

## Изучение потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести

Булат Шавкатович Умаров<sup>1</sup>, Тагир Альмирович Зиннуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Татавтодор; г. Казань, Россия;*

<sup>2</sup> *Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Потери напряжений полимеркомпозитной арматуры в предварительно напряженном бетоне являются одной из основных проблем, влияющих на их трещиностойкость и жесткость. Однако на сегодняшний день данный вопрос изучен не в достаточной мере. Предложены методы определения потерь от релаксации стеклопластиковой арматуры, а также приведены экспериментальные исследования потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре на разных уровнях начального натяжения. Результаты исследования показывают характер снижения усилий в стеклопластиковых стержнях, приведены зависимости потери напряжений с течением времени.

**Материалы и методы.** В качестве основы используются результаты анализа и систематического обобщения сведений, полученных из отечественных и зарубежных источников, посвященных вопросам потерь усилий в предварительно напряженных композитных стержнях от релаксации и ползучести. На базе результатов экспериментальных данных предложены логарифмические зависимости потерь напряжений с течением времени.

**Результаты.** В результате проведенного эксперимента удалось зафиксировать характер изменения усилий в предварительно напряженных стеклопластиковых стержнях. Для описания релаксационной составляющей потерь напряжений в стеклопластиковом стержне с течением времени хорошо подходит логарифмическая зависимость.

**Выводы.** В рамках научного исследования проведен анализ потерь предварительного напряжения стеклопластиковых стержней при релаксации. В настоящее время различными авторами предлагаются данные о потерях предварительного натяжения в различных полимеркомпозитных материалах, главным образом это арматура на основе углепластиковых и арамидных волокон, стержни на основе стеклянных волокон изучены не в полной мере.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полимерная композитная арматура, стеклопластиковая арматура, потери предварительного натяжения, релаксация, ползучесть, предварительное напряжение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Умаров Б.Ш., Зиннуров Т.А. Изучение потерь напряжения в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.50-59

*Автор, ответственный за переписку:* Булат Шавкатович Умаров, bulat.umar@gmail.com.

## Study of stress loss in fibreglass reinforcement under relaxation and creep

Bulat Sh. Umarov<sup>1</sup>, Tagir A. Zinnurov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Tatavtodor; Kazan, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Stress loss of polymer-composite reinforcement in prestressed concrete is one of the main problems affecting their crack resistance and stiffness. However, to date this issue has not been sufficiently studied. The paper proposes methods for determining losses from relaxation of fibreglass reinforcement, and also provides experimental studies of stress losses in fibreglass reinforcement at different levels of initial tension. The results of the study show the nature of the reduction in forces in fibreglass rods, and the dependences of stress loss over time are also proposed.

**Materials and methods.** The results of the analysis and systematic synthesis of data obtained from domestic and foreign sources on the issues of force loss in prestressed composite rods from relaxation and creep are used as a basis. Based on the results of experimental data, logarithmic dependences of voltage losses over time are proposed.

**Results.** As a result of the experiment, it was possible to record the nature of the change in forces in prestressed fibreglass rods. A logarithmic dependence is well suited to describe the relaxation component of stress losses in a fibreglass rod over time.

**Conclusions.** The study of stress losses in fibreglass reinforcement during relaxation and creep showed that stress losses are most pronounced in the first days after tensioning the reinforcement, with a subsequent decrease in the rate of losses over time. Relaxation losses in fibreglass reinforcement were quantitatively determined based on the experiments conducted, which confirmed that the logarithmic dependence describes well the nature of stress losses in the material. The scientific novelty of the study lies in obtaining experimental data on the relaxation of reinforcement made of domestic fibreglass, which complements existing knowledge and allows us to clarify regulatory documents, such as CP 295.1325800.2017. The practi-

cal significance of the work lies in the fact that the results obtained allow us to predict the durability and performance characteristics of structures using fibreglass reinforcement, as well as make adjustments to existing engineering solutions to minimize stress losses. Recommendations for practice include the need for further research to refine the relaxation factors as a function of initial stress and to develop more accurate calculation methods for engineering applications.

**KEYWORDS:** polymer composite reinforcement, fibreglass reinforcement, stress losses, relaxation, creep, prestressing

**FOR CITATION:** Umarov B.Sh., Zinnurov T.A. Study of stress loss in fibreglass reinforcement under relaxation and creep. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):50-59. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.50-59 (rus.).

*Corresponding author:* Bulat Sh. Umarov, bulat.umar@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время объем производства полимерной композитной арматуры (АПК) увеличился, она стала доступной для строительства, однако на практике, особенно в ответственных конструкциях, работающих на растяжение, изгиб и другие сложные воздействия, широкого распространения не получила [1, 2].

