УДК 678.067.5 : 539.3 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1509-1523

Напряженно-деформированное состояние стеклопластика в условиях климатического старения

Г.В. Мартынов, Д.Е. Монастырева, Е.А. Морина, А.И. Макаров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследованы образцы стеклопластика с целью его эффективного применения в строительстве в долгосрочной перспективе. Стеклопластик считается одним из самых универсальных и прочных материалов среди полимерных композиционных материалов, но и он подвергается разрушению. Одной из основных причин снижения заданных характеристик и свойств материала является эксплуатационная. Еще на стадии проектирования следует определиться с наиболее надежными и экономичными материалами, иметь полную информацию об их прочности, долговечности. Чтобы избежать деструкции материала, а также продлить срок его эксплуатации, необходимо понимать, как именно изменяются свойства материала во времени. Стеклопластик применяется в строительстве недавно. Производители не решаются применять его в качестве материала для ответственных конструкций, поскольку изменения его характеристик в зависимости от эксплуатационных факторов не являются достаточно изученными для промежутков, превышающих 4–5 лет эксплуатации.

Материалы и методы. Проведены испытания образцов из стеклопластика профильного пултрузионного строительного (СППС) с продольным и поперечным расположением стекловолокна на климатическое старение в климатической камере, в течение 5-ти циклов, имитирующих 5 лет эксплуатации материала. Все образцы подвергались испытаниям на растяжение на разрывной машине Р-5.

Результаты. Определены разрушающие напряжения, выполнены расчеты и проанализированы упругие и прочностные характеристики образцов. На основе полученных результатов проведен анализ. Сформулированы выводы об эффективности применения в строительстве стеклопластика в долгосрочной перспективе. Определено влияние таких эксплуатационных факторов как влага, положительная и отрицательная температуры, ультрафиолет на свойства стеклопластика с различным расположением стекловолокна.

Выводы. Выявлено, что разрушающие напряжения стеклопластика значительно снижаются в ходе первых двух лет эксплуатации, что необходимо учитывать при выборе стеклопластика с заявленными характеристиками. Ультрафиолет не оказывает значительного влияния на упруго-прочностные свойства материала, при этом в ходе эксплуатации упругие характеристики в поперечном направлении изменяются гораздо интенсивнее, чем в поперечном.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стеклопластик, климатическое старение, разрушающие напряжения, растяжение, климатическая камера, ультрафиолет, эксплуатация материала, температура, влажность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Морина Е.А., Макаров А.И.* Напряженно-деформированное состояние стеклопластика в условиях климатического старения // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 12. С. 1509–1523. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1509-1523

Stress-strain state of fiberglass in conditions of climatic aging

Gleb V. Martynov, Daria E. Monastyreva, Elena A. Morina, Aleksey I. Makarov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Were investigated samples of fiberglass with the aim of its effective use in construction in the long term. Fiberglass is considered one of the most versatile and durable materials among polymer composite materials, however, and it is subject to destruction. It is known that one of the main reasons for reducing the specified characteristics and material properties is operational. At the design stage, it is necessary to determine the most reliable and economical materials used and, accordingly, be sufficiently aware of their strength and durability. Thus, in order to avoid the destruction of the material, as well as significantly enhance and prolong its service life, it is necessary to be aware of how exactly the properties of the material change over time. Regarding reinforced concrete, wood, brick and steel fiberglass is used in construction recently. This means that while the service life of the list of the most common materials in construction is known to a sufficient extent, manufacturers do not dare to use fiberglass as a material for critical structures. This occurs because changes in its characteristics, depending on operational factors, are not sufficiently studied for intervals exceeding 4–5 years of operation.

Materials and methods. During the work, samples of fiberglass SPPS with a longitudinal and transverse arrangement of fiberglass were tested for climatic aging in a climatic chamber for 5 cycles simulating 5 years of material operation. All samples were subjected to tensile testing on a tensile testing machine R-5.

Results. Destructive stresses were determined, calculations were carried out and elastic and strength characteristics of the samples were analyzed. On the basis of the obtained results, an analysis was carried out, conclusions were formulated about the use of fiberglass in the construction in the long term, as well as the influence of such operational factors as moisture,

Вестник МГСУ • **Vestnik MGSU** • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 13 Выпуск 12, 2018** • **Volume 13 Issue 12, 2018**

positive and negative temperatures, and ultraviolet radiation on the properties of fiberglass with a different arrangement of fiberglass.

Conclusions. Found that the destructive stresses of fiberglass are significantly reduced during the first two years of operation, which must be considered when choosing fiberglass with the stated characteristics. Ultraviolet does not have a significant effect on the elastic-strength properties of the material, while during operation the elastic characteristics in the transverse direction change much more intensively than in the transverse direction.

KEYWORDS: fiberglass, climatic aging, destructive stresses, stretching, climate chamber, ultraviolet, material exploitation, temperature, humidity

FOR CITATION: Martynov G.V., Monastyreva D.E., Morina E.A., Makarov A.I. Stress-strain state of fiberglass in conditions of climatic aging. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:12:1509-1523. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1509-1523 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на сегодняшний день стекловолокно достаточно широко используется в строительстве: армирование фундаментов, бетонных конструкций, дорожного и авиационного полотна, в виде армирующих сеток для несущего или облицовочного слоя при строительстве или ремонте зданий, крепления теплоизоляции [1, 2]. Производители утверждают, что прочность стекловолокна превосходит прочность легированной стали, поэтому интерес к полимерным композиционным материалам как к строительному материалу усиливается. Однако строительные компании не могут быть уверены в эффективности работы стеклопластика, поскольку на данный момент реальные объекты с возрастом более 20–30 лет построенные с использованием стеклопластика отсутствуют. Любой материал со временем теряет некоторую долю своих начальных характеристик [3]. Изменения, которые претерпевает материал с течением времени, могут быть необратимыми, и основные из них являются следствием климатического старения [4, 5].

Особый интерес представляет комплекс влияния отдельных климатических факторов: тепла, влияния ультрафиолета, влаги. В ряде исследований показано влияние относительной влажности воздуха, плюсовых и минусовых температур, ультрафиолета в течение года [6]. Как правило, при оценивании материала на стойкость к климатическому старению, основными воздействующими факторами являются температура и влажность [7], однако влияние солнечной радиации нельзя не учитывать, поскольку УФ-излучение — основной деструктор связующего волокон стеклопластика, хотя само повреждение материала посредством радиации происходит только в поверхностном слое [8]. Многие ученые [9–14] отмечают, что материал не является достаточно стойким к влаге, установлено, что подвижные молекулы воды способны переноситься в эпоксидную матрицу связующего, тем самым изменяя свойства материала. Известно также, что свойства материала изменяются соответственно с образованием дефектов, которые на сегодняшний день можно смоделировать и оценить их влияние на прочность [15]. Современные математические операторы позволяют производить расчеты, такие как расчет температурных напряжений [16], производить учет структурной неоднородности материала [17] и оценивать прочность композита с межслойным сдвигом [18].

