



УДК 620.171.2:678.01

# МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

**А.Н. Блазнов<sup>1,2</sup>, В.Б. Маркин<sup>3</sup>, В.Ф. Савин<sup>4</sup>, В.В. Фирсов<sup>1</sup>,  
А.А. Генина<sup>2</sup>, Е.Г. Сакошев<sup>2</sup>**

Алексей Николаевич Блазнов

<sup>1</sup>Лаборатория материаловедения минерального сырья, институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659322

<sup>2</sup>Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)

Виктор Борисович Маркин

<sup>3</sup>Кафедра современных специальных материалов, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, Алтайский край, Российская Федерация, 656038

E-mail: [mvb1942@mail.ru](mailto:mvb1942@mail.ru)

Владимир Федорович Савин

<sup>4</sup>ООО «Бийский завод стеклопластиков», ул. Ленинградская, 60/1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659316

Вячеслав Викторович Фирсов

<sup>1</sup>Лаборатория материаловедения минерального сырья, Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659322

E-mail: [labmineral@mail.ru](mailto:labmineral@mail.ru)

Анастасия Александровна Генина

<sup>2</sup>Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: [genina.an@gmail.com](mailto:genina.an@gmail.com)

Егор Германович Сакошев

<sup>2</sup>Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств, Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, ул. им. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Бийск, Алтайский край, Российская Федерация, 659305

E-mail: [fak1\\_00@mail.ru](mailto:fak1_00@mail.ru)



*На примере исследования долговечности образцов стеклопластиковой арматуры под действием постоянной изгибающей нагрузки при температуре минус 30 °С продемонстрирован метод длительных испытаний строительных композитов и статистическая обработка результатов. Предложены устройства длительных испытаний на продольный изгиб, позволяющие нагружать одновременно по 20 образцов. Полученные экспериментально законы распределения образцов по прочности соответствуют нормальному, по долговечности – логарифмически-нормальному распределению. Даны рекомендации по обоснованному выбору постоянно действующей нагрузки по результатам определения прочности, позволяющей получить разрушение большей части образцов за срок эксперимента до трех месяцев. Предложен алгоритм проведения длительных испытаний и способ совместной математической обработки статистических результатов прочности и долговечности для построения силовых зависимостей. Приведены результаты длительных испытаний образцов стеклопластиковой арматуры в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С. С помощью предложенного метода получены зависимости, которые позволяют спрогнозировать значение длительной прочности 0,6 для долговечности 100 лет. Полученные результаты соответствуют литературным данным других авторов.*

**Ключевые слова:** стеклопластиковая арматура, длительная прочность, долговечность, метод испытаний, статистическая обработка результатов, закон распределения

**Для цитирования:**

Блазнов А.Н., Маркин В.Б., Савин В.Ф., Фирсов В.В., Генина А.А., Сакошев Е.Г. Метод исследования долговечности стеклопластиковой строительной арматуры. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. № 3. С. 32-45 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3\\_2021](http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2021\_3\_32



УДК 620.171.2:678.01

# THE METHOD OF STUDYING THE DURABILITY OF FIBERGLASS CONSTRUCTION REINFORCEMENT

**A.N. Blaznov<sup>1,2</sup>, V.B. Markin<sup>3</sup>, V.F. Savin<sup>4</sup>, V.V. Firsov<sup>5</sup>,  
A.A. Genina<sup>2</sup>, E.G. Sakoshev<sup>2</sup>**

Aleksei N. Blaznov

<sup>1</sup>Laboratory of Mineral Materials Science, Institute of Chemical and Energy Technology Problems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Socialisticheskaya st., 1, Biysk, Altai Region, 659322, Russia

<sup>2</sup>Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: [blaznov74@mail.ru](mailto:blaznov74@mail.ru)

Viktor B. Markin

<sup>3</sup>Department of Current Specialty Materials at the Polzunov Altai State Technical University; ave. Lenina, 46, Barnaul, Altai Region, 656038, Russia

E-mail: [mvb1942@mail.ru](mailto:mvb1942@mail.ru)

Vladimir F. Savin

<sup>4</sup>OOO Biysk Factory of Fiberglass-Reinforced Plastics; Leningradskaya st., 60/1, Biysk, Altai Region, 659316, Russia

Vyacheslav V. Firsov

<sup>1</sup>Laboratory for Materials Science and Mineral Raw Materials at the Institute for Problems of Chemical and Energetic technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS); Socialisticheskaya st., 1, Biysk, Altai Region, 659322, Russia

E-mail: [labmineral@mail.ru](mailto:labmineral@mail.ru)

Anastasia A. Genina

<sup>2</sup>Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: [genina.an@gmail.com](mailto:genina.an@gmail.com)

Egor G. Sakoshev

<sup>2</sup>Department of Machines and Devices for Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Trofimova st., 27, Biysk, Altai Region, 659305, Russia

E-mail: [fak1\\_00@mail.ru](mailto:fak1_00@mail.ru)



*We demonstrate methods for long-term testing of construction composites and statistical processing through examining the durability of the fiberglass-reinforced bar specimens under continuous flexural load at -30°C. Prolonged flexural test apparatuses allow to load by 20 samples simultaneously. The strength laws of the experimentally obtained sample distributions correspond to a normal distribution, while the durability laws correspond to a logarithmic-normal distribution. Guidelines are given on the reasonable choice of a permanent load based on a strength determination that would result in the destruction of most of the samples over a period of up to three months. The invention relates to an algorithm for conducting long-term tests and to a method for mathematically co-processing statistical results of strength and durability for generating power relationships. The results of the long-term tests of fiberglass-reinforced bar samples are given in the range of temperatures from minus 30 to plus 50°C. The proposed method produces relationships and makes it possible to predict a value of a lasting strength of 0.6 for a durability of 100 years. Using the suggested method, relationships have been derived that can predict a long-term strength of 0.6 for durability of 100 years. The results are in accordance with the studies of the other authors.*

**Key words:** fiberglass-reinforced bar, long-time strength, durability, test method, statistical data processing, distribution law

**For citation:**

Blaznov A.N., Markin V.B., Savin V.F., Firsov V.V., Genina A.A., Sakoshev E.G. The method of studying the durability of fiberglass construction reinforcement. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 3. P. 32-45 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3\\_2021](http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2021\_3\_32



## ВВЕДЕНИЕ

Длительная прочность и долговечность являются важнейшими характеристиками любого конструкционного материала. Особое внимание уделяется этим эксплуатационным свойствам для изделий, используемых в ответственных строительных конструкциях, таких как жилые дома [1]. Примером длительного использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) в строительстве могут служить гибкие связи стекло- и базальтопластиковой арматуры и композитные стержни периодического профиля [1, 2], которые подвергаются воздействию нагрузки и температуры в течение всего срока эксплуатации (от 50 до 100 лет). Поскольку механические свойства, в том числе и длительная прочность ПКМ, сильно зависят от технологии их изготовления и состава, возникает необходимость проведения исследовательских, типовых и периодических испытаний выпускаемых изделий на длительную прочность и долговечность.