Как уже отмечали многие авторы, основной недостаток АПК — низкий модуль упругости (50–60 ГПа) [3, 4], он ближе к бетону, чем к стали, что ведет к значительным деформациям и трещинообразованию бетонных конструкций [5, 6]. Для решения проблемы высокой деформативности пластикобетонных конструкций, армированных неоднородной и структурно сложной полимерной композитной арматурой, предлагается ее предварительное натяжение [7, 8]. Этот способ повышения жесткости изгибаемых элементов известен с 1936 г., широко применяется для натяжения рабочих стержней арматуры из высокопрочных сталей.

Потери напряжений в предварительно напряженном бетоне являются одной из ключевых проблем, влияющих на трещиностойкость, а следовательно, долговечность изгибаемой конструкции [9].

Композитные материалы, подвергающиеся постоянным с течением времени внутренним усилиям,

демонстрируют потери напряжения [10]. Согласно *Fib Bulletin* (2007)<sup>1</sup>, релаксацию композитных стержней можно представить как разность между начальным и конечным уровнем усилия, полученного по результатам эксперимента, что для объективной оценки потребует не менее 1 млн ч. Для композитов общая релаксация развивается в результате релаксации смолы, релаксации волокон, а также выпрямления волокон. Исследователи отмечают, что скорость релаксации напряжения зависит от соотношения модулей упругости смолы и волокна, а также объемной доли полимерной матрицы. Процесс релаксации развивается с первых минут передачи начальной нагрузки на стержень, при этом она может увеличиваться под воздействием высоких температур [11].

Цель настоящей работы заключается в исследовании и уточнении параметров снижения усилий в стеклопластиковом стержне при релаксации и ползучести.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Релаксация композитного армирования, включая стеклопластиковую арматуру (GFRP), описывается

<sup>1</sup> Fib Federation International de beton fib 2007. Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. The International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007.



Рис. 1. Оптоволоконный тензодатчик, установленный на стержне

Fig. 1. Fibre optic strain gauge mounted on a rod

Табл. 1. Ослабление усилий в арматуре согласно Fib 2010<sup>2</sup>

Table 1. Reduction of forces in reinforcement according to Fib 2010<sup>2</sup>

Тип сухожилия Tendon type	Продолжительность Duration	
	1000 ч, % 1,000 h, %	50 лет (прогноз, %) 50 years (forecast, %)
Стеклопластик Fibreglass	1,8–2,0	4,0–14,0
Углепластик Carbon fibre	0,5–1,0	2,0–10,0
Арамид Aramid	5,0–8,0	11,0–25,0

в нескольких международных стандартах и рекомендациях. Вот некоторые из них:

1. ACI 440.4R-04 (American Concrete Institute).

Этот стандарт предоставляет рекомендации по использованию FRP (Fiber Reinforced Polymer) арматуры в предварительно напряженных бетонных конструкциях. В нем обсуждаются релаксационные характеристики композитной арматуры и предлагаются модели для оценки потерь напряжений в зависимости от времени и условий эксплуатации.

2. CSA S806 (Canadian Standards Association).

Канадский стандарт для проектирования и строительства с использованием композитных материалов. Документ охватывает аспекты, связанные с релаксацией и долгосрочной прочностью FRP арматуры. В нем также приведены методы расчета потерь напряжений из-за релаксации, учитывающие климатические условия.

3. fib Bulletin 40.

Норматив от International Federation for Structural Concrete (fib) содержит рекомендации по использованию FRP арматуры в бетонных конструкциях. В нем обсуждаются вопросы долговременной деформации и релаксации композитной арматуры, включая методики расчета и предсказания потерь напряжений.

4. ISO 10406-1:2015.

Стандарт ISO предоставляет общие требования к FRP арматуре для бетонных конструкций; охватывает различные аспекты поведения композитных материалов, включая релаксацию, и устанавливает требования к испытаниям и расчетам потерь напряжений.

5. Европейские стандарты (CEN).

В рамках европейских стандартов (например, EN 13706) обсуждаются общие свойства композитных материалов, включая релаксацию, хотя конкретные аспекты могут варьироваться в зависимости от применяемого материала и метода проектирования.

Эти нормы и стандарты предоставляют рекомендации для проектировщиков и инженеров, помогая учитывать релаксационные потери в композитной арматуре и обеспечивать долговечность конструкций.

В работе Рингира и Зданович (2015) [11] отмечается, что тип армирующего волокна по-разному

способствует перераспределению напряжений в стержне. Они рекомендуют оценивать релаксацию при помощи зависимости:

$$REL3 = 0,231 + 0,345 \log(t),$$

где  $t$  — время в днях.

Как правило, арматура из углепластика не склонна к снижению напряжений со временем, потери достигают от 1 до 3 %, а арамидные и стеклянные волокна в стержнях, в свою очередь, могут демонстрировать релаксацию напряжения до 30 % в зависимости от технологии производства<sup>1</sup>.

В документе ACI 440 4R-04<sup>3</sup> значительная релаксация арамидных волокон описывается их ползучестью. Поскольку при изготовлении арматуры структура волокон непараллельна друг другу, во время ее натяжения происходит процесс, называемый выпрямлением волокна. Потери напряжений, вызванные этим явлением, зависят от скорости технологического процесса производства стержней и составляют от 1 до 2 % от начального напряжения [11].

