимерной композитной арматурой.

Результаты. В работе представлена сравнительная оценка несущей способности по нормальным сечениям изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой, стальной арматурой и низкомодульной полимерной композитной арматурой.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что использование высокомодульной полимерной арматуры позволяет увеличить несущую способность бетонных изгибаемых элементов, при этом имея высокий модуль упругости по сравнению со сталью.

Ключевые слова: неметаллическая арматура, высокомодульная полимерная композитная арматура, прочность нормальных сечений, бетонные конструкции, изгибаемые элементы.

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.145-153, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145, EDN: KGTNOV

Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement

Pshat T. Mirsayapov¹, V.A. Lim², A.I. Mirsayapov², A.M. Suleymanov¹

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

²Kazan Giproniiaviaprom named after B.I. Tikhomirov,
Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. The interest of the enterprises of the construction industry in products made of polymer composite materials is growing every year. Along with the well-known advantages of polymer composite reinforcement, there are disadvantages that prevent its use in large-scale construction. The most characteristic disadvantage is the low modulus of elasticity compared to steel. This imperfection can be eliminated by using high-modulus polymer composite reinforcement in the structures. The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement in bending elements. The objectives of the study are to assess the strength in normal sections of bent concrete beams reinforced with high-modulus polymer composite reinforcement, as well as to compare the bearing capacity of concrete beams reinforced with steel, low-modulus and high-modulus polymer composite reinforcement.

Results. The paper proposes a comparative assessment of the increase in the ability of bending concrete beams in normal sections, reinforced with high-modulus polymer composite reinforcement, steel reinforcement and low-modulus polymer composite reinforcement.

Conclusions. The significance of results obtained for the construction industry lies in the fact that the use of high-modulus polymer reinforcement increases the load-bearing capacity of concrete bending elements, while having a significant high elasticity compared to steel.

Keywords: non-metallic reinforcement, high-modulus polymer composite reinforcement, strength of normal cross-sections, concrete structures, bendable elements.

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.145-153, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145, EDN: KGTNOV

1. Введение

В настоящее время изделия из полимерных композитных материалов вызывают большой интерес со стороны предприятий строительной отрасли в связи её известными преимуществами по сравнению со сталью [1-3]. Полимерная композитная арматура имеет большой опыт экспериментальных исследований. В течении последних 20 лет композитные материалы стали более выгодными для использования их в изгибаемых бетонных элементах. [4-7]. В настоящее время для армирования бетонных конструкций применяется арматура из композитных материалов на основе стеклянных, базальтовых, углеродных и комбинированных волокон в соответствии с ГОСТ 31938-2022. Эти виды материалов различаются своими физико-механическими характеристиками. Диапазон разброса прочности на растяжения варьируется от 1000 до 1400 МПа, а модуль упругости при растяжении – 50000-130000 МПа [9,10]. В связи с низким модулем упругости полимерной композитной арматуры, она не находит широкого применения в строительной отрасли [3,5,15].

Данный недостаток можно компенсировать путем использования высокомодульной полимерной композитной арматуры. В научно-исследовательском институте космических и авиационных материалов был получен полимерный композитный материал с прочностными и жесткостными характеристиками, превышающими характеристики стали [8]. «Аристар» — это ряд высокотехнологических композитных материалов, отличающихся высокими показателями прочности, трещиностойкости, термостойкостью, высокой химической и радиационной стойкостью, пожаробезопасностью. Например, углепластик марки «Аристар-В43» имеет предел прочности на растяжение, равный 2200 МПа, при этом модуль упругости при растяжении достигает порядка 270000 Мпа, что значительно выше, чем модуль упругости стали.

Целью работы является оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых бетонных элементах.

Объектом исследования являются изгибаемые бетонные элементы, армированные высокомодульной композитной арматуры. Предмет исследования – несущая способность по нормальному сечению изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой.

Задачами исследования являются:

- оценка напряжено-деформированного состояния изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой;
- сравнительный анализ показателей несущей способности изгибаемых бетонных балок, армированных стальной, низко-модульной и высоко-модульной полимерной композитной арматурой.