В настоящей работе речь идет о «механической» долговечности, когда на изделие в процессе эксплуатации воздействуют только постоянная нагрузка и постоянная температура, и не учитываются другие воздействующие факторы, такие как химическое старение, суточные и сезонные циклы температуры, влажность, ультрафиолет [3].

Определения терминов «долговечность» и «длительная прочность» приняты в соответствии с [4]: *долговечность* – время, прошедшее с момента приложения к образцу материала не изменяющейся механической нагрузки до момента его разрушения; *длительная прочность* – не изменяющаяся по величине механическая нагрузка, приложенная к образцу материала и вызывающая его разрушение за заданный промежуток времени.

Силовая зависимость долговечности – зависимость времени  $\tau$  до разрушения от приложенной постоянной по величине нагрузки, характеризуемой напряжением  $\sigma$ , – была четко установлена на силикатных стеклах [5-8]. Для силикатных стекол было предложено несколько эмпирических формул, из которых наибольшее распространение получила формула Голланда и Тернера или степенной закон:

$$\tau = B \cdot \sigma^{-b}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность;  $\sigma$  – заданное растягивающее напряжение;  $B$  и  $b$  – константы.

В ходе исследования процессов разрушения твердых тел сложилось два подхода к объяснению этого сложного явления. Один из них – теория разрушения Гриффитса-Ирвина – рассматривает разрушение, как прорастание макротрещины из наиболее опасного дефекта через неповрежденный материал. Она приводит к линейной механике разрушения. Эта теория, созданная для однофазных материалов, не всегда применима к ПКМ, проявляющим неоднородность на масштабном уровне,

сравнимом с размерами трещины, поскольку предполагает ее прямолинейное распространение [1, 6].

По мере накопления результатов исследования длительной прочности материалов концепция, рассматривающая разрушение как протекающий во времени процесс, пришла на смену представлениям о разрушении, как критическом событии (единичном акте), наступающем при достижении предельного напряжения [6, 9].

Исследования разрушения в условиях статического нагружения, проведенные зарубежными и отечественными учеными, привели к господству кинетических представлений о прочности материалов [10-12]. Развивается новый раздел механики твердых тел – кинетическая механика разрушения. Наиболее значимые работы выполнены в лаборатории физики прочности физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР в начале 1950-х годов С.Н. Журковым и сотрудниками. Независимо друг от друга Ф. Буше [13] и С.Н. Журковым была установлена эмпирическая зависимость, которая получила название формулы Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right) \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – постоянная времени (для стеклопластиков  $10^{-13}$  с),  $U_0$  – энергия активации процесса разрушения;  $\gamma$  – структурно чувствительный параметр, достигающий  $10-10^3$  атомных объемов;  $\sigma$  – постоянное приложенное напряжение;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура, К.

Сотрудниками института им. А.Ф. Иоффе АН СССР во главе с С.Н. Журковым [10-12] было установлено, что прямые долговечности в координатах  $\ln \tau - 1/T$  при различных значениях  $\sigma$  сходятся в одной точке и у разных пластмасс абсцисса полюса находится в различных местах. Для объяснения этого факта С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев в работах [14, 15] предложили следующее обобщение уравнения С.Н. Журкова:

$$\tau = \tau_m e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right)}, \quad (3)$$

где  $\tau_m$  – минимальная долговечность материала, отвечающая максимально допустимой температуре  $T_m$ , при которой при любой нагрузке или без нее материал размягчается вследствие интенсивного разрыва межмолекулярных связей или разрушается в результате деструкции т. е. разрыва межатомных связей.

В работе [15] Ратнер С.Б. проводит критический анализ множества выражений для расчета долговечности полимеров. Некоторые результаты и выводы названы ошибочными. Показано, что способ обработки по различным выражениям экспериментальных данных позволяет получить существенно различающиеся результаты. Отличия в результатах автор работы [13] обосновывает непостоянством параметров  $\tau_0$ ;  $\gamma$  и  $U_0$  в формуле Журкова, и их зависимостью от температуры. Ратнер С.Б. предлагает на основании формулы (3) принцип температурно-



временной-силовой эквивалентности, согласно которому любой из предельных показателей механической работоспособности ( $\sigma$ ,  $T$  и  $\tau$ ) может быть повышен за счет понижения любого другого показателя или их комбинации. Исходя из этого, чтобы обеспечить рост предельного показателя механической работоспособности модифицированных пластических масс следует повышать константы  $U_0$ ,  $T_m$  и  $\tau_m$  и понижать  $\gamma$ .