Релаксация полимерной композитной арматуры также описывается в работе китайских исследователей Li Guo-wei, Pei Hua-Fu и Hong Cheng-yu [12], которые изучали релаксацию базальто-стеклопластиковых опесчаненных стержней больших диаметров. Особый интерес вызвала постановка эксперимента, изменения напряжений в натянутом стержне на жестких упорах фиксировались оптоволоконными тензодатчиками, установленными непосредственно на стержнях (рис. 1).

Результаты исследований показали, что значения релаксации напряжений за десять лет при начальном напряжении 30 % от предела прочности составляют 7,98 %, а наибольшие значения потерь проявляются в первые 7 дней после натяжения, затем скорость снижения напряжения становится меньше.

В работе чешских ученых 2008 г. Fornusek, Konvalinka и Sovják [13] исследовалась релаксация предварительно напряженных стеклопластиковых стержней, расположенных внутри бетонных изгибаемых конструкций. Напряжения в стержнях также фиксировались тензодатчиками, в ходе испытаний <sup>3</sup> ACI440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. American Concrete Institute Committee Report, 2004.

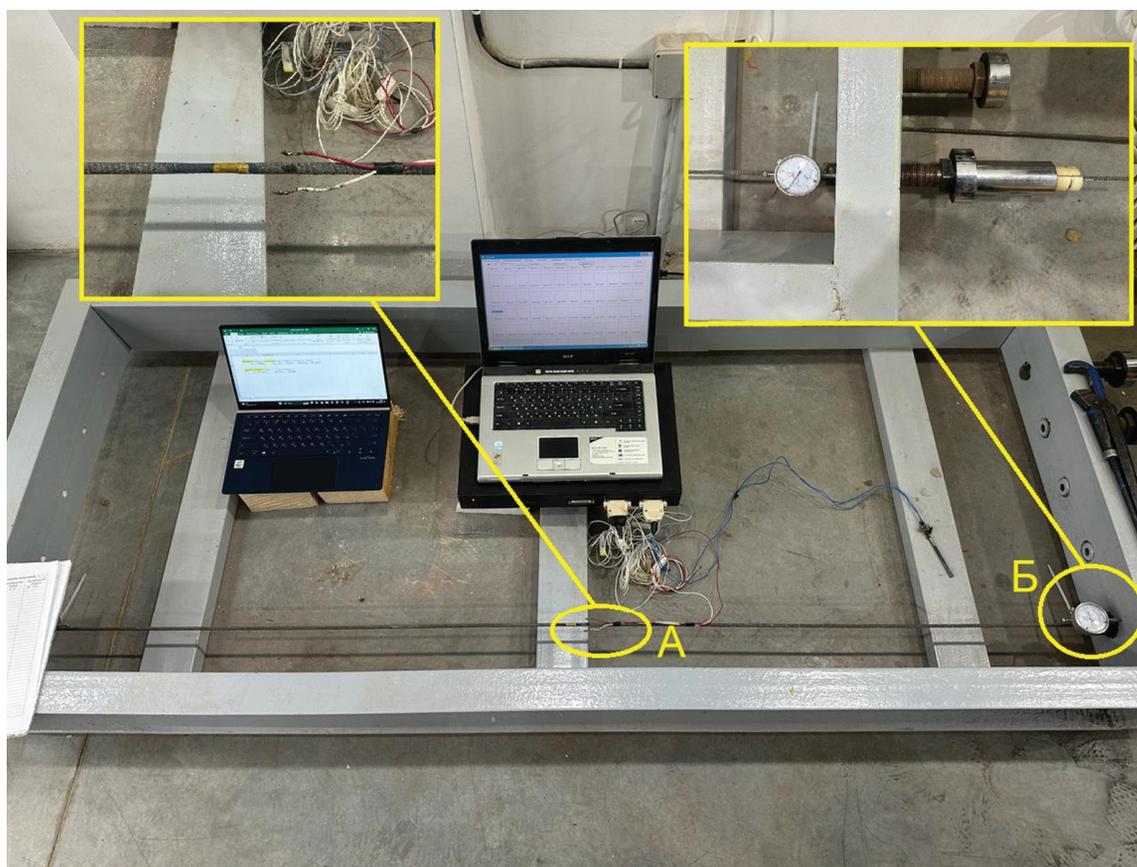


Рис. 2. Фиксация потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре на испытательной раме: зона А — тензодатчик на стержне; зона Б — анкерное устройство с индикатором перемещений

Fig. 2. Recording stress losses in fibreglass reinforcement on the test frame: zone A — strain gauge on the rod; zone B — anchor device with displacement indicator



Рис. 3. Фиксация потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре при подвешивании