Стратегические оценки развития материалов и математических расчетов с учетом дефектов и упругих характеристик описаны ученым Е.Н. Кабловым [19]. Научное сообщество считает, что прогресс в научно-исследовательских работах способствует становлению стеклопластика все более универсальным материалом, экономически оправданным и оптимальным для применения в строительстве [20]. Однако подоплекой для большего развития систем автоматизированного расчета является эксперимент, на основе которого могут быть получены ценные знания и свойства, используемые далее в теоретических расчетах. Комбинацией экспериментальной и расчетной оценок занимаются Е.А. Неклюдова и А.И. Дульнев [21]. В своих экспериментах многие исследователи приходят к выводам, что для того, чтобы дать точную оценку свойствам материала, кратковременные испытания недостаточны. В особенности, испытания на искусственное старение должны иметь комплекс воздействующих факторов, а также имитировать эксплуатацию материала от 5 лет и выше, чтобы достоверно проследить изменение его характеристик и впоследствии иметь фундамент для дальнейшего прогнозирования [22].

Цель данной статьи заключается в выявлении эффективности применения стеклопластика профильного пултрузионного строительного (СППС) в строительстве с точки зрения изменения упругих и прочностных свойств материала во времени.

В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Провести климатические испытания образцов из стеклопластика СППС с продольным и поперечным расположением стекловолокна.

2. Провести испытания на растяжение образцов из стеклопластика СППС с продольным и поперечным расположением стекловолокна, а также определить разрушающие напряжения.

3. Исходя из полученных данных, вычислить модуль упругости материала.

4. Произвести сравнительный анализ полученных результатов и сформулировать выводы об эффективности применения в строительстве стеклопластика в долгосрочной перспективе.

МЕТОДИКА

Главная задача выполняемой работы — определение изменения упругих и прочностных характеристик стеклопластика СППС после выполнения искусственного старения образцов в лабораторных условиях, а также проведения сравнительного анализа полученных результатов. Результаты исследования позволяют дать ответ на вопрос: «Какими упругими и прочностными характеристиками будет обладать стеклопластик СППС после 5 лет эксплуатации».

В данной работе испытаниям подвергались образцы из конструкционного стеклопластика СППС, выпускаемого НПП «АпАТэК» (г. Москва), представляющего собой конструкционный полимерный композиционный материал, предназначенный для эксплуатации в качестве основного конструкционного материала в составе мостовых конструкций в условиях ОМ1 по ГОСТ 15150-69. Эскиз образца представлен на рис. 1. Схема приложения нагрузки при испытании образцов показана на рис. 2. Образцы изготовлены из одной партии швеллера 388×120×10/12 (СППС-340). Вырезка образцов

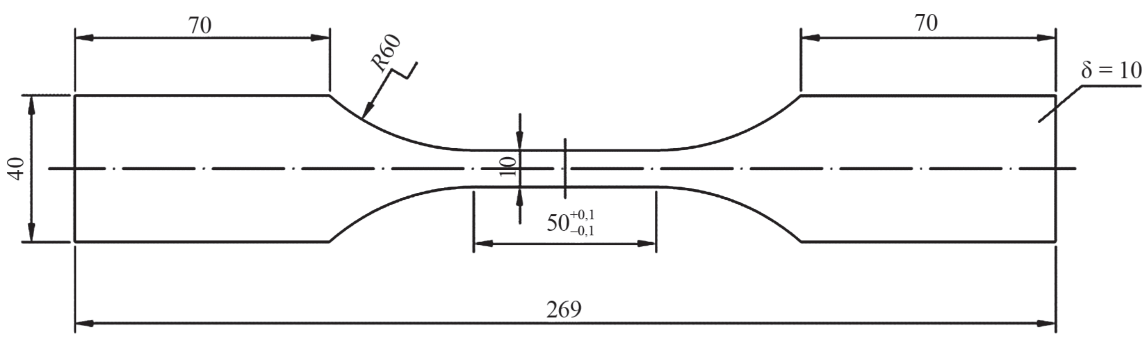

Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение

Fig. 1. Samples for tensile tests

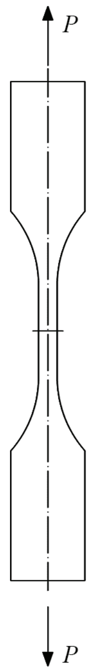

Рис. 2. Схема приложения нагрузки при испытании образцов на растяжение

Fig. 2. Scheme of load application for tensile specimens

Вестник МГСУ • Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 12, 2018 • Volume 13 Issue 12, 2018

осуществлялась так, чтобы длинная сторона образца лежала в продольном и поперечном направлении профиля.

Для всех исследуемых образцов были определены основные механические характеристики при растяжении, такие как разрушающее напряжение и модуль упругости материала, из которого выполнен испытуемый образец.

Испытания проводились на разрывной машине модели 2166 Р-5. Машины разрывные 2166 Р-5 оснащены тензорезисторным силоизмерителем нагрузки. Исполнение машин — электромеханические двухколонные вертикальные, силосоздающий модуль и пульт оператора разъединены. Особенность машин в увеличенном рабочем расстоянии по вертикали, универсальности к материалам образцов испытания и в наличие электрического сигнала параметров испытания (возможность подсоединения ПК для обработки данных испытания). Не требует установки на специальный фундамент, устанавливается на виброопоры. В разрывных машинах применены механические клиновые захваты, обеспечивающие надежное крепление образцов и простоту в эксплуатации. Они оснащены электронным считывателем перемещения, имеется возможность распечатать данные испытания на двухкоординатном самописце.

Подготовка образцов к испытанию проводилась с учетом рекомендаций ГОСТ 14359-69* «Пластмассы. Методы механических испытаний», ГОСТ 11262-80* «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», ГОСТ 9550-81 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе».

Испытания на климатическое старение выполняли циклически по методике, разработанной в соответствии с требованиями ГОСТ 9.707-81, метод 2 для продольных образов по двум режимам:

- воздействие положительной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры и перепадов температуры;
- воздействие положительной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры, перепадов температуры и ультрафиолетового излучения.

Продолжительность климатических испытаний — 5 циклов.

При испытаниях образец из композиционного материала доводился до разрушения.

Режим 1 одного цикла ускоренных испытаний, имитирующих воздействие положительной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры и перепадов температуры, приведен в табл. 1.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 336 ч.

Испытания по 1 режиму выполняют следующим образом:

Образцы помещают в камеру тепла и влаги и выдерживают при температуре плюс 60 °С и влажности (97±3) % в течение 330 ч.