Из формулы (3) следует, что растягивающее напряжение  $\sigma$ , вызывающее критическое событие – разрушение ("предел" прочности) или деформирование ("предел" вынужденной эластичности или "текучести") [13], можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[ U_0 - \frac{RT}{1 - T/T_m} \ln \frac{\tau}{\tau_m} \right]. \quad (4)$$

Понятие "предел" означает, что указанные предельные состояния могут быть достигнуты при любом напряжении и уменьшаются с ростом температуры  $T$  и времени ее действия  $\tau$ . Аналогичный вывод следует и для "предельной" температуры работоспособности - теплостойкости при размягчении и термодеструкции при разрушении. Из формулы (3) или (4) следует [13]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_m} + \frac{U_0 - \gamma\sigma}{R \ln \tau / \tau_m}. \quad (5)$$

Существует большой класс ПКМ, долговечность которых не удастся описать формулой С.Н. Журкова. Для этого класса Г.М. Бартнев [7] предложил следующее выражение:

$$\tau = C \cdot \sigma \cdot b \cdot \exp(U/RT). \quad (6)$$

Авторы работы [8] делают вывод о том, что при сохранении кинетической природы прочности формула Журкова справедлива только в тех случаях, когда зависимость между напряжением и деформацией линейна, соответствует закону Гука.

$$\tau = n \cdot \exp\left(-\frac{T - T_0}{B}\right) \cdot \frac{(1 - \phi_A) \cdot E_M + \phi_A \cdot E_A}{(1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A} \times \ln \frac{(E_M - H_M) \cdot E_A \cdot (1 - \phi_A) \cdot F}{[(1 - \phi_A) \cdot E_A \cdot F - \varepsilon \cdot E_A \cdot A \cdot ((1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A)] \cdot [(1 - \phi_A) \cdot H_M + \phi_A \cdot E_A]} \quad (7)$$

где  $n$ ,  $B$  – коэффициенты,  $F$  – постоянная нагрузка,  $A$  – площадь поперечного сечения,  $H_m$  – модуль длительной упругости матрицы.

По экспериментальным данным работы [5] для однонаправленно армированного стеклопластика на основе полиэфирного связующего оценка длительной прочности дает значение  $\sigma_\infty \sim 410$  МПа, что составляет около 0,65 от величины временной прочности. Таким образом, рис. 1 наглядно демонстрирует влияние метода обработки экспериментальных данных по долговечности на результат. В области времени от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  (см. рис. 1), доступного для эксперимента, различные теории дают близкие значения, но существенно расходятся в области низких

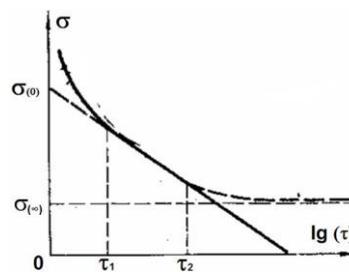


Рис. 1. Зависимость длительной прочности от долговечности по данным работы [5]:

сплошная – по формуле (1), пунктирная – по выражению (7)

Fig. 1. The dependence of long-term strength on durability according to the data of [5]:

solid – according to the formula (1), dotted – according to the expression (7)

Установлено также, что в определенном интервале времени до разрушения, доступном для эксперимента, связь между длительной прочностью  $\sigma$  и  $\lg(\tau)$  или  $\ln(\tau)$  имеет линейный характер (рис. 1), что соответствует выражению (1). При более длительных опытах и повышенных температурах наблюдается перелом на диаграмме  $\sigma - \ln(\tau)$  [16], что, по мнению авторов работы [5], свидетельствует о существовании предела длительной прочности  $\sigma_\infty$  - такого максимального напряжения, ниже которого материал не будет разрушаться сколь угодно долго (рис. 1).

На основе феноменологических представлений А.М. Скудра и Ф.Я. Булавс предложили следующую эмпирическую зависимость для описания долговечности стеклопластиков [5]:

напряжений при долговечности 50 и 100 лет, что как раз и представляет наибольший интерес для изучения эксплуатационных свойств материала.

Исследователями отмечены высокие разбросы долговечности ПКМ при одном уровне нагрузок, что препятствует постановке прямого эксперимента на длительный срок. Кроме того, старение материалов в процессе длительных испытаний может произойти от действия окружающей среды, физико-химических превращений в самом материале и других факторов [3], не имеющих прямого отношения к «механической» долговечности, т.е. изменения свойств под действием только нагрузки.



Целью данной работы являются экспериментальные исследования долговечности стеклопластиковых стержней, применяемых в строительстве, с помощью оригинального метода, основанного на статистической обработке результатов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве образцов для исследований использовали стержни стеклопластиковой арматуры номинальным диаметром 5,5 мм (СПА-5,5), серийно изготавливаемой по ТУ 2296-001-20994511.

Сущность метода длительных испытаний и обработки результатов состоит в следующем:

- испытывают представительную выборку образцов одним из методов статических испытаний (на растяжение, сжатие или изгиб);
- определяют допустимое значение длительно действующего напряжения по минимальным значениям прочности в первой группе образцов с таким расчетом,

чтобы, с одной стороны, напряжение не оказалось слишком высоким, при котором разрушится большая часть образцов, предназначенных для длительных испытаний, и, с другой стороны, не оказалось слишком низким, при котором не разрушится ни один образец в выборке;

- нагружают выбранной величиной длительно действующего напряжения все образцы, предназначенные для длительных испытаний тем же методом (растяжение, сжатие либо изгиб), и измеряют долговечность – время, прошедшее с момента нагружения до момента разрушения образцов.

По предварительным экспериментальным данным [6, 9], распределение прочности стеклопластиков соответствует нормальному закону. На рис. 2 приведены результаты испытаний на продольный изгиб представительной выборки образцов от трехсерийных партий стеклопластиковых стержней СПА-5,5 по ТУ 2296-001-20994511. По данным рис. 2 можно отметить, что закон распределения стержней по прочности соответствует нормальному с высоким коэффициентом корреляции  $R^2=0,98$ – $0,99$ .

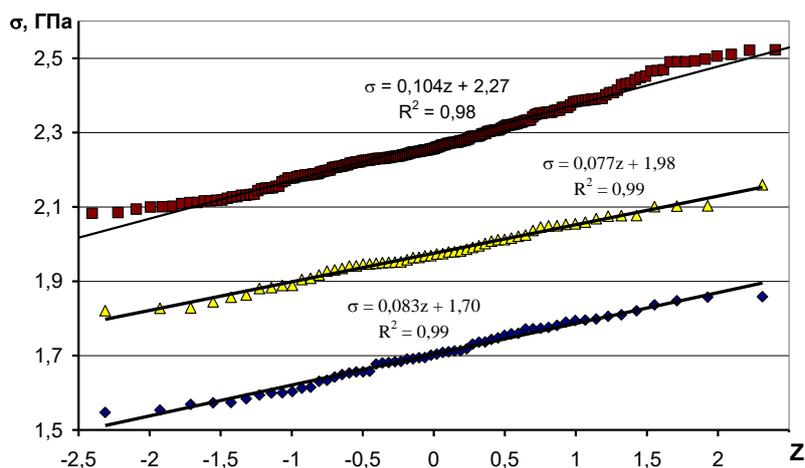


Рис. 2. Распределение образцов СПА-5,5 от трех партий по прочности  
Fig. 2. Distribution of SPA-5.5 samples from three batches by strength

Приведем пример реализации метода длительных испытаний и обработки результатов на конкретных изделиях из стеклопластика.