Fig. 3. Fixing stress losses in fibreglass reinforcement when hanging

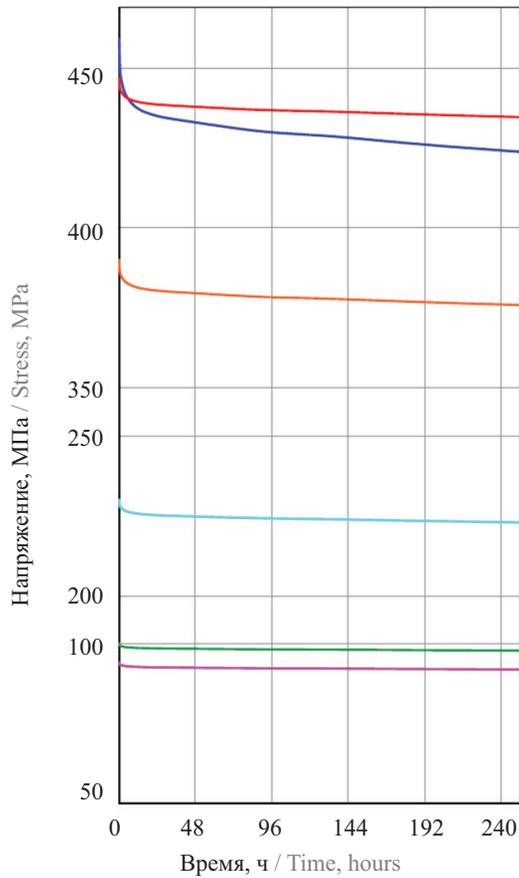


Рис. 4. Графики зависимости усилий в арматуре с течением времени

Fig. 4. Graphs of forces in reinforcement over time

наблюдалось резкое ослабление натяжения стержней из стеклопластика (табл. 1). В итоге потери напряжения в результате релаксации арматуры через первые 24 ч составили около 3,3 %, через 28 дней — 7,3 %, а в конце опыта через 132 дня — 10,5 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Табл. 2. Результаты эксперимента оценки потерь напряжений в стеклопластиковых стержнях

Table 2. Experimental results for assessing stress losses in fibreglass rods

Номер Number	Начальное напряжение, МПа Initial stress, MPa	Потери напряжения в стержне на 90 сут Tension loss in the rod at 90 days			Функция аппроксимации полученных значений снижения напряжений при эксперименте Approximation function of the obtained stress reduction values during the experiment
		общие, МПа general, MPa	от проскальзывания в анкерах, МПа slipping in anchors, MPa	от релаксации, МПа (отклонение от начального) relaxation, MPa (deviation from initial)	
1*	94	1,9	–	1,9 (2 %)	$f(x) = 94 - 0,239 \cdot \ln(x)$
2	100	4,37	2,36	2,01 (2 %)	$f(x) = 100 - 0,239 \cdot \ln(x)$
3	230	13,42	7,89	5,52 (2,4 %)	$f(x) = 230 - 0,799 \cdot \ln(x)$
4	390	105	92	13 (3 %)	$f(x) = 390 - 1,588 \cdot \ln(x)$
5	460	60,59	38,48	22,11 (4,8 %)	$f(x) = 460 - 3,974 \cdot \ln(x)$
6*	447	15,65	3,97	11,69 (2,6 %)	–

Анализ исследований показал недостаточную экспериментальную базу по изучению потерь напряжений в стеклопластиковых стержнях, некоторые эксперименты имеют довольно большие расхождения, поэтому было решено провести дополнительные исследования потерь от релаксации стеклопластиковой арматуры отечественного производства.

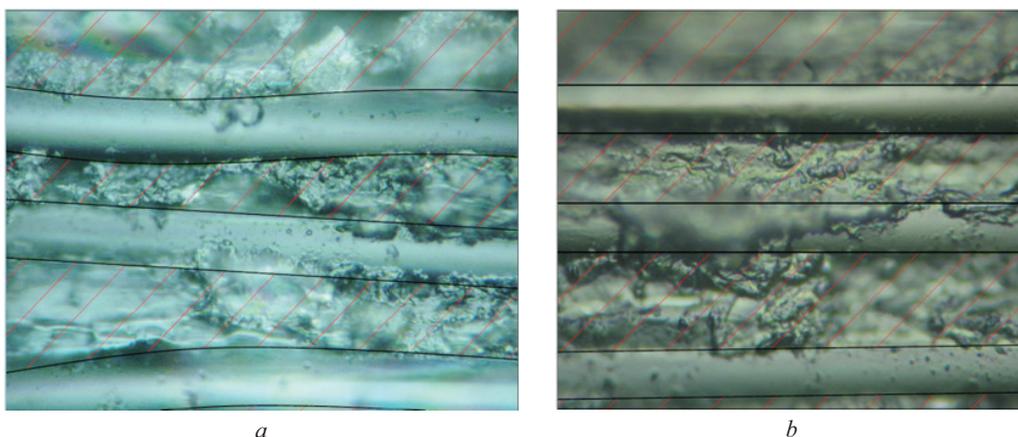
Согласно рекомендациям СП 295.1325800.2017, предварительные напряжения арматуры  $\sigma_{fp}$  следует принимать не более  $0,45 R_{fn}$  для стеклокомпозитной арматуры. Потери от релаксации напряжений стеклопластиковой арматуры  $\Delta\sigma_{fp1}$  принимают равными  $0,2\sigma_{fp}$ , однако в нормативном документе имеется сноска, что при наличии более точных данных о релаксации арматуры допускается принимать иные значения потерь от релаксации.