2. Материалы и методы

В нашей стране действует свод правил – СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». Согласно СП 295.1325800.2017 расчет по прочности нормальных сечений производится в зависимости от соотношения между значениями относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и значением граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R . Как подчеркивают Степанова В. Ф. [2] и Мухамедиев Т.А. [9] результаты экспериментальных исследований показывают, что расчет и работа бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой аналогична железобетонным элементам, с учетом различных коэффициентов на материал и адгезию материалов. На рис. 1 представлена блок-схема методики определения прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных полимерной композитной арматурой.

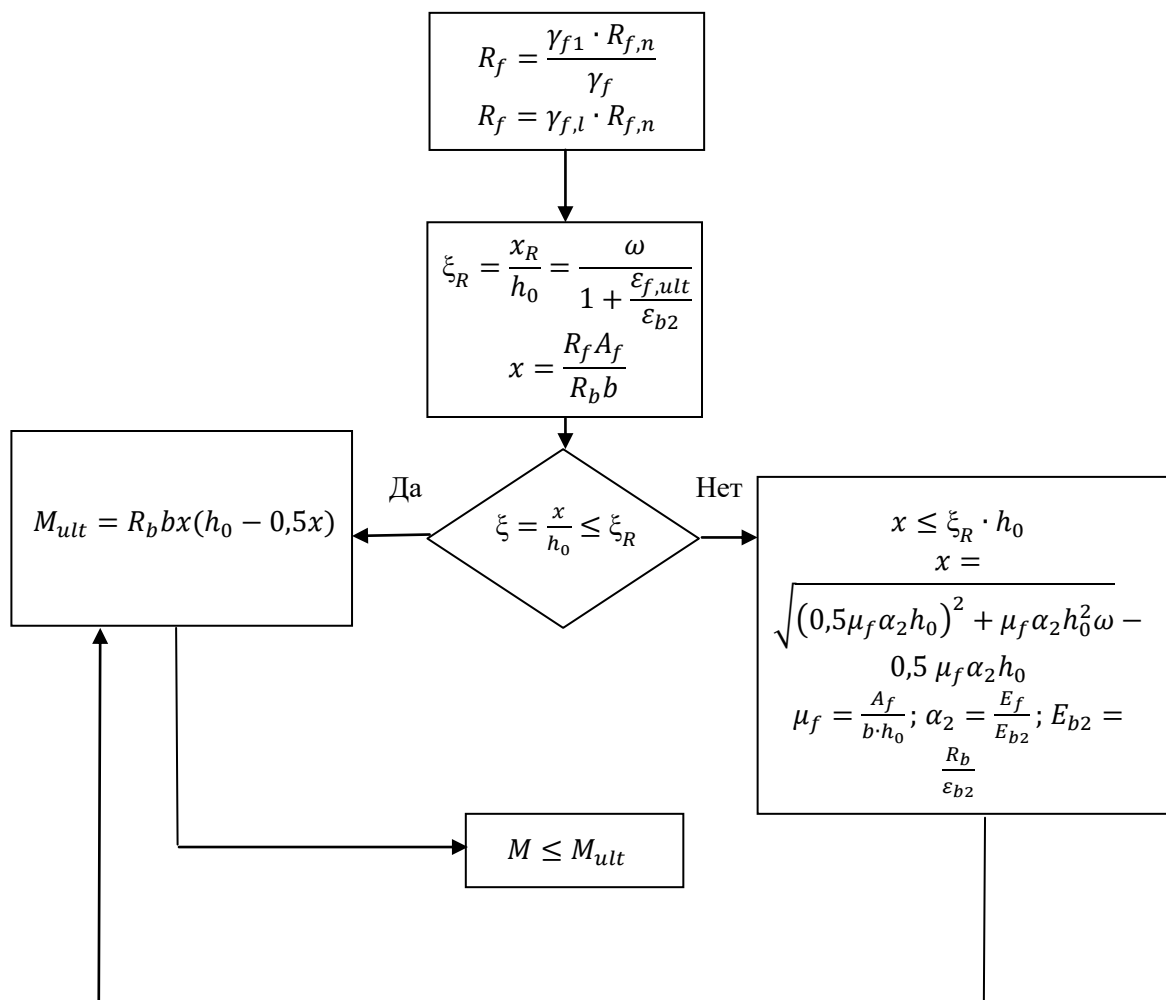


Рис. 1. Блок-схема методики определения несущей способности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных АКП по СП 295.1325800.2017
 Fig. 1. Block diagram of the methodology for determining the bearing capacity of normal sections of bent elements reinforced with automatic transmission according to SP 295.1325800.2017