Выбор температур для испытаний был обусловлен следующими обстоятельствами. Допустимый диапазон хранения и эксплуатации стеклопластиковой арматуры по ТУ 2296-001-20994511 от минус 60 до плюс 50 °С, соответствует климатическим зонам РФ. Температурная зависимость прочности исследовалась во всем диапазоне температур и приведена в работах [17, 18], из которых следует, что прочность и деформативность стеклопластика с понижением температуры возрастает, а с повышением – уменьшается. Это еще одно полезное свойство композитов, в отличие от сталей – не происходит

охрупчивания вплоть до заморозки в жидком азоте [19]. Для стальных изделий известны случаи хрупкого излома при низких температурах, приводившие к авариям на строительных объектах.

Поскольку предварительно было установлено повышение механических свойств стеклопластиков в области отрицательных температур, длительные испытания были ограничены имеющимся оборудованием – промышленной холодильной камерой, способной поддерживать постоянную температуру минус 30 °С в течение всего эксперимента. Верхний температурный диапазон эксплуатации композитов ограничен температурой начала перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние, которое для исследуемых



стеклопластиков составляет не менее 75–80 °С, поэтому повышенная температура длительных испытаний была выбрана 50 °С, соответствующая стеклообразному состоянию связующего и максимальной температуре эксплуатации по климатическим зонам РФ.

Выбор метода испытаний на продольный изгиб был обусловлен его достоинствами [17], важнейшими из которых являются: отсутствие воздействия металлических частей (отсутствие контактных напряжений) в месте наибольшего прогиба образца; комплексная нагрузка одновременно внутренних слоев на сжатие, наружных – на растяжение; простота метода – возможность проведения одновременно массовых испытаний при малых габаритах устройств и малых значениях усилий (сила потери устойчивости при продольном изгибе примерно в 50 раз меньше силы, необходимой для растяжения/сжатия образца того же сечения); при продольном изгибе стеклопластиковый образец имеет упругие деформации и работает подобно пружине – консервирует нагрузку на длительное время, практически отсутствует релаксация, и образец разрушается в средней части при достижении предельной долговечности вследствие запасенной энергии упругой «пружины».

В табл. 1 приведены данные по результатам измерения прочности исследуемой партии СПА-5,5 на продольный изгиб [17, 20] при температуре минус 30 °С.

Алгоритм обработки экспериментальных данных следующий.

Все полученные результаты определения прочности стержней располагают в порядке возрастания, присваивая каждому образцу порядковый номер  $i$ .

Для каждого образца рассчитывают значения вероятности  $P$  по формуле [21]:

$$P(i)=i/(n+1), \quad (8)$$

где  $i$  – порядковый номер образца в упорядоченном массиве;  $n$  – количество образцов.

По полученным результатам находят значения табличной функции  $Z$  обратного нормального распределения с помощью статистических таблиц, например, в программе Excel. Полученные данные сведены в табл. 1.

По данным табл. 1 строят графическую зависимость  $\sigma_b(i)=f(Z(i))$  (рис. 3). Как показано на рис. 2 и 3, исследуемые образцы стеклопластиков по прочности удовлетворяют нормальному закону, с высоким коэффициентом корреляции. Зависимость прочности от нормированной функции обратного нормального распределения (по данным рис. 3) описывается линейным законом:

$$\sigma_b = b_\sigma \cdot (Z) + a_\sigma, \quad (9)$$

где  $b_\sigma$ ,  $a_\sigma$  – эмпирические коэффициенты, в рассматриваемом примере равны  $b_\sigma=93,107$  МПа (определяет угол наклона аппроксимирующей прямой);  $a_\sigma=2055$  МПа (определяет среднее арифметическое значение прочности в выборке).

В табл. 1 приведены расчетные значения прочности по выражению (9) и величина относительного отклонения экспериментальных данных от расчетных. Погрешность не превышает  $\pm 1\%$ , что говорит о высоком соответствии расчетных и экспериментальных данных.

Выбор величины постоянно действующей нагрузки имеет решающее значение для испытаний на долговечность. Эта нагрузка не должна быть слишком высокой, вызывающей преждевременное разрушение большей части образцов, но также и не должна быть слишком низкой, при которой не разрушится ни один образец за разумное время эксперимента. Достаточно получить гарантированное разрушение половины образцов в выборке за время эксперимента для статистической обработки результатов.

Из опыта испытаний на долговечность, для получения разрушения образцов при длительности экспериментов до трех месяцев можно рекомендовать значение длительно действующего напряжения, определяемое по минимальному значению прочности образцов в выборке при вероятности разрушения  $P = 2,4\%$ .

Величину  $\sigma_{b(0,024)}$  определяют по выражению (9), подставляя значение  $Z = -1,97$ .

Величину длительно действующего постоянного напряжения определяют по выражению

$$\sigma_\tau = K \cdot \sigma_{b(0,024)}, \quad (10)$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент, принимаемый 0,89–0,92 [9].

В рассматриваемом примере расчетная величина  $\sigma_{b(0,024)} = 1872$  МПа.

Длительное напряжение изначально было подобрано эмпирически и составило  $\sigma_\tau = 1727$  МПа, при этом коэффициент  $K = 0,923$ .

На величину напряжения  $\sigma_\tau = 1727$  МПа были загружены все образцы второй группы от той же партии, что испытаны на прочность.