Учитывая особенности системы натяжения и работы стержней стеклопластиковой арматуры (АСК) [14, 15], требуется корректировка зависимостей по потерям от релаксации АСК и от проскальзывания в анкерах [16].

Для определения потерь от релаксации и проскальзывания в анкерах проведен эксперимент, когда арматурный стержень диаметром 5,5 мм (стеклопластиковый) фиксировался на испытательной раме с помощью анкеров, натяжение стержню передавалось через фиксирующие анкера, которые перемещали посредством механического вращения упора болтового типа (рис. 2).

Деформации в стержне фиксировались на поверхности при помощи тензодатчиков, значения проскальзывания арматуры в анкерах определяются индикаторами часового типа (рис. 1). Испытания проводились на протяжении 90 сут. Начальные натяжения стержней составляли: 100, 230, 390 и 460 МПа. Результаты экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Можно предположить, что разность показаний с индикаторов часового типа и тензодатчика устанавливают релаксацию в стержне. Для проверки данной



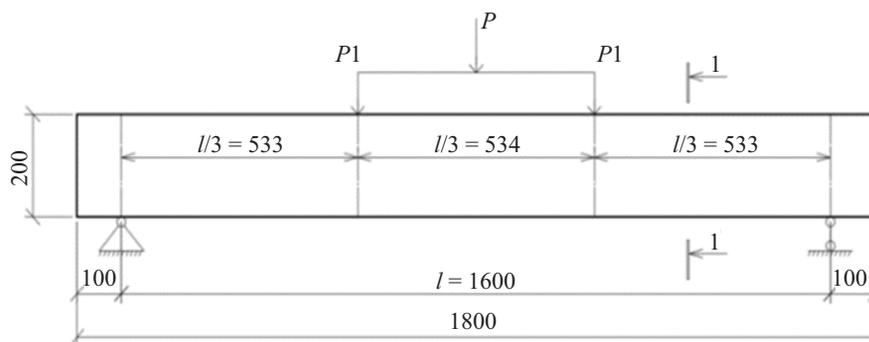
**Рис. 5.** Продольное расположение волокон в теле стержня при 1000-кратном увеличении: *a* — до восприятия нагрузки; *b* — после восприятия нагрузки

**Fig. 5.** Longitudinal arrangement of fibres in the stele of the rod at 1,000x magnification: *a* — before the load is perceived; *b* — after the load is perceived

гипотезы дополнительно был подвешен ряд образцов стержней стеклопластиковой арматуры с грузом 200 кг (рис. 3). В итоге подвешенный образец № 1\* из табл. 2 показывал аналогичные результаты и даль-

нейшее поведение, что и образец № 2 на испытательной раме.

Согласно графику (рис. 4), наибольшее снижение напряжений фиксировалось в течение первого



**Рис. 6.** Схема нагружения балок

**Fig. 6.** Beam loading scheme



**Рис. 7.** Тензодатчики на стержнях в защитной оболочке (*a*); фиксация напряжений в арматуре во время набора прочности бетона (*b*)

**Fig. 7.** Strain gauges on rods in a protective shell (*a*); recording stresses in reinforcement during concrete strength development (*b*)

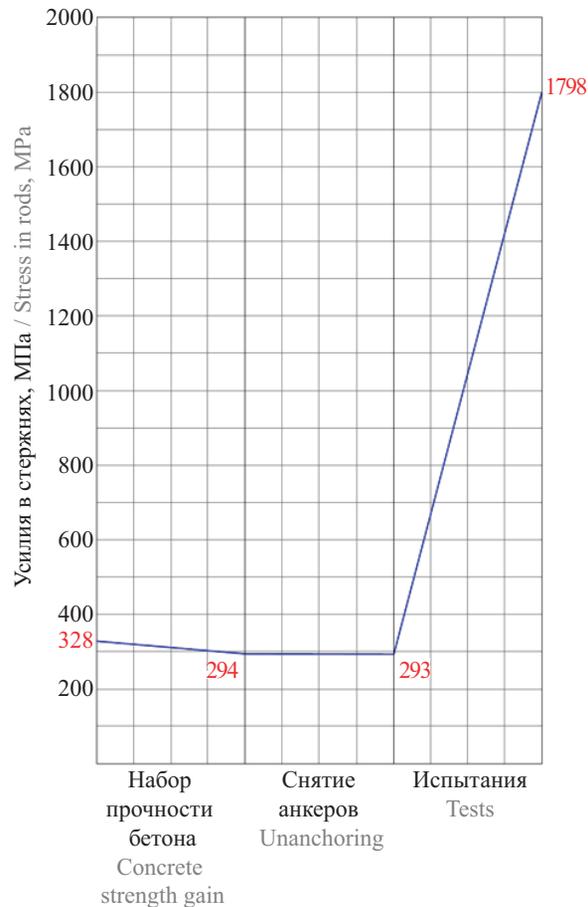


Рис. 8. Усредненный график изменения усилий в арматуре относительно стадии работы балки