За расчетные характеристики исследуемого объекта приняты следующие показатели высоко-модульной полимерной композитной арматуры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики высокомодульной полимерной композитной арматуры

№ серии	Маркировка балок	Армирование	Расчетный диаметр, мм	Расчетная площадь сечения A_s , мм ²	Модуль упругости E_f , МПа	Сопrotивление растяжению R_f , МПа
1	Бк-6уп	2 \varnothing 6 АУК	6	57	270000	2200
	Бк-8уп	2 \varnothing 8 АУК	8	101		
	Бк-10уп	2 \varnothing 10 АУК	10	157		

В табл. 1 АУК – это арматура углепластиковая композитная.

Для сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния (далее НДС) изгибаемых бетонных элементов, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой с НДС изгибаемых бетонных элементов, армированных низкоимодульной полимерной композитной арматурой и стальной арматурой, параметры бетонных балок (геометрические размеры поперечного сечения, расчетный пролет, расчетная схема) и характеристики низкоимодульной и стальной арматуры (модуль упругости, сопротивление растяжению, расчетный диаметр и расчетная площадь поперечного сечения), а также результаты напряженного деформированного состояния этих балок были взяты из экспериментальных исследований, прочности, трещиностойкости и деформативности по нормальному сечению бетонных изгибаемых элементов, армированных полимерной композитной арматурой, проведенных на кафедре ЖБК КГАСУ [10-14].

Базовый образец, используемый в [10-14], представлен на рис. 2. Расчетные характеристики низкоимодульной и стальной арматуры, используемые в [10-14], представлены в табл. 2.

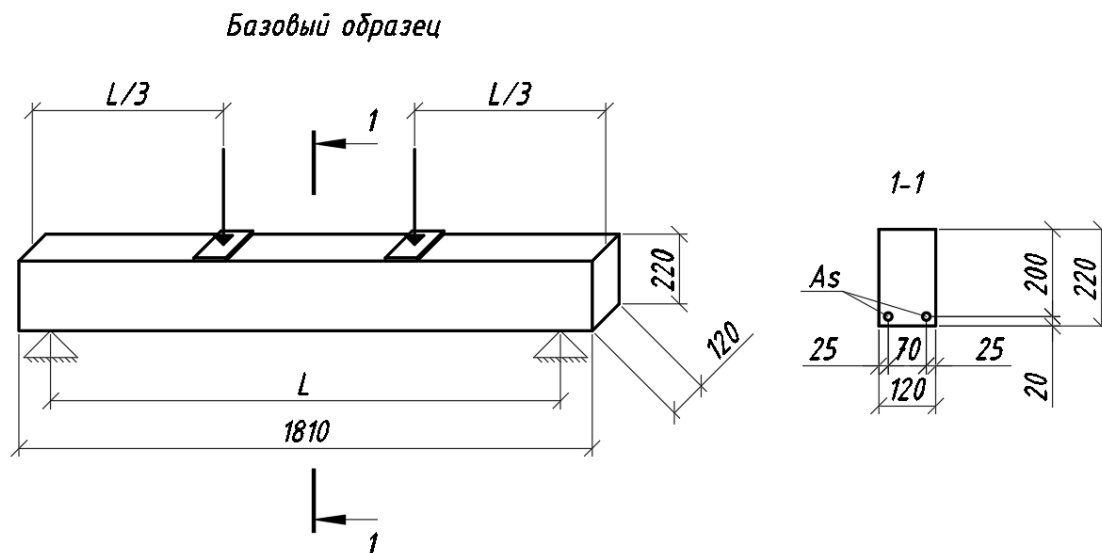


Рис.2. Схема базового бетонного образца балки Антакова И.А. [13]

Fig.2 Scheme of the basic concrete beam sample Antakova I.A. [13]

Таблица 2

Расчетные характеристики низко модульной полимерной композитной и стальной арматуры

№ серии	Маркировка балок	Армирование	Расчетный диаметр, мм	Расчетная площадь сечения A_s , мм ²	Модуль упругости E_f , МПа	Сопротивление растяжению R_f , МПа
1	Бк-12ст	2 ϕ 12 A400	12	226	200000	400
	Бк-8ст	2 ϕ 8 A400	8	101		
	Бк-6ст	2 ϕ 6 A400	6	57		
2	Бк-10сп	2 ϕ 10 АСК	8,6	116,12	55000	1200
	Бк-8сп	2 ϕ 8 АСК	7	76,93		
	Бк-6сп	2 ϕ 6 АСК	5	39,25	51770	1250

3. Результаты и обсуждение

В ходе расчета, согласно блок-схеме, приведенной на рис.1, были определены величины относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и значения граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R , представленные в табл. 3.