Для длительных испытаний использовали приспособление, показанное на рис. 4, а, в которое одновременно устанавливается по 20 образцов СПА-5,5 длиной 200 мм. Требуемый уровень напряжений задается с помощью прогиба образцов в средней части и регулируется винтом (осевым перемещением – сближением концов шарнирно опертого стержня). Осевая сила при этом равна силе потери устойчивости (критической силе Эйлера) и остается практически постоянной в процессе нагружения и увеличения прогиба. Периодически проводился «опрос» образцов с помощью тензодатчика силы – значительное уменьшение осевой силы свидетельствовало о разрушении образца. Для сохранения температуры образца при периодической выемке из морозильной камеры и контроля осевой силы, устройства помещали в футляры из пенопласта, изнутри утепляли поролоном как показано на рис. 4, б.



Таблица 1. Результаты испытаний образцов на прочность при температуре минус 30 °С

Table 1. Results of strength tests of samples at a temperature of minus 30 °C

$i$	$P(i)$	$Z$	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{расч}$ , МПа	Отклонение, %
1	0,024	-1,97	1867	1872	0,24
2	0,049	-1,66	1907	1901	-0,32
3	0,073	-1,45	1915	1920	0,27
4	0,098	-1,30	1957	1934	-1,16
5	0,122	-1,17	1960	1947	-0,67
6	0,146	-1,05	1969	1957	-0,60
7	0,171	-0,95	1971	1967	-0,24
8	0,195	-0,86	1973	1975	0,12
9	0,220	-0,77	1977	1983	0,31
10	0,244	-0,69	1981	1991	0,49
11	0,268	-0,62	1986	1998	0,56
12	0,293	-0,55	2000	2004	0,20
13	0,317	-0,48	2007	2011	0,18
14	0,342	-0,41	2018	2017	-0,03
15	0,366	-0,34	2023	2023	0,01
16	0,390	-0,28	2025	2029	0,22
17	0,415	-0,22	2029	2035	0,29
18	0,439	-0,15	2031	2041	0,49
19	0,463	-0,09	2043	2047	0,16
20	0,488	-0,03	2053	2052	-0,02
21	0,512	0,03	2064	2058	-0,27
22	0,537	0,09	2065	2064	-0,08
23	0,561	0,15	2070	2069	-0,04
24	0,585	0,22	2081	2075	-0,30
25	0,610	0,28	2088	2081	-0,32
26	0,634	0,34	2090	2087	-0,16
27	0,659	0,41	2091	2093	0,09
28	0,683	0,48	2096	2099	0,16
29	0,707	0,55	2099	2106	0,34
30	0,732	0,62	2101	2113	0,53
31	0,756	0,69	2104	2120	0,75
32	0,780	0,77	2114	2127	0,62
33	0,805	0,86	2140	2135	-0,24
34	0,829	0,95	2147	2144	-0,16
35	0,854	1,05	2157	2153	-0,18
36	0,878	1,17	2157	2164	0,30
37	0,902	1,30	2187	2176	-0,54
38	0,927	1,45	2192	2190	-0,06
39	0,951	1,66	2231	2209	-1,00
40	0,976	1,97	2237	2239	0,05

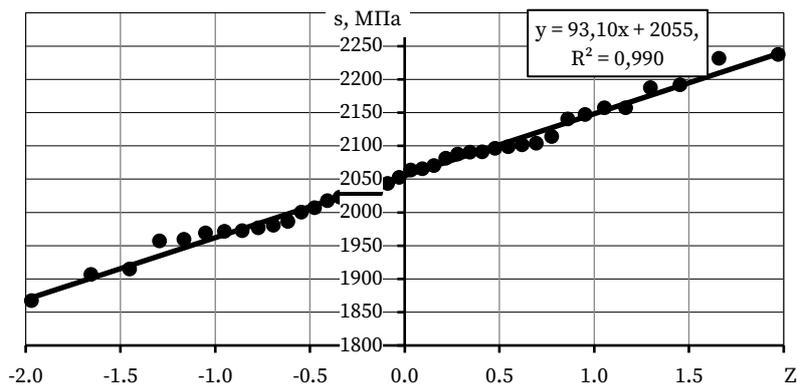


Рис. 3. Распределение образцов СПА-5,5 по прочности при температуре минус 30 °С

Fig. 3. Distribution of SPA-5.5 samples by strength at a temperature of minus 30 °C



Рис. 4. Стенды для испытаний одновременно 20 образцов СПА-5,5:

а - на долговечность при продольном изгибе; б - футляры для сохранения температуры образцов

Fig. 4. Test benches for 20 SPA-5.5 samples at the same time:

а - for durability during longitudinal bending; б - cases for maintaining the temperature of the samples

Обработка результатов по долговечности аналогична приведенному выше алгоритму статистической обработки данных определения прочности образцов.

Определяют значение вероятности  $P(i)$  и величину  $Z$  обратного нормального распределения, как было показано выше. Для количества испытанных образцов 40 шт. эти величины имеют те же значения, что и в табл. 1. Экспериментальные значения долговечности располагают в порядке возрастания. Строят график зависимости логарифма долговечности от величины  $Z$  (рис. 5).

Закон распределения долговечности образцов соответствует логарифмически-нормальному с высокой корреляцией ( $R^2=0,985$ ). Зависимость логарифма долговечности образцов от обратной функции нормального распределения носит линейный характер:

$$\ln(\tau) = b_{\tau} \cdot Z + a_{\tau}, \quad (11)$$

где  $b_{\tau}$ ,  $a_{\tau}$  – эмпирические коэффициенты, равные соответственно:  $b_{\tau}=1,166$ ;  $a_{\tau}=11,835$ .

В табл. 2 приведены расчетные значения логарифма долговечности образцов, и отклонения экспериментальных данных от расчетных. Можно заключить, что отклонения не превышают  $\pm 1,5-2\%$ , лишь у первых двух образцов в выборке экспериментальные значения долговечности аномально отличаются от расчетных (на 64% и 34%). Эти два образца сломались в процессе нагружения и в расчет не принимались.

Следующий этап – совместная обработка результатов определения прочности и долговечности. В основу положена гипотеза о том, что две представительные выборки от одной партии имеют образцы, идентичные по своим свойствам – прочности и долговечности. Поскольку оба вида испытаний являются разрушающими, то на одних и тех же образцах измерение контроля их прочности и долговечности выполнить невозможно.



В соответствии с гипотезой, присваивают вероятность разрушения более нагруженных образцов их меньшей долговечности (это соответствует и фундаментальным представлениям – чем больше нагрузка, тем меньше долговечность, см. рис. 1). За величину интенсивности приложенной нагрузки принято отношение постоянно

действующего напряжения к их временной прочности  $\sigma_{отн} = \sigma_t / \sigma_b$ , которое показывает, на какую величину нагружен индивидуально каждый образец от его исходной прочности. Совместная обработка результатов приведена в табл. 3.

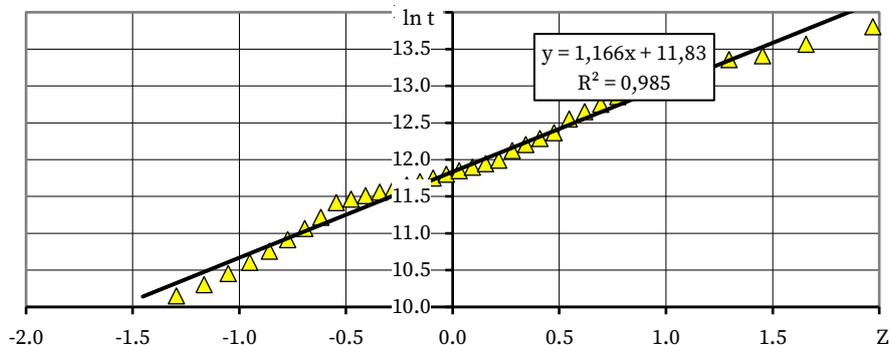


Рис. 3. Распределение образцов СПА-5,5 по прочности при температуре минус 30 °С  
Fig. 3. Distribution of SPA-5.5 samples by strength at a temperature of minus 30 °C

Таблица 3. Совместная обработка результатов определения прочности и долговечности  
Table 3. Joint processing of the results of determining strength and durability

<i>i</i>	$\sigma_{расч}$ , МПа	$\sigma_{отн}$	$\ln(\tau_{расч}, с)$	<i>i</i>	$\sigma_{расч}$ , МПа	$\sigma_{отн}$	$\ln(\tau_{расч}, с)$
1	1872	0,923	9,537	21	2058	0,839	11,871
2	1901	0,909	9,903	22	2064	0,837	11,942
3	1920	0,900	10,141	23	2069	0,835	12,014
4	1934	0,893	10,324	24	2075	0,832	12,086
5	1947	0,887	10,476	25	2081	0,830	12,160
6	1957	0,882	10,608	26	2087	0,827	12,235
7	1967	0,878	10,726	27	2093	0,825	12,311
8	1975	0,874	10,833	28	2099	0,823	12,390
9	1983	0,871	10,933	29	2106	0,820	12,471
10	1991	0,868	11,026	30	2113	0,817	12,556
11	1998	0,865	11,114	31	2120	0,815	12,644
12	2004	0,862	11,199	32	2127	0,812	12,737
13	2011	0,859	11,280	33	2135	0,809	12,837
14	2017	0,856	11,359	34	2144	0,806	12,944
15	2023	0,854	11,435	35	2153	0,802	13,062
16	2029	0,851	11,510	36	2164	0,798	13,194
17	2035	0,849	11,584	37	2176	0,794	13,346
18	2041	0,846	11,656	38	2190	0,788	13,529
19	2047	0,844	11,728	39	2209	0,782	13,767
20	2052	0,842	11,799	40	2239	0,771	14,133



На рис. 6 показана силовая зависимость долговечности – зависимость относительной длительной прочности от долговечности для исследованных образцов стеклопластика. Можно заключить, что в приведенных координатах (по оси ординат – относительной прочности, по оси абсцисс – логарифма долговечности) силовая зависимость соответствует степенному закону с высоким коэффициентом корреляции  $R^2=0,999$ .

$$\sigma_{отн} = 2,594 \cdot (\ln\tau)^{-0,456} \quad (12)$$

Эту зависимость можно использовать для предсказания долговечности исследуемого стеклопластика в зависимости от уровня приложенного напряжения при температуре минус 30 °С.

С помощью продемонстрированного метода длительных испытаний и статистической обработки результатов были проведены массовые испытания на долговечность одной и той же партии стеклопластиковых стержней СПА-5,5 в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С при продольном изгибе и растяжении, обобщенные результаты приведены в работе [22] и на рис. 7.

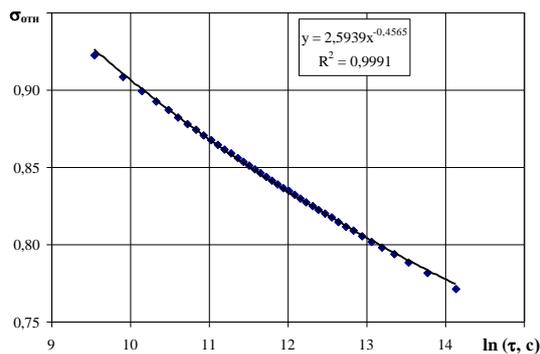


Рис. 6. Зависимость относительной длительной прочности от долговечности образцов СПА-5,5 при температуре минус 30 °С

Fig. 6. The dependence of the relative long-term strength on the durability of SPA-5.5 samples at a temperature of minus 30 °С

Учитывая температурную зависимость прочности, все результаты испытаний при разных температурах приведены к нормальным условиям – отнесены к значениям прочности при комнатной температуре, поэтому величина  $\sigma_{отн}$  имеет значения больше 1,0 для образцов, испытанных при температуре минус 30 °С. Силовые зависимости на рисунке 7 позволяют оценить длительную прочность для срока службы строительных стеклопластиковых изделий 100 лет ( $\ln\tau = 21,87$ ), все кривые асимптотически сходятся около значения  $\sigma_{отн} = 0,6$ . Это соответствует данным работ [5, 23-24], согласно которым предел длительной прочности стеклопластика составляет 0,6-0,65 от временной прочности. Испытания при

комнатной температуре образцов СПА-5,5, нагруженных продольным изгибом напряжением 1206 МПа, насчитывают уже 20 лет и продолжают [22] (за это время разрушился 21 образец из 40).

Предложенный метод испытаний и статистической обработки результатов может быть использован и в других приложениях – например, при исследовании химического старения, циклической усталости, коррозионного разрушения под нагрузкой или длительной электрической прочности материалов в электротехнике под действием частичных разрядов. Условием успешного применения этих методов является широкий диапазон разбросов характеристик образцов внутри выборки – в продемонстрированном примере около величина разброса составила 10–16% по прочности от среднего значения, и в  $10^5$  раз – по долговечности.

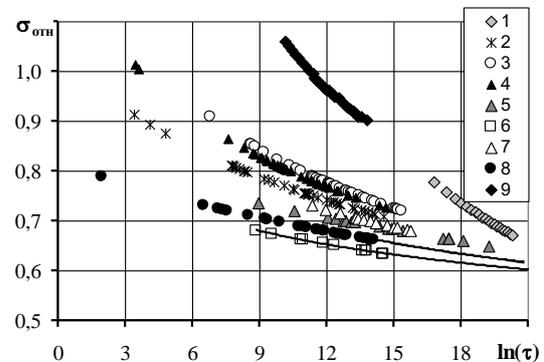


Рис. 7. График силовой зависимости [22] стержней СПА-5,5 при продольном изгибе (1–4, 6–9) и растяжении (5) под действием постоянных напряжений и температур (время в секундах):  
1 – 1206 МПа, +23 °С; 2 – 1368 МПа, +23 °С; 3 – 1471 МПа, +20 °С; 4 – 1520 МПа, +20 °С; 5 – 836 МПа, +20 °С; 6 – 1172 МПа, +50 °С; 7 – 1213 МПа, +50 °С; 8 – 1280 МПа, +50 °С; 9 – 1727 МПа, -30 °С

Fig. 7. Graph of the force dependence [22] of SPA-5.5 rods under longitudinal bending (1–4, 6–9) and stretching (5) under the action of constant stresses and temperatures (time in c):

1 – 1206 МПа, +23 °С; 2 – 1368 МПа, +23 °С; 3 – 1471 МПа, +20 °С; 4 – 1520 МПа, +20 °С; 5 – 836 МПа, +20 °С; 6 – 1172 МПа, +50 °С; 7 – 1213 МПа, +50 °С; 8 – 1280 МПа, +50 °С; 9 – 1727 МПа, -30 °С

## ВЫВОДЫ

1. Показано расхождение теорий относительно прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов, в большей степени результаты прогнозирования зависят от метода математической обработки экспериментальных данных.



2. Предложен новый метод испытаний строительных стеклопластиков на долговечность под действием постоянных напряжений при продольном изгибе и статистической обработке результатов длительных испытаний.

3. Метод продемонстрирован на примере длительных испытаний стеклопластиковой арматуры диаметром 5,5 мм при температуре минус 30 °С длительностью 12 суток. Полученный закон распределения образцов по прочности соответствует нормальному, по долговечности – логарифмически-нормальному закону распределения.

4. Силовые зависимости долговечности носят степенной характер. Определена величина относительной длительной прочности 0,6 при долговечности стеклопластика 100 лет в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 °С, что соответствует экспериментальным данным других авторов.

*Исследования выполнены при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).*

*Работа выполнена в рамках госзадания на тему "Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легковозобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты", № госрегистрации 121061500030-3.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Климатические испытания строительных материалов: монография. М.: Изд-во АСВ. 2017. 558 с.
2. **Blaznov A.N., Krasnova A.S., Krasnov A.A., Zhurkovsky M.E.** Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. *Polymer Testing*. 2017. V. 63. P. 434-439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.006>.
3. **Blaznov A.N., Markin V.B., Krotov A.S., Firsov V.V., Bychin N.V., Sakoshev Z.G.** Basalt plastic properties under climatic aging conditions. *Smart Composite in Construction*. 2021. V. 2. N 1. P. 29-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46168573>
4. Энциклопедия полимеров. В 3 т. Т. 1. М.: Советская энциклопедия. 1977. С. 892-893.
5. **Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценс К.А.** Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне. 1971. 238 с.
6. **Tikhonov V.B., Blaznov A.N., Savin V.F.** Method of fiberglass testing for static durability. *Inorganic Materials*. 2011. V. 47. N 15. P. 1702-1706. DOI 10.1134/S0020168511150167.
7. **Бартнев Г.М.** Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия. 1984. 280 с.
8. **Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника. 1993. 475 с.
9. **Блазнов А.Н.** Влияние внешней среды на прочность стеклопластиковой строительной арматуры. Климатические испытания строительных материалов: монография. М.: Изд-во АСВ. 2017. С. 367-465.
10. **Журков С.Н., Нарзуллаев В.А.** Временная зависимость прочности твердых тел. *Журнал технической физики*. 1953. Т. 23. Вып. 10. С. 1677-1689.
11. **Журков С.Н.** Кинетическая концепция прочности твердых тел. (Термофлуктуационный механизм разрушения). *Вестник АН СССР*. 1968. № 3. С. 46-52.
12. **Журков С.Н., Куксенко В.С.** Микромеханика разрушения полимеров. *Механика полимеров*. 1974. № 5. С. 792-801.
13. **Кауш Г.** Разрушение полимеров. М.: Мир. 1981. 440 с.
14. **Ратнер С.Б., Ярцев В.П.** Работоспособность пластмассы под нагрузкой и пути ее прогноза и повышения. М.: НИИТЭХИМ. 1979. Вып. 3 (153). 65 с.
15. **Ратнер С.Б.** Физические закономерности прогнозирования работоспособности конструкционных пластических масс. *Пластические массы*. 1990. № 6. С. 35-48.
16. **Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М.** Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига: Зинатне. 1966. 260 с.
17. **Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П., Рудольф А.Я., Старцев О.В., Тихонов В.Б.** Методы механических испытаний композиционных стержней: монография. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2011. 314 с.
18. **Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Атысова Е.В., Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю.** Влияние температуры на прочность базальто- и стеклопластиков. *Ползуновский вестник*. 2014. № 4. Т. 2. С. 154-158.
19. **Луговой А.Н., Савин В.Ф., Петров М.Г., Блазнов А.Н., Старцев О.В.** Хладостойкость и морозостойкость стеклопластика, выпускаемого ООО «Бийский завод стеклопластиков». *Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады VII Всероссийской научно-практической конференции 22-24 мая 2007 г.* Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2007. С. 149-153.
20. **Блазнов А.Н., Локтев М.Ю., Луговой А.Н., Поздеев С.П., Рудольф А.Я., Савин В.Ф., Старцев О.В., Тихонов В.Б.** Патент № 2451281 РФ. 2012.
21. **Вейбулл В.** Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение. 1964. 275 с.
22. **Startsev O.V., Blaznov A.N., Petrov M.G., Atyasova E.V.** A Study of the Durability of Polymer Composites under Static Loads. *Polymer Science, Series D*. 2019. V. 12. N 4. P. 440-448. DOI: 10.1134/S1995421219040166