Fig. 8. Average graph of changes in forces in reinforcement relative to the stage of operation of the beam

часа наблюдения, переход практически в линейную зависимость наблюдался по истечении 3–4 сут с момента начала испытаний.

Построенные графики на рис. 4 были описаны функциями логарифмической регрессии следующего вида:

$$f(x) = a - b \cdot \ln(x),$$

где  $f(x)$  — напряжение в стержне в зависимости от времени;  $x$  — время, ч;  $a$  — начальное усилие в стержне; параметр  $b$  имеет экспоненциальную зависимость от начального напряжения в стержне:

$$b = e^{-2,175+0,0075 \cdot a}.$$

В табл. 2 зафиксированы все функции аппроксимации полученных значений снижения напряжений при эксперименте, коэффициент детерминации не ниже 0,95.

Достигнутая релаксация волокон стеклопластикового стрежня подтверждена изучением структуры волокон до и после нагружения на электронном микроскопе с 1000-кратным увеличением. Из приведенных фотографий на рис. 5 видно, что до восприятия стержнем нагрузки имеются участки, где волокна в теле стержня расположены не параллельно (рис. 5, а), а после приложения и снятия нагрузки заметно выпрямление стеклянных волокон (рис. 5, б). Этот эффект также описан в АСІ 440 4R-04:20042, как одна из составляющих потерь напряжений в стержнях от релаксации.

Затем был проведен повторный замер релаксации напряжений в образце № 6 стеклопластикового стрежня с вытянутыми волокнами. При повторном натяжении стержня аналогичной нагрузкой потери от релаксации были практически в 1,5 раза меньше (на 47 %).

Для дальнейшего анализа были изготовлены балки размерами 1800 × 200 × 120 мм (рис. 6, 7) из бетона класса В35, армированные предварительно напряженной опесчаненной АКП Ø5,5 мм, и балки с аналогичным армированием, но без преднапряжения, в которых также фиксировались усилия в арматуре на стадиях натяжения арматуры, набора прочности бетона, распалубки и испытаний.

Натяжение арматуры осуществлялось упорами болтового типа на испытательной раме, фиксация арматуры производилась анкерами собственной разработки.

Начальное натяжение арматуры в балках составляло 328 МПа, которое в процессе набора прочности