Таблица 3

Сопоставление величин относительной высоты сжатой зоны бетона " ξ " и граничной относительной высоты сжатой зоны " ξ_R "

Вид армирования	Маркировка балок	Величины ξ и ξ_R по СП295.1325800.2017			Характер разрушения
		ξ	ξ_R	ξ/ξ_R	
A400	Бк-6ст	0,0313	0,509	0,0615	Разрыв арматуры
	Бк-8ст	0,0558	0,509	0,11	Разрыв арматуры
	Бк-12ст	0,126	0,509	0,248	Разрушение бетона сжатой зоны
АСК	Бк-6сп	0,0525	0,101	0,518	Разрыв арматуры
	Бк-8сп	0,099	0,105	0,95	Разрыв арматуры
	Бк-10сп	0,15	0,105	1,44	Разрушение бетона сжатой зоны
АУК	Бк-6уп	0,143	0,334	0,428	Разрыв арматуры
	Бк-8уп	0,253	0,334	0,757	Разрыв арматуры
	Бк-10уп	0,393	0,334	1,18	Разрушение бетона сжатой зоны

В табл. 3. представлены отношения величин относительной высоты сжатой зоны бетона ξ к значениям граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R , и соответствующий этим отношениям характер разрушения балки.

Результаты сопоставления величин предельного изгибающего момента для стальной, низко модульной [10-14] и высоко модульной арматуры диаметрами 6 мм, 8мм, 10(12) мм представлены на рис. 3.

По результатам анализа расчета несущей способности были определены отношения величины предельного изгибающего момента (табл. 4), которые характеризуют эффективность применения высоко модульной полимерной композитной арматуры.

Таблица 4

Отношение величины предельного изгибающего момента стальной и низко модульной полимерной композитной арматуры к высоко модульной полимерной композитной арматуры

Вид армирования	Маркировка балок	Величины ξ и ξ_R по СП295.1325800.2017		
		M_{ult}	$M_{ult}(A400, АСК)/M_{ult}(АУК)$	$M_{ult}(АУК)/M_{ult}(А400, АСК)$
А400	Бк-6ст	4,421	0,32	3,16
	Бк-8ст	7,698	0,33	3,03
	Бк-12ст	16,432	0,54	1,88
АСК	Бк-6сп	9,436	0,68	1,48
	Бк-8сп	17,24	0,74	1,35
	Бк-10сп	21,025	0,68	1,46
АУК	Бк-6уп	13,976	-	-
	Бк-8уп	23,298	-	-
	Бк-10уп	30,766	-	-