23. **Берг О.Я., Навевич Ю.М.** Механические свойства стеклопластиковой арматуры больших сечений. *Бетон и железобетон*. 1964. № 12. С. 532-535.
24. **Фролов Н.П.** Технология изготовления стеклопластиковой арматуры и некоторые ее свойства. *Бетон и железобетон*. 1965. № 9. С. 5-8.

Поступила в редакцию 13.09.2021

Принята к опубликованию 20.09.2021

## REFERENCES

1. Climatic tests of building materials: monograph. Moscow: Izd-vo ASV. 2017. 558 p. (in Russian).
2. **Blaznov A.N., Krasnova A.S., Krasnov A.A., Zhurkovsky M.E.** Geometric and mechanical characterization of ribbed FRP rebars. *Polymer Testing*. 2017. V. 63. P. 434-439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.006>
3. **Blaznov A.N., Markin V.B., Krotov A.S., Firsov V.V., Bychin N.V., Sakoshev Z.G.** Basalt plastic properties under climatic aging conditions. *Smart Composite in Construction*. 2021. V. 2. N 1. P. 29-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46168573>
4. Encyclopedia of polymers. In 3 vol. V. 1. M.: Sovetskaya ehntsiklopediya. 1977. P. 892-893 (in Russian).
5. **Skudra A.M., Bulavs F.Ya., Rotsens K.A.** Creep and static fatigue of reinforced plastics. Riga: Zinatne. 1971. 238 p. (in Russian).
6. **Tikhonov V.B., Blaznov A.N., Savin V.F.** Method of fiberglass testing for static durability. *Inorganic Materials*. 2011. V. 47. N 15. P. 1702-1706. DOI 10.1134/S0020168511150167.
7. **Bartenev G.M.** Strength and mechanism of polymer destruction. M.: Khimiya. 1984. 280 p. (in Russian).
8. **Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Physical bases of forecasting the durability of structural materials. SPb: Politehnika. 1993. 475 p. (in Russian).
9. **Blaznov A.N.** Influence of the external environment on the strength of fiberglass construction reinforcement. Climatic tests of building materials: monograph. M.: Izd-vo ASV. 2017. P. 367-465 (in Russian).
10. **Zhurkov S.N., Narzullaev V.A.** Time dependence of the strength of solids. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1953. V. 23. Iss. 10. P. 1677-1689 (in Russian).
11. **Zhurkov S.N.** Kinetic concept of the strength of solids (Thermal fluctuation mechanism of destruction). *Vestnik AN SSSR*. 1968. N. 3. P. 46-52 (in Russian).
12. **Zhurkov S.N., Kuksenko V.S.** Micromechanics of polymer destruction. *Mekhanika polimerov*. 1974. N. 5. P. 792-801 (in Russian).
13. **Kaush G.** Destruction of polymers. M.: Mir. 1981. 440 p. (in Russian).
14. **Ratner S.B., Yartsev V.P.** Plastic performance under load and ways of its prediction and improvement. M.: NIITEKHIM. 1979. Iss. 3 (153). 65 p. (in Russian).
15. **Ratner S.B.** Physical regularities of predicting the operability of structural plastic masses. *Plasticheskie massy*. 1990. N. 6. P. 35-48 (in Russian).
16. **Tarnopolsky Yu.M., Skudra A.M.** Structural strength and deformability of fiberglass. Riga: Zinatne. 1966. 260 p. (in Russian).
17. **Blaznov A.N., Savin V.F., Volkov Yu.P., Rudolf A.Ya., Startsev O.V., Tikhonov V.B.** Methods of mechanical testing of composite rods: monograph. Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta. 2011. 314 p. (in Russian).
18. **Blaznov A.N., Savin V.F., Atyasova E.V., Babenko FI., Fedorov Yu.Yu.** The influence of temperature on the strength of basalt and fiberglass. *Polzunovskii vestnik*. 2014. N 4. V. 2. P. 154-158 (in Russian).
19. **Lugovoy A.N., Savin V.F., Petrov M.G., Blaznov A.N., Startsev O.V.** Cold resistance and frost resistance of fiberglass produced by Biysk Fiberglass Plant LLC. *Tekhnika i tekhnologiya proizvodstva teploizolyatsionnykh materialov iz mineral'nogo syr'ya: Doklady VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 22-24 maya 2007 g.* Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta. 2007. P. 149-153 (in Russian).
20. **Blaznov A.N., Loktev M.Yu., Lugovoy A.N., Pozdeev S.P., Rudolf A.Ya., Savin V.F., Startsev O.V., Tikhonov V.B.** RF Patent N 2451281. 2012 (in Russian).
21. **Weibull V.** Fatigue tests and analysis of their results. M.: Mashinostroenie. 1964. 275 p. (in Russian).
22. **Startsev O.V., Blaznov A.N., Petrov M.G., Atyasova E.V.** A Study of the Durability of Polymer Composites under Static Loads. *Polymer Science, Series D*. 2019. V. 12. N 4. P. 440-448. DOI: 10.1134/S1995421219040166
23. **Berg O.Ya., Nagevich Yu.M.** Mechanical properties of fiberglass reinforcement of large cross-sections. *Beton i zhelezobeton*. 1964. N 12. P. 532-535 (in Russian).
24. **Frolov N.P.** Manufacturing technology of fiberglass reinforcement and some of its properties. *Beton i zhelezobeton*. 1965. N 9. P. 5-8 (in Russian).

Received 13.09.2021

Accepted 20.09.2021