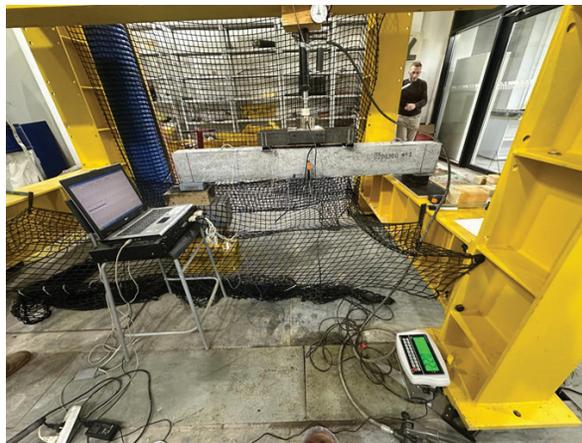


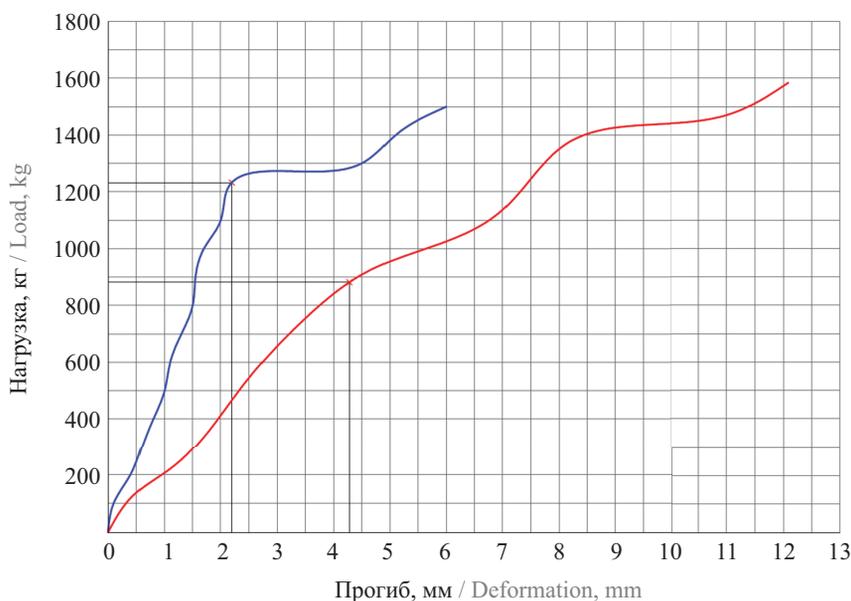
Рис. 9. Нагружение балки

Fig. 9. Beam loading



Рис. 10. Образование трещин в балке

Fig. 10. Formation of cracks in a beam



**Рис. 11.** Усредненный график значений «нагрузка – прогиб» для балок: синий — с предварительным напряжением; красный — без предварительного натяжения

**Fig. 11.** Average load – deflection graph for beams: blue — prestressing; red — without prestressing

бетона спало до 294 МПа (рис. 8). Испытания балок производились по ГОСТ 10180–2012 (рис. 9, 10). Образцы одним концом опирались на шарнирно-неподвижную опору, другим концом — на шарнирно-подвижную опору.

В период проведения испытаний одновременно измерялись параметры:  $P$  (нагрузка, кН);  $f$  (прогиб, мм);  $\Delta l$  (ширина раскрытия трещин, мм). Результаты испытаний представлены в виде графических зависимостей по средним значениям, полученным при испытании пяти образцов (рис. 11).

Из графиков видно, что момент трещинообразования у балок с предварительным напряжением АСК зафиксирован при нагрузке 12,01 кН, а у балок без предварительного напряжения при нагрузке 8,89 кН, что показывает повышение трещиностойкости на 35 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование потерь напряжений в стеклопластиковой арматуре при релаксации и ползучести показало, что потери напряжений наиболее выражены в первые дни после натяжения арматуры, с последующим снижением скорости потерь со временем.

Релаксационные потери в стеклопластиковой арматуре были количественно определены на осно-

вании проведенных экспериментов, которые подтвердили, что логарифмическая зависимость хорошо описывает характер потерь напряжений в материале.

Научная новизна исследования заключается в получении экспериментальных данных по релаксации арматуры из стеклопластика отечественного производства, что дополняет существующие знания и позволяет уточнить нормативные документы, такие как СП 295.1325800.2017.

Практическая значимость работы в том, что полученные результаты дают возможность прогнозировать долговечность и эксплуатационные характеристики конструкций с применением стеклопластиковой арматуры, а также вносить коррективы в существующие инженерные решения для минимизации потерь напряжений.

Рекомендации для практики включают необходимость дальнейших исследований для уточнения коэффициентов релаксации в зависимости от начального напряжения, а также разработки более точных методов расчета для инженерных приложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирсаяпов И.Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65).

С. 145–153. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_145. EDN KGTNOV.

2. Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной по-

лимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 12. С. 1663–1672. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.12.1663-1672. EDN XABHJC.

3. *Мирсаяпов И.Т., Минзянов Р.И., Зайнутдинов А.М.* Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 122–134. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_122. EDN JKTSTG.

4. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С.* Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве // Интернет-журнал Научное ведение. 2016. Т. 8. № 6 (37). С. 89. EDN XXYGYT.

5. *Антаков И.А., Сулейманов А.М.* Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 101–109. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_101. EDN HJVCIL.

6. *Мирсаяпов И.Т., Антаков И.А., Антаков А.Б.* К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 413–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428. EDN OSLXAT.

7. *Белуцкий И.Ю., Сим А.Д.* Обоснование необходимости предварительного напряжения низко модульной неметаллической арматуры при использовании в изгибаемых бетонных элементах // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : междунар. сб. науч. тр. 2015. Т. 15. С. 105–112. EDN VMUFVF.

8. *Кулиш В.И., Казаринов В.Е.* Несущие конструкции, напряженно армированные стеклопластиковой арматурой. Хабаровск : НТО Стройиндустрии, 1989. 107 с.

9. *Oskouei A.V., Taleie S.M.* Experimental Investigation of Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2010. Vol. 29. Issue 17. Pp. 2705–2718. DOI: 10.1177/0731684409357256

10. *Сулейманов А.М., Туйсина Е.Б.* Экспериментальное определение значимости воздействия эксплуатационных факторов на полимерную матрицу пултрузионных стеклопластиковых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 98–109. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109. EDN BNLBOU.

11. *Ryngier K., Zdanowicz L.* Prestressing concrete structures with CFRP composite tendons // Engineering Transactions. 2015. Vol. 63. Issue 4. Pp. 407–420. DOI: 10.24423/engtrans.261.2015

12. *Li G.W., Pei H.F., Hong C.Y.* Study on the Stress Relaxation Behavior of Large Diameter B-GFRP Bars Using FBG Sensing Technology // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2013. Vol. 9. Issue 10. P. 201767. DOI: 10.1155/2013/201767

13. *Fornusek J., Konvalinka P., Sovjak R., Vitek J.L.* Creep and stress relaxation of pre-stressed GFRP tendons in concrete structures // 9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures. 2009.

14. *Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Бережной Д.В., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р.* О результатах экспериментального и численного исследований напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций, армированных предварительно напряженными полимеркомпозитными стержнями // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 2. С. 2. DOI: 10.15862/02SATS218. EDN XTGBLF.

15. *Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Петропавловских О.К., Яруллин Р.Р., Умаров Б.Ш., Вольтер А.Р.* Метод изготовления предварительно напряженных конструкций с композитным армированием и композитным фибробетоном // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4. № 2. С. 5. DOI: 10.15862/05TS217. EDN ZEKYSD.

16. Патент RU № 176504 U1. Анкерное устройство для фиксации предварительно-напряженных арматурных стержней / *Умаров Б.Ш., Пискунов А.А., Зиннуров Т.А., Сафиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Вольтер А.Р.*; заявл. № 2016126915 от 2016.07.04; опубл. 2018.01.22.

Поступила в редакцию 16 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 10 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Булат Шавкатович Умаров** — инженер-технолог; **Татавтодор**; 420012, г. Казань, ул. Достоевского, д. 18/75; ORCID: 0000-0001-8802-0871; bulat.umar@gmail.com;

**Тагир Альмирович Зиннуров** — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Mirsayapov I.T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):145-153. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_145. EDN KGTHOV. (rus.).
2. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. The analysis of crack width in flexural concrete members reinforced with polymer composite bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(12):1663-1672. DOI: 10.22227/1997-0935. 2020.12.1663-1672. EDN XABHJC. (rus.).
3. Mirsayapov I.T., Minzyanov R.I., Zainutdinov A.M. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):122-134. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_122. EDN JKTSTG. (rus.).
4. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Mandrik-Kotov B.B., Mikhaldykin E.S. Problems of application of polymeric composite materials in transport construction. *Naukovedenie*. 2016; 8(6):37:89. EDN XXYGYT. (rus.).
5. Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):101-109. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_101. EDN HJVCIL. (rus.).
6. Mirsayapov I.T., Antakov I.A., Antakov A.B. To the design of the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(4):413-428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413-428. EDN OSLXAT. (rus.).
7. Belutskiy I.Yu., Sim A.D. Specificity of designing and manufacturing of structures reinforced with low-modulus composite reinforcement. *Far East. Highways and Traffic Safety: international collection of scientific papers*. 2015; 15:105-112. EDN VMUFVF. (rus.).
8. Kulish V.I., Kazarinov V.E. *Load-bearing structures, stressedly reinforced with fiberglass reinforcement*. Khabarovsk, NTO Construction Industry, 1989; 108. (rus.).
9. Oskouei A.V., Taleie S.M. Experimental Investigation of Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(17):2705-2718. DOI: 10.1177/07316844-09357256
10. Suleimanov A.M., Tuisina E.B. Experimental determination of the significance of the impact of operational factors on the polymer matrix of pultrusion fiberglass profiles. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):98-109. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109. EDN BN-LBOU. (rus.).
11. Ryngier K., Zdanowicz Ł. Prestressing concrete structures with CFRP composite tendons. *Engineering Transactions*. 2015; 63(4):407-420. DOI: 10.24423/eng-trans.261.2015
12. Li G.W., Pei H.F., Hong C.Y. Study on the Stress Relaxation Behavior of Large Diameter B-GFRP Bars Using FBG Sensing Technology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013; 9(10):201767. DOI: 10.1155/2013/201767
13. Fornusek J., Konvalinka P., Sovjak R., Vittek J.L. Creep and stress relaxation of pre-stressed GFRP tendons in concrete structures. *9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. 2009.
14. Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Berezhnoi D.V., Umarov B.Sh., Volter A.R. Experimental and numerical studies of stress-strain state of concrete structures reinforced with polymer-composite reinforcement. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(2):2. DOI: 10.15862/02SATS218. EDN XTGBLF. (rus.).
15. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Petropavlovskikh O.K., Yarullin R.R., Umarov B.Sh., Volter A.R. Method for manufacturing prestressed structures with composite reinforcement and composite fiber-reinforced concrete. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017; 4(2):5. DOI: 10.15862/05TS217. EDN ZEKYSD. (rus.).
16. Patent RU No. 176504 U1. *Anchor device for fixing prestressed reinforcement bars* / Umarov B.Sh., Piskunov A.A., Zinnurov T.A., Safiulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Volter A.R.; declared No. 2016126915 2016.07.04; publ. 2018.01.22.

Received June 16, 2024.

Adopted in revised form on September 10, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

**BIONOTES:** **Bulat Sh. Umarov** — engineer-technologist; **Tatavtodor**; 18/75 Dostoevsky st., Kazan, 420012, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8802-0871; bulat.umar@gmail.com;

**Tagir A. Zinnurov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher; **Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7238-2883; leongar@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*