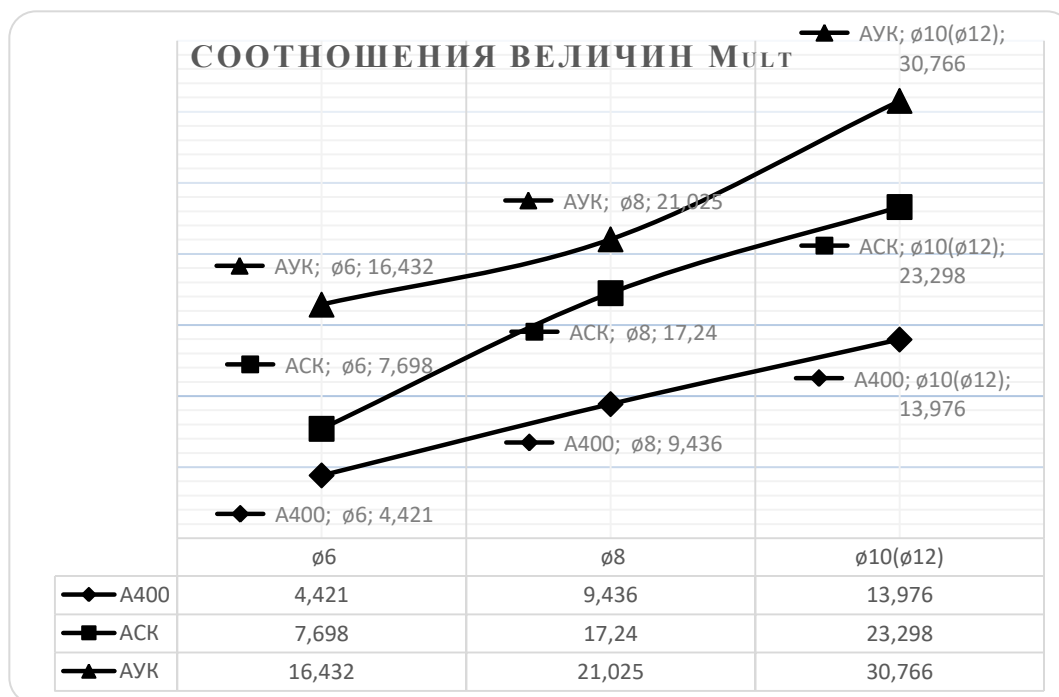


Рис. 3. Соотношение величин предельного изгибающего момента стальной, низко модульной, высоко модульной полимерной композитной арматуры (иллюстрация автора)

Fig. 3. The ratio of the values of the limiting bending moment of steel, low-modulus, high-modulus polymer composite reinforcement (illustration by the authors)

В результате оценки прочности по нормальному сечению изгибаемых бетонных балок, армированных стальной, низко модульной и высоко модульной полимерной композитной арматуры, выявлено, что несущая способность балок, армированных высоко модульной полимерной композитной арматуры выше по сравнению со стальной арматурой в 3,16 раза для арматуры диаметром 6 мм, в 3,03 раза – для диаметра 8 мм, в

1,88 раза – для диаметра 10(12) мм, по сравнению с низко модульной арматурой в 1,48 раза для арматуры диаметром 6, в 1,35 раза – для диаметра 8, в 1,46 раза – для диаметра 10.

4. Заключение

Проведена оценка эффективности применения высоко модульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых элементах. Выявлено, что использование высоко модульной углепластиковой арматуры имеет положительный эффект для прочности по нормальному сечению изгибаемых бетонных элементов. Наиболее эффективной оказалась высоко модульная полимерная композитная арматура диаметром 6 мм по сравнению со стальной и низко модульной полимерной композитной арматурой.

Так как для полной картины напряженно-деформируемого состояния необходимо учитывать прочность по наклонным сечениям, влияние арматуры сжатой зоны, то в дальнейшем планируется провести ряд теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы/References

1. Степанов А.Ю., Римшин В.И. Напряженно-деформированное состояние конструкций зданий и сооружений, армированных композитной полимерной арматурой при сейсмическом воздействии // Строительство и реконструкция №1 (57) 2015 (январь-февраль) С. 57-61. [Stepanov A.Yu., Rimshin V.I. Stress-strain state of structures of buildings and structures reinforced with composite polymer reinforcement under seismic impact // Construction and Reconstruction No. 1 (57) 2015 (January-February) P. 57-61.].
2. Степанова В.Ф., Степанова А.Ю., Жирков Е.П. Арматура композитная полимерная: - М. 2013. – 200 с. [Stepanova V.F., Stepanova A.Yu., Zhirkov E.P. Composite polymer reinforcement: - М. 2013. – 200 p].
3. Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения // Вестник Полоцкого государственного университета, 2015, Серия F, №16 С. 48-53. [Gil A.I., Badalova E.N., Lazovsky E.D. Fiberglass and carbon fiber reinforcement in construction: advantages, disadvantages, application prospects // Bulletin of Polotsk State University, 2015, Series F, No. 16, P. 48-53.].
4. Mathias Hammerl, Benjamin Kromoser. The influence of pretensioning on the load-bearing behaviour of concrete beams reinforced with carbon fibre reinforced polymers // Composite Structures 273 (2021) P. 1-10
5. Sami Sbahien, Furqan Tahir, Sami G. Al-Ghamdi. Environmental and mechanical performance of different fiber reinforced polymers in beams // Materials Today: Proceedings 62 (2022) P. 3548-3552
6. Andrew Y.Chen, Sebastian Baehr, Austin Turner, Zilan Zhang, Grace X. Gu. Carbon-fiber reinforced polymer composites: A comparison of manufacturing methods on mechanical properties // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 4 (2021) P. 468-479.
7. Антаков, И. А. Совершенствование методики расчета прочности нормальных сечений изгибаемых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой / И. А. Антаков // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции, Чебоксары, 21–22 ноября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 119-127. [Antakov, I. A. Improvement of the methodology for calculating the strength of normal sections of bent concrete elements with composite polymer reinforcement / I. A. Antakov // New in architecture, design of building structures and reconstruction: Materials of the IV International (X All-Russian) Conference, Cheboksary, November 21-22, 2018. Cheboksary: I.N. Ulyanov Chuvash State University, 2018. – P. 119-127.].
8. Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов // niikam.ru. URL: <http://www.niikam.ru> (дата обращения: 01.04.2023). [Research