Время выдержки вычислено расчетным путем согласно формуле

$$\lg \tau_y = \lg \tau_{xp} + \frac{E}{2{,}3 \cdot R} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_э}\right), \qquad (1)$$

Табл. 1. Режим одного цикла ускоренных испытаний

Table 1. Mode of one cycle of accelerated tests

Имитирующее воздействие / Imitating effect	Продолжительность воздействия, ч / Duration of exposure, h	Относительная влажность воздуха, % / Relative humidity,%	Температура, °С / Temperature, °С	Оборудование / Equipment
Воздействие положительной температуры и влажности воздуха / Exposure to positive temperature and humidity	330	97±3	+60	Камера тепла и влаги / Heat and moisture chamber
Воздействие отрицательной температуры / Impact of negative temperature	6	Не регламентируется / Not regulated	–60	Камера тепла и холода / Chamber of heat and cold
Воздействие перепадов температуры / Impact of temperature drops	Скорость изменения температуры 1 °С/мин / The rate of temperature change 1 °С/min	Не регламентируется / Not regulated	от –60 до +60 / from –60 to +60	Камера тепла и холода / Chamber of heat and cold

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

где $\tau_у$ — продолжительность испытаний, ч; $T_п$ — температура испытаний, К·$T_п$ = 333 К; $\tau_{хр}$ — заданная продолжительность эксплуатации при повышенной влажности за год, ч; $\tau_{хр}$ = 3180 ч (принято по г. Калининграду в соответствии с ГОСТ 9.039-74, имеющему максимальное время увлажнения поверхности для пунктов с морским климатом, табл. 1); $E = 41{,}868 \cdot 10^3$ Дж/моль (10 ккал/моль); $T_э$ — эквивалентная температура, установленная для заданного значения E по монограмме для умеренно-холодного климата, $T_э$ = 290 К; R = 8,319 Дж/моль·К (1,987 кал/моль °С).

Затем из камеры тепла и влаги образцы переносят в камеру тепла и холода, выдерживают в течение 2 ч при температуре +20 °С, и начинают охлаждение от +20 °С до –20 °С со скоростью 1 °С/мин, выдерживают при –20 °С в течение 30 мин, охлаждают до –60 °С со скоростью 1 °С/мин и выдерживают при температуре –60 °С в течение 6 ч. Затем ступенчато повышают температуру до +60 °С со скоростью 1 °С/мин и выдержкой при +20 °С в течение 30 мин. При температуре +60 °С выдерживают 30 мин.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 336 ч.

Режим 2 одного цикла ускоренных испытаний, имитирующих воздействие положительной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры, перепадов температуры и ультрафиолетового излучения, приведен в табл. 2.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 336 ч.

Испытания по второму режиму выполняют следующим образом:

Образцы помещают в камеру солнечной радиации и выдерживают при температуре +60 °С в течение 56 ч.

Затем из камеры солнечной радиации образцы переносят в камеру тепла и влаги и выдерживают при температуре +60 °С и влажности (97±3) % в течение 274 ч.

Далее из камеры тепла и влаги образцы переносят в камеру тепла и холода, выдерживают в течение

Табл. 2. Режим одного цикла ускоренных испытаний с учетом воздействия УФ-излучения

Table 2. The mode of one cycle of accelerated tests with regard to exposure to UV radiation

Имитирующее воздействие / Imitating effect	Продолжительность воздействия, ч / Duration of exposure, h	Относительная влажность воздуха, % / Relative humidity, %	Температура, °С / Temperature, °С	Поверхностная плотность УФ-излучения (280–400 Нм), Вт/м² / Surface density UV radiation (280–400 Nm), W/m²	Интегральная плотность теплового потока, Вт/м² / Integrated heat flux density, W/m²	Оборудование / Equipment
Воздействие солнечной радиации / Solar radiation exposure	56	Не регламентируется / Not regulated	+60	68	1120	Камера солнечной радиации / Solar radiation chamber
Воздействие положительной температуры и влажности воздуха / Exposure to positive temperature and humidity	274	97±3	+60	–	–	Камера тепла и влаги / Heat and moisture chamber
Воздействие отрицательной температуры / Impact of negative temperature	6	Не регламентируется / Not regulated	–60	–	–	Камера тепла и холода / Chamber of heat and cold
Воздействие перепадов температуры / Impact of temperature drops	Скорость изменения температуры 1 °С/мин / The rate of temperature change 1 °С/min	Не регламентируется / Not regulated	от –60 до +60	–	–	Камера тепла и холода / Chamber of heat and cold

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

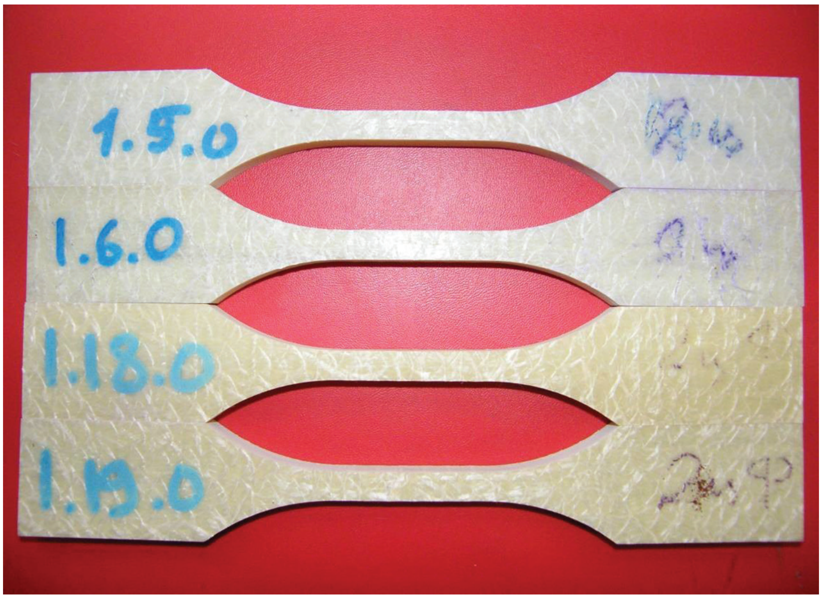

Рис. 3. Образцы до проведения испытаний на растяжение

Fig. 3. Samples before tensile testing

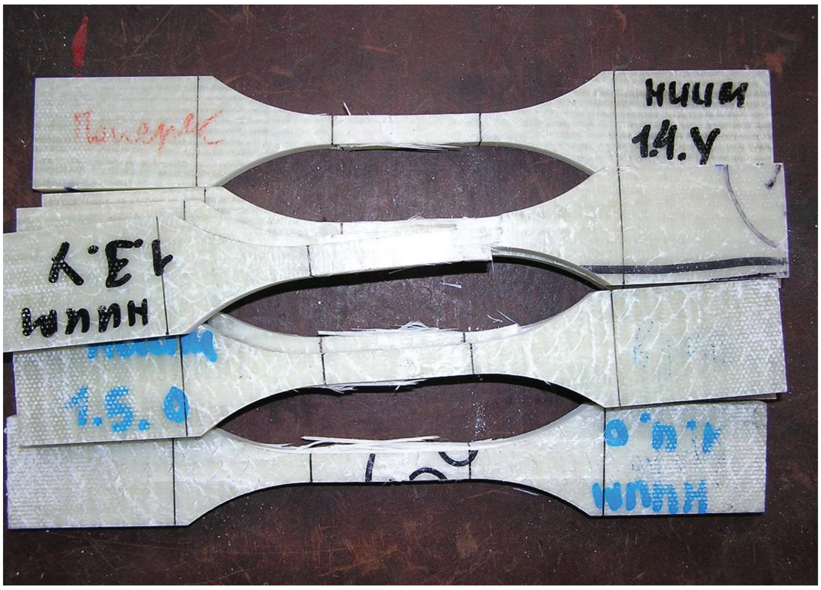

Рис. 4. Образцы после проведения испытаний на растяжение

Fig. 4. Samples after tensile testing

2 ч при температуре +20 °C и начинают охлаждение от +20 до –20 °C со скоростью 1 °C/мин, выдерживают при –20 °C в течение 30 мин, охлаждают до –60 °C со скоростью 1 °C/мин и выдерживают при температуре –60 °C в течение 6 ч. Затем ступенчато повышают температуру до +60 °C со скоростью 1 °C/мин и выдержкой при +20 °C в течение 30 мин. При температуре +60 °C выдерживают 30 мин.

Расстояние между образцами и стенками камеры должно быть не менее 50 мм. Расстояние между образцами — не менее 10 мм.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 336 ч.

Испытательное оборудование:

- камера тепла и влаги типа KTLK 1250 фирмы «Feutron», Германия;
- камера тепла и холода VLK 08/500 фирмы «Heraeus VOTSCH», Германия;
- камера солнечной радиации 3001 фирмы «Feutron», Германия.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

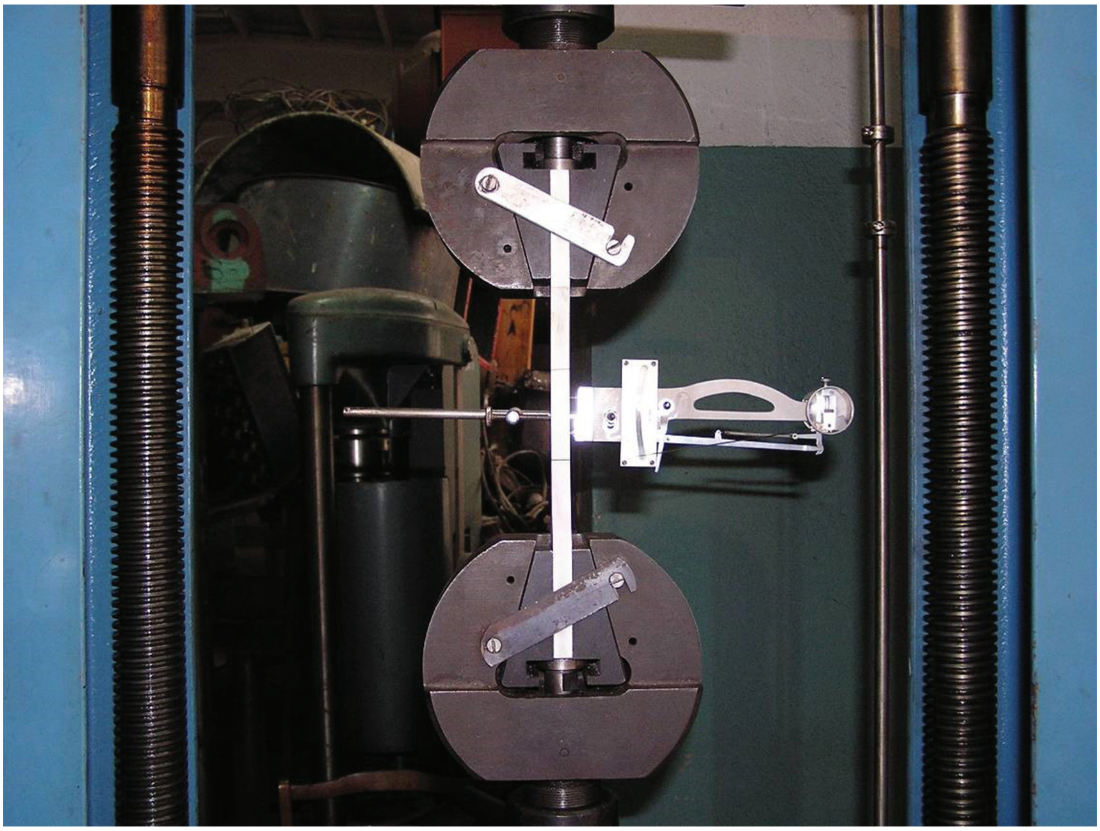

Рис. 5. Испытание образца в машине Р-5

Fig. 5. Test of the sample in the machine R-5

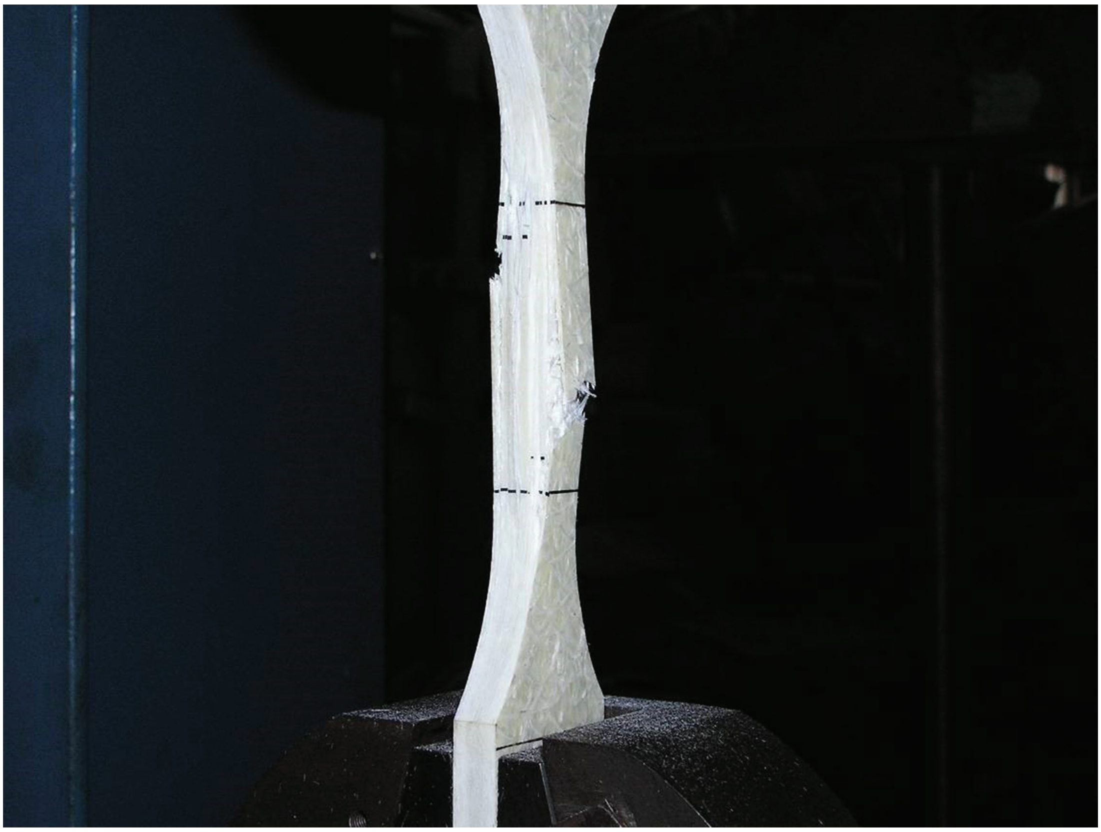

Рис. 6. Разрушение образца в машине Р-5

Fig. 6. The destruction of the sample in the car P-5

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

Стойкость конструкционного стеклопластика СППС на старение при воздействии климатических факторов оценивалась по разрушающим напряжениям при растяжении. Разрушающие напряжения $\sigma_{рм}$ при растяжении определялись по формуле

$$\sigma_{рм} = \frac{F_{рм}}{A_0}, \qquad (2)$$

где $F_{рм}$ — максимальная нагрузка при испытании на растяжение, Н; A_0 — начальное поперечное сечение образца, мм^2.

Модуль упругости при растяжении определялся по формуле

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) l_0}{A_0 (\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \qquad (3)$$

где F_2 и F_1 — нагрузки, соответствующие относительному удлинению 0,3 и 0,1 %; l_0 — база измерения деформаций (20 мм); Δl_2 и Δl_1 — удлинения, соответствующие нагрузкам F_2 и F_1.

По итогам испытаний образцов на растяжение удалось зафиксировать максимальные разрывные усилия, прилагаемые к образцам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний образцов на растяжение представлены в табл. 3. Измеренный диаметр образцов не соответствовал заявленным производителем, расчет прочности и модуля упругости производился с учетом фактических диаметров. В таблицу занесены средние значения характеристик материалов, вычисленные по итогам результатов испытания пяти образцов из каждого материала.

Отметим, что процесс искусственного старения отрицательно сказывается на прочностных способностях стеклопластика. На графике показано, что прочность стеклопластика значительно падает в первые 1–2 года эксплуатации. У образцов с поперечным расположением стекловолокна в ходе первого года эксплуатации разрушающие напряжения упали на 38 %. Далее резкие перепады в значениях отсутствуют, разрушающие напряжения отклоняются не более чем на 5 % от своего предыдущего значения. Для продольного расположения стекловолокна наименьшие значения разрушающего напряжения при растяжении достигаются после двух циклов климатических испытаний, эквивалентных двум годам использования материала (разрушающие напряжения снизились на 25 % от своего начального значения). В ходе 3–5 годов эксплуатации разрушающие напряжения изменились незначительно относительно значений после второго года эксплуатации. Следует подчеркнуть, что кратковременные испытания не позволяют оценить снижение прочности с течением времени, однако буквально после 1–2 лет эксплуатации стеклопластик теряет в прочности значительную часть от заявленной производителем.

Проанализировав табл. 1–3, а также рис. 7, можно обосновать такую потерю прочности посредством необратимых процессов, происходящих в камере тепла и влаги, поскольку связующее стеклопластика претерпевает химические и структурные изменения, их гидролиз и последующие превращения, приводящие к необратимой потере прочности стекловолокна за счет развития поверхностных дефектов на его поверхности. Также следует отметить, что связующее, использующееся в стеклопластике, — эпоксидная смола, полученная из дифенилолпропана (бисфенола А) и эпихлоргидрина в присутствии щелочи не является атмосферостойкой из-за содержания щелочи, а химическая реакция взаимодействия кислорода воздуха с составляющими эпоксидной смолы интенсивнее всего протекает в первые несколько лет эксплуатации, чем и может быть обосновано такое понижение прочности стеклопластика.

Влияние ультрафиолета на разрушающие напряжения образцов с продольным расположением стекловолокна является незначительным. Поскольку ультрафиолет имеет негативное воздействие на связующее волокон стеклопластика, которое на разрушающих напряжениях материала при растяжении не сказывается, оценить влияние ультрафиолета на весь перечень свойств необходимо в комплексе испытаний.

Можно отметить, что модуль упругости образцов из стеклопластика с продольным расположением волокон к пятому году эксплуатации изменяется незначительно от своего начального значения. В ходе эксплуатации упругие характеристики претерпевают изменения, однако отклонения от заявленных упругих характеристик материала не является критическими.

При поперечном направлении стекловолокна наблюдается увеличение модуля упругости на 22 % к концу пятого цикла испытаний относительно своего начального значения. Заметим, что старение материала негативно сказывается на упругих характеристиках стекловолокна в поперечном направлении, материал становится более хрупким, он хуже сопротивляется упругим деформациям.

Вестник МГСУ Том 13 Выпуск 12, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

Табл. 3. Результаты испытаний образцов на растяжение

Table 3. The results of tensile test samples

Номер образца / Sample number	Площадь, мм^2 / Area, mm^2	Разрушающая нагрузка, Н / Breaking load, N	Разрушающие напряжения $F_{рм}$, МПа / Breaking stress F_{rm}, MPa	Среднее значение $F_{рм}$, МПа / Average value F_{rm}, MPa	Модуль упругости $E_р$, МПа / Elastic modulus E_r, MPa	Среднее значение $E_р$, МПа / Average value E_r, MPa
Контрольные образцы, продольное направление / Control samples, longitudinal direction						
1	102,88	42,70	415,05		26 814	
2	103,98	42,00	403,92		28 852	
3	104,61	46,75	446,90	411,69	25 647	27 406
4	103,79	44,90	432,60		25 355	
5	107,23	38,60	359,97		30 362	
1-й цикл, продольное направление / 1st cycle, longitudinal direction						
1	98,68	34,70	351,64		27 868	
2	105,20	39,80	378,33	372,30	26 810	26 348
3	102,60	39,70	386,94		24 366	
2-й цикл, продольное направление / 2nd cycle, longitudinal direction						
1	102,34	27,60	269,69		27 268	
2	103,40	32,00	309,48	304,56	29 934	29 169
3	104,63	35,00	334,51		30 304	
3-й цикл, продольное направление / 3rd cycle, longitudinal direction						
1	102,92	32 800	318,69	355,97	28 187	27 936
2	103,29	38 800	375,64		28 715	
3	101,72	38 000	373,56		26 906	
4-й цикл, продольное направление / 4th cycle, longitudinal direction						
1	102,36	34 800	339,97	339,83	27537	30 841
2	102,67	34 400	335,06		29184	
3	105,97	36 500	344,45		35802	
5-й цикл, продольное направление / 5th cycle, longitudinal direction						
1	106,91	28 800	269,40	293,43	28 298	26 885
2	103,73	32 100	309,45		26 482	
3	101,84	30 700	301,44		25 874	
Контрольные образцы, поперечное направление / Control samples, transverse direction						
1	105,93	8,20	77,41		4841	
2	104,72	7,30	69,71		7453	
3	106,47	7,50	70,44	78,48	4858	5570
4	105,99	9,10	85,86		5340	
5	105,65	9,40	88,97		5357	
1-й цикл, поперечное направление / 1st cycle, transverse direction						
1	105,93	5,50	51,92		6025	
2	105,86	5,90	55,73		4723	
3	104,84	4,30	41,01	48,29	4335	4885
4	101,96	5,50	53,94		5029	
5	103,04	4,00	38,82		4313	
2-й цикл, поперечное направление / 2nd cycle, transverse direction						
1	103,63	4,80	46,32		9982	

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

Номер образца / Sample number	Площадь, мм² / Area, mm²	Разрушающая нагрузка, Н / Breaking load, N	Разрушающие напряжения $F_{рм}$, МПа / Breaking stress F_{rm}, MPa	Среднее значение $F_{рм}$, МПа / Average value F_{rm}, MPa	Модуль упругости $E_р$, МПа / Elastic modulus E_r, MPa	Среднее значение $E_р$, МПа / Average value E_r, MPa
3	102,65	5,50	53,58		4531	
4	102,87	4,00	38,88	44,89	6204	6495
5	103,56	4,30	41,52		5364	
6	101,98	4,50	44,13		6395	
3-й цикл, поперечное направление / 3rd cycle, transverse direction						
1	103,71	4650	44,84	48,03	8172	8106
2	99,79	5640	56,52		7343	
3	98,87	4640	46,93		9470	
4	97,69	4340	44,42		6328	
5	99,05	4700	47,45		9220	
4-й цикл, поперечное направление / 4th cycle, transverse direction						
1	101,02	3940	39,00	42,57	6548	7957
2	103,25	3860	37,38		7105	
3	105,46	5540	52,53		8162	
4	106,81	5160	48,31		11 979	
5	105,57	3760	35,61		5991	
5-й цикл, поперечное направление / 5th cycle, transverse direction						
1	104,32	3200	30,68	39,32	5386	6534
2	103,20	3580	34,69		6774	
3	105,56	5460	51,72		6612	
4	105,57	3570	33,82		7402	
5	104,64	4780	45,68		6496	
1-й цикл УФ, продольное направление / 1st cycle UV, longitudinal direction						
1	103,85	40,90	393,84	402,37	29 804	28 952
2	104,16	42,80	410,91		28 099	
2-й цикл УФ, продольное направление / 2nd cycle UV, longitudinal direction						
1	103,69	38,70	373,23	329,32	25 874	24 939
2	101,61	29,00	285,40		24 004	
3-й цикл УФ, продольное направление / 3rd cycle UV, longitudinal direction						
1	99,69	37 300	374,14	366,40	28 520	27 825
2	101,49	36 400	358,66		27 131	
4-й цикл УФ, продольное направление / 4th cycle UV, longitudinal direction						
1	97,73	32 000	327,42	329,22	29 698	28 288
2	101,50	33 600	331,02		26 879	
5-й цикл УФ, продольное направление / 5th cycle UV, longitudinal direction						
1	99,82	32 400	324,57	323,79	29 135	28 612
2	103,71	33 500	323,02		28 089	

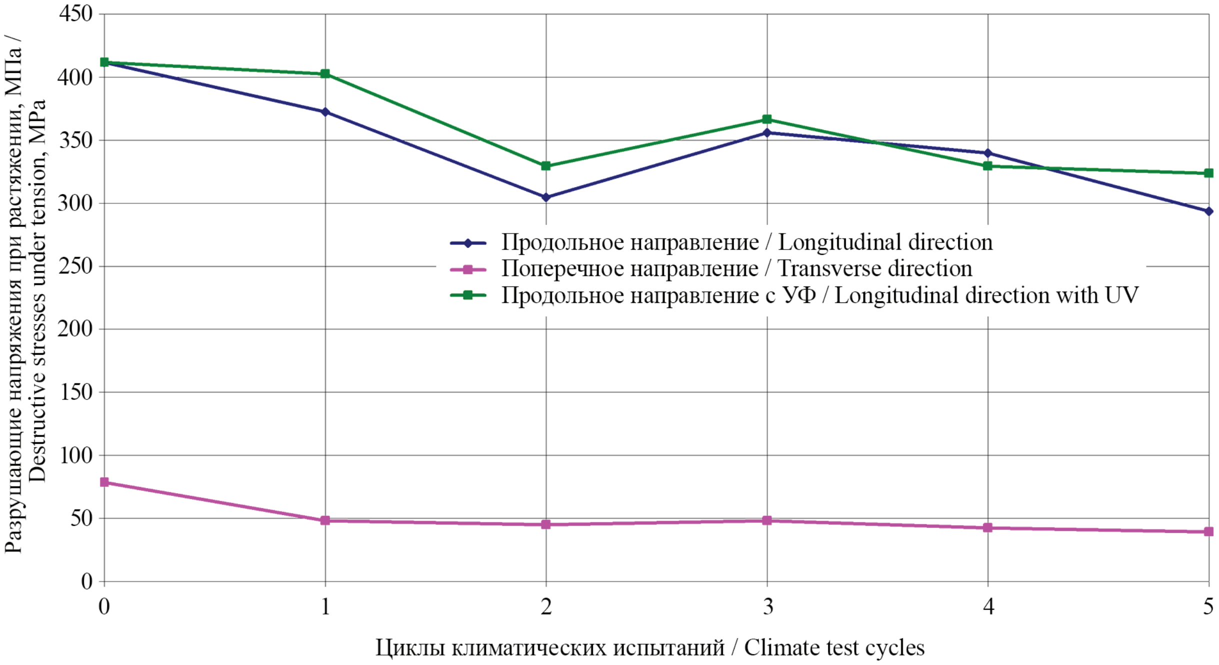

Рис. 7. Изменение разрушающих напряжений при растяжении от количества циклов климатических испытаний

Fig. 7. The change in destructive stresses under tension from the number of climatic test cycles

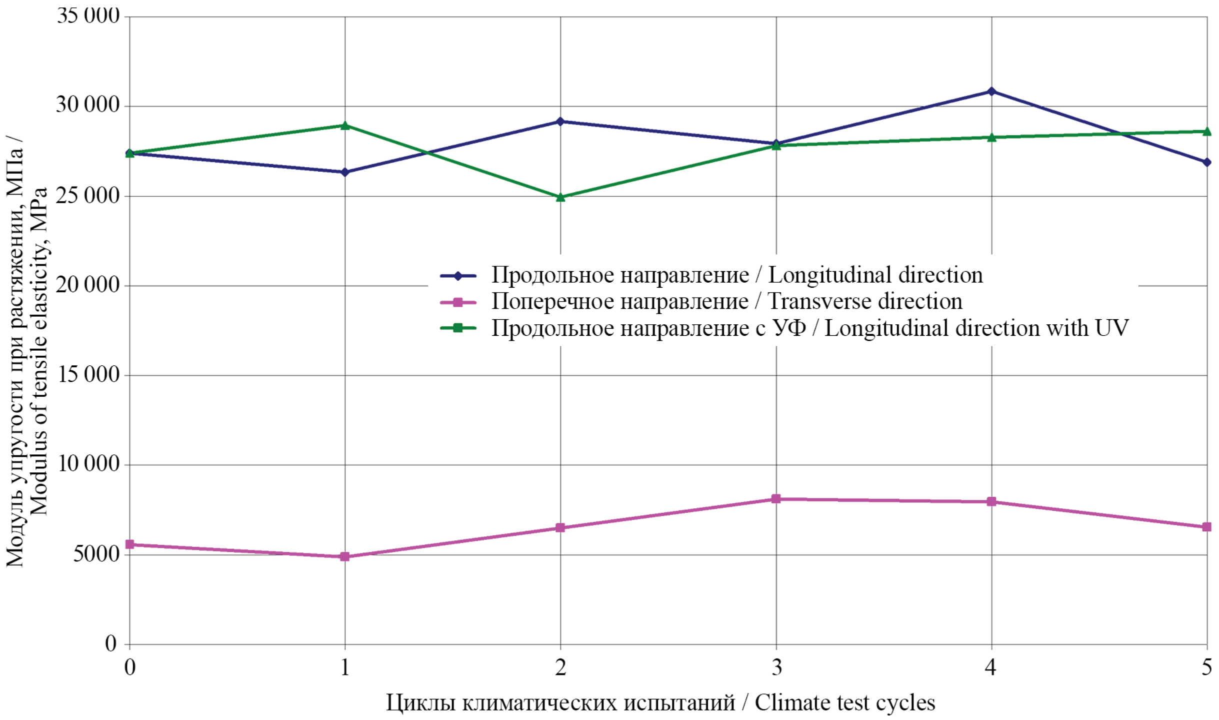

Рис. 8. Изменение модуля упругости при растяжении от количества циклов климатических испытаний

Fig. 8. Modification of tensile modulus by the number of climatic test cycles

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных испытаний на растяжение образцов из стеклопластика СППС с продольным и поперечным расположением стекловолокна в ходе пяти циклов климатических испытаний, а также в результате определения разрушающих напряжений, были вычислены упруго-прочностные характеристики, которые наглядно демонстрируют динамику изменений своих значений в ходе эксплуатации материала. По результатам исследования можно выявить, что эффективность применения стеклопластика значительно снижается после первых лет эксплуатации, поэтому применяя стеклопластик для долговечных строительных конструкций необходимо принимать во внимание его динамику изменения свойств:

1. Разрушающие напряжения стеклопластика значительно снижаются в ходе первых двух лет эксплуатации (25–38 %), что необходимо учитывать при выборе стеклопластика с заявленными характеристиками. Такая потеря прочности объясняется посредством необратимых процессов, происходящих в камере тепла и влаги, поскольку связующее стеклопластика претерпевает химические и структурные изменения, далее происходит гидролиз соединений и последующие превращения, приводящие к необратимой потере прочности стекловолокна за счет развития поверхностных дефектов на его поверхности. Также следует отметить, что связующее, использующееся в стеклопластике — эпоксидная смола, полученная из дифенилолпропана (бисфенола А) и эпихлоргидрина в присутствии щелочи не является атмосферостойкой из-за содержания щелочи, а химическая реакция взаимодействия кислорода воздуха с составляющими эпоксидной смолы интенсивнее всего протекает в первые несколько лет эксплуатации, чем и может быть обосновано такое понижение прочности стеклопластика.

2. По полученным данным не выявлено значимого влияния воздействия ультрафиолета на упруго-прочностные характеристики стеклопластика СППС. Поскольку ультрафиолет имеет негативное воздействие на связующее волокон стеклопластика, которое на разрушающих напряжениях материала при растяжении не сказывается, оценить влияние ультрафиолета на весь перечень свойств необходимо в комплексе испытаний.

3. В ходе пяти лет эксплуатации материала модуль упругости материала с поперечным направлением расположения стекловолокна уменьшился на 22 %, в то время как упругие характеристики материала с продольным направлением волокон изменились незначительно. Это произошло поскольку при продольном расположении волокон взаимодействие воздуха со связующим происходит интенсивнее на гранях с меньшей площадью поверхности, в то время как при поперечном расположении стекловолокна связующее сильнее взаимодействует по граням с большей площадью поверхности.

4. Внешний вид образцов в ходе испытаний незначительно изменился за счет изменения цвета образцов. При этом следует отметить, что более интенсивное изменение цвета (пожелтение) наблюдается на образцах, испытываемых по 2-му режиму, включающему воздействие ультрафиолетового излучения. На поверхности всех образцов после испытаний отсутствуют какие-либо дефекты (трещины, пузыри).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зиновьев В.С., Овчинников И.Г.* Возможность применения композитных материалов при изготовлении и монтаже пешеходных мостов // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2013. Т. 2. С. 278–284.

2. *Щепочкина Ю.А.* Использование стекловолокна в композитах строительного назначения // Известия высших учебных заведения. Сер. : Технология текстильной промышленности. 2016. № 6 (366). С. 55–58.

3. *Старцев О.В., Каблов Е.Н., Махоньков А.Ю.* Закономерности α-перехода эпоксидных связующих композиционных материалов по данным динамического механического анализа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. : Машиностроение. 2011. № 2. С. 104–113.

4. *Панин С.В., Старцев О.В., Курс М.Г., Варченко Е.А.* Развитие методов климатических испытаний материалов для машиностроения и строительства в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова // Все материалы. Энциклопедический справочник. Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. 2016. № 10. С. 50–61.

5. *Постнов В.И., Постнова М.В., Вешкин Е.А.* Методика и результаты моделирования влияния эксплуатационных факторов на свойства авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Гидро-авиасалон — 2012 : сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации. Ч. 2. М. : ВИАМ, 2012. С. 151–157.

6. *Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., Zhurkovskii M.E., Erofeev V.T., Smirnov I.V.* Determination of the heat resistance of polymer construction materials by the dynamic mechanical method // Polymer

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

Science, Ser. : D. 2017. Vol. 10. Issue 4. Pp. 313–317. DOI: 10.1134/S1995421217040141

7. *Belaid S., Chabira S.F., Balland P., Sebaa M., Belhouideg S.* Thermal aging effect on the mechanical properties of polyester fiberglass composites // Journal of Materials and Environmental Science. 2015. No. 6 (9). Pp. 2795–2803.

8. *Каблов Е.Н., Старцев О.В*. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28

9. *Korobkov V.A., Krylova Ya.E., Kasatkina T.B., Levashov A.S., Gorokhov R.V., Bukov N.N. et al.* Diffusion of moisture in an epoxy coating with a disperse mineral filler // Polymer Science. Series D. 2016. No. 9 (3). Pp. 351–357. DOI: 10.1134/S1995421216030102

10. *Startsev V.O., Il'ichev A.V.* Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes // Mechanics of Composite Materials. 2018. Vol. 54. No. 2. Pp. 145–154. DOI:10.1007/s11029-018-9727-7

11. *Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V.* Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface // Doklady Physical Chemistry. 2015. Vol. 461. No. 2. Pp. 80–83. DOI: 10.1134/S001250161504003X

12. *Startsev V.O., Panin S.V., Startsev O.V.* Sorption and diffusion of moisture in polymer composite materials with drop-weight impact damage // Mechanics of Composite Materials. 2016. Vol. 51. No. 6. Pp. 761–770. DOI: 10.1007/s11029-016-9547-6

13. *Startsev V.O., Makhonkov A.Yu., Kotova E.A.* Mechanical property and moisture resistance of PCMs with damage // Aviation materials and technologies. 2015. No. S1. Pp. 49–55.

14. *Startsev V.O., Makhonkov A.Yu., Panin S.V., Startsev O.V.* Compression failure and moisture transfer in polymeric composite materials with mechanical damage // All materials. Handbook. 2016. No. 7. Pp. 2–11.

15. *Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Осокин В.М., Третьяков А.А., Писарев П.В.* Моделирование технологических дефектов и оценка их влияния на статическую прочность композитных фланцев // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 2. С. 5–21. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.01

16. *Екельчик В.С., Коновалова Л.В., Рябов В.М.* Расчет температурных напряжений в вязкоупругих телах при однородном охлаждении с помощью преобразования Лапласа // Механика композитных материалов. 1993. № 5 (25). С. 692–696.

17. *Перепечко И.И., Данилов В.А., Нижегородов В.В., Максимов А.В.* Структурная неоднородность эпоксидного связующего в однонаправленных стеклопластиковых пластиках // Механика композитных материалов. 2016. № 4 (29). С. 435–439.

18. *Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.И.* Прочность полимерного композита (стеклопластика) с межслойным сдвигом // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 42–50. DOI: 10.5862/MCE.62.5

19. *Каблов Е.Н.* Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33

20. *Zhang B.M., Li J., Li X.* Optimum mix ratio of hybrid fiber reinforced polymer composites and their researching progress // Cailiao Gongcheng. 2014. No. 7. Pp. 107–112. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.07.019

21. *Дульнев А.И., Неклюдова Е.А.* Экспериментально-расчетная оценка взрывосопротивляемости образцов из стеклопластика // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 47. С. 51–62. DOI: 10.17223/19988621/47/6

22. *Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В.* Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика марки ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 220–228.

Поступила в редакцию 13 октября 2018 г.
Принята в доработанном виде 4 ноября 2018 г.
Одобрена для публикации 30 ноября 2018 г.

Об авторах: **Мартынов Глеб Вадимович** — студент, **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, martynovgleb@rambler.ru;

Монастырева Дарья Евгеньевна — студентка, **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 02dm12@rambler.ru.

Морина Елена Андреевна — студентка, **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, lenusik_ya_ne@mail.ru;

Макаров Алексей Игоревич — студент, **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, almak17@yandex.ru.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 13 Выпуск 12, 2018**
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • **Volume 13 Issue 12, 2018**

REFERENCES

1. Zinoviev V.S., Ovchinnikov I.G. The possible application of composite materials for manufacturing and installation of pedestrian bridges. *New ideas of the new century: materials of the International scientific conference FAD TOGU*. Khabarovsk, TOGU Publ., 2013; 2:278-284. (rus.).

2. Shchepochkina Yu.A. Use of fiberglass in composites of construction appointment. *News of higher educational institutions. Ser. : Textile technology.* 2016; 6(366):55-58. (rus.).

3. Startsev O.V., Kablov E.N., Makhonkov A.Yu. Patterns of α-transition epoxy binder composite materials according to the dynamic mechanical analysis. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2011; 2:104-113. (rus.).

4. Panin S.V., Startsev O.V., Kurs M.G., Varchenko E.A. The development of methods for climatic testing of materials for mechanical engineering and construction in the GCCI VIAM them G.V. Akimova. *All materials. Encyclopedic reference. Comments on standards, specifications, certificates*. 2016; 10:50-61. (rus.).

5. Postnov V.I., Postnova M.V., Veshkin E.A. Methods and results of modeling the influence of operating factors on the properties of aircraft structures made of polymer composite materials. *Hydro-aviasalon — 2012 : collection of reports of the IX International Scientific Conference on Hydroaviation*. Part 2. Moscow, VIAM Publ., 2012; 151-157. (rus.).

6. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., Zhurkovskii M.E., Erofeev V.T., Smirnov I.V. Determination of the heat resistance of polymer construction materials by the dynamic mechanical method. *Polymer Science. Ser. : D*. 2017; 10(4):313-317. DOI: 10.1134/S1995421217040141

7. Belaid S., Chabira S.F., Balland P., Sebaa M., Belhouideg S. Thermal aging effect on the mechanical properties of polyester fiberglass composites. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2015; 6(9):2795-2803.

8. Kablov E.N., Startsev O.V. Fundamental and applied investigations of corrosion and aging of materials in climatic conditions. *Aviation materials and technologies*. 2015; 4(37):38-52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28 (rus.).

9. Korobkov V.A., Krylova Ya.E., Kasatkina T.B., Levashov A.S., Gorokhov R.V., Bukov N.N. et al. Diffusion of moisture in an epoxy coating with a disperse mineral filler. *Polymer Science. Series D.* 2016; 9(3):351-357. DOI: 10.1134/S1995421216030102

10. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes. *Mechanics of Composite Materials.* 2018; 54(2):145-154. DOI:10.1007/s11029-018-9727-7

11. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface. *Doklady Physical Chemistry.* 2015; 461(2):80-83. DOI: 10.1134/S001250161504003X

12. Startsev V.O., Panin S.V., Startsev O.V. Sorption and diffusion of moisture in polymer composite materials with drop-weight impact damage. *Mechanics of Composite Materials*. 2016; 51(6):761-770. DOI: 10.1007/s11029-016-9547-6

13. Startsev V.O., Makhonkov A.Yu., Kotova E.A. Mechanical property and moisture resistance of PCMs with damage. *Aviation materials and technologies*. 2015; S1:49-55.

14. Startsev V.O., Makhonkov A.Yu., Panin S.V., Startsev O.V. Compression failure and moisture transfer in polymeric composite materials with mechanical damage. *All materials. Handbook.* 2016; 7:2-11.

15. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Osokin V.M., Tretyakov A.A., Pisarev P.V. Manufacturing defects in composite flanges: modelling and analysis of influence on static strength. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnical University. Mechanics.* 2016; 2:5-21. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.01 (rus.).

16. Ekelchik V.S., Konovalova L.V., Ryabov V.M. Calculation of temperature stresses in viscoelastic bodies with uniform cooling using the Laplace transform. *Mechanics of composite materials.* 1993; 5(25):692-696.

17. Perepechko I.I., Danilov V.A., Nizhegorodov V.V., Maksimov A.V. Structural heterogeneity of epoxy binder in unidirectional fiberglass plastics. *Mechanics of composite materials*. 2016; 4(29):435-439.

18. Boldyreva A.A., Yarunicheva Y.A., Dernakova A.V., Ivashov I.I. The strength of the polymer composite (fiberglass) with interlaminar shear. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 2(62):42-50. DOI: 10.5862/MCE.62.5 (rus.).

19. Kablov E.N. Innovative development of FSUE "VIAM" State Research Center of the Russian Federation on the implementation of the "Strategic directions of development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030". *Aviation materials and technologies*. 2015; 1(34):3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33 (rus.).

20. Zhang B.M., Li J., Li X. Optimum mix ratio of hybrid fiber reinforced polymer composites and their researching progress. *Cailiao Gongcheng*. 2014; 7:107-112. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.07.019

21. Dul'nev A.I., Neklyudova E.A. Experimental and computational blast resistance assessment of fiberglass samples. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics.* 2017; 47:51-62. DOI: 10.17223/19988621/47/6 (rus.).

22. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the impact of climatic effects on the properties of fiberglass brand VPS-53K. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017; 19(4):220-228. (rus.).

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 12, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 12, 2018

Received October 13, 2018
Adopted in a modified form on November 4, 2018
Approved for publication November 30, 2018

About the authors: **Gleb V. Martynov** — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, martynov-gleb@rambler.ru;

Daria E. Monastyreva — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, 02dm12@rambler.ru.

Elena A. Morina — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, lenusik_ya_ne@mail.ru;

Aleksey I. Makarov — undergraduate student, **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**, 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, almak17@yandex.ru.