Болтовые соединения композиционных материалов в условиях климатического старения

Г.В. Мартынов, Д.Е. Монастырева, А.И. Макаров, Е.А. Морина,
З.С. Дауров, Р.С. Тихонов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

АННОТАЦИЯ

Введение: стеклопластик — композит, который нашел широкое применение в строительстве благодаря своим уникальным свойствам. Один из способов соединения конструкций из композитов — болтовой — отличается своей устойчивостью и технологичностью. В силу относительной новизны материала отсутствует обширная база опытных данных, и соответствующие коэффициенты надежности становится невозможно определить. Данную проблему можно решить при помощи климатических ускоренных испытаний, которые заменят многолетние наблюдения за конструкциями и позволят проводить точные расчеты при проектировании уже сейчас.

Материалы и методы: испытанию подвергались образцы из конструкционного стеклопластика профильного пул-трузионного строительного (СППС), выпускаемого НПП «АпАТЭК» (г. Москва), представляющего собой конструкционный полимерный композиционный материал. Образцы изготовлены из одной партии швеллера 388 × 120 × 10/12 (СППС-340). Методика заключается в последовательном циклическом воздействии на испытываемые образцы искусственно создаваемого комплекса климатических факторов: повышенной температуры и влажности воздуха, отрицательной температуры, перепадов температуры, и определении изменения свойств материала при указанных воздействиях по основным показателям или показателю, ответственному за работоспособность материала.

Результаты: полученные данные обработаны, характер изменения прочностных характеристик со временем наглядно представлен в графическом виде. С применением аппроксимирующих зависимостей были вычислены коэффициенты снижения прочности болтового соединения от термовлажностного воздействия через 100 лет.

Выводы: не выявлено значимого влияния воздействия ультрафиолета на прочность болтовых соединений. Через 100