- Institute of Space and Aviation Materials // niikam.ru. URL: <http://www.niikam.ru> (reference date: 01.04.2023)]
9. Мухамедиев, Т.А. К расчету по прочности изгибаемых конструкций из бетона с композитной полимерной арматурой / Т.А. Мухамедиев, Д.В. Кузеванов // Строительная механика и расчет сооружений. – М., 2016. – № 4 (267). – С. 18-22. [Mukhamediev, T.A. The calculation of the strength of bent structures made of concrete with composite polymer reinforcement / T.A. Mukhamediev, D.V. Kuzevanov // Construction mechanics and calculation of structures. - M., 2016. - No. 4 (267). - P. 18-22.]
 10. Mirsayapov, I., Antakov, I., Antakov, A. Experimental and Theoretical Analysis of Crack Resistance and Deformability of Concrete Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars//Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 291, P. 381–404.https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_34
 11. Ilshat Mirsayapov, Igor Antakov and Aleksey Antakov / Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012057.
 12. Ил.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 16. Выпуск 4 2021, С.413. [И.Т. Mirsayapov, I.A. Antakov, A.B. Antakov On the calculation of deflections of bent concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement// Bulletin of MGSU Volume 16. Issue 4, 2021, P.413.]
 13. И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 15. Выпуск 12, 2020, С.1663. [И.Т. Mirsayapov, I.A. Antakov, A.B. Antakov. Calculation of the crack opening width of bent concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement// Bulletin of MGSU Volume 15. Issue 12, 2020, P.1663.]
 14. Антаков, И. А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой / И. А. Антаков // Жилищное строительство. – 2018. – № 5. – С. 15-18. [Antakov, I. A. Features of the work of bent elements with composite polymer reinforcement under load / I. A. Antakov // Housing construction. – 2018. – No. 5. – P. 15-18.]
 15. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Экспериментальное исследование поведения прочности при изгибе бетонных балок армированных ПКА и сравнение предельного момента нагрузки с АСІ // Журнал гражданского строительства и строительных технологий, Том 1(2), Декабрь, 2010. - С. 27-42. [Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Experimental Study of Flexural Strength Behavior of PCB Reinforced Concrete Beams and Comparison of Ultimate Load Moment with ACI // Journal of Civil Engineering and Construction Technologies, Volume 1(2), December, 2010. - P. 27-42.]

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: mirsayapovit@mail.ru

Лим Владимир Александрович, аспирант, инженер 2-й категории, Казанский Гипронииавиапром им. Б.И. Тихомирова, г. Казань, Российская Федерация.

Email: v.lim@gap-rt.ru

Мирсаяпов Арслан Илшатович, аспирант, инженер 2-й категории, Казанский Гипронииавиапром им. Б.И. Тихомирова, г. Казань, Российская Федерация.

Email: a.mirsayapov@gap-rt.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Ilshat T. Mirsayapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: mirsayapovit@mail.ru

Vladimir A. Lim, post-graduate student, engineer of the 2nd category, Kazan Giproniiaviaprom named after B.I. Tikhomirov, Kazan, Russian Federation.

Email: v.lim@gap-rt.ru

Arslan I. Mirsayapov, post-graduate student, engineer of the 2nd category, Kazan Giproniiaviaprom named after B.I. Tikhomirov, Kazan, Russian Federation.

Email: a.mirsayapov@gap-rt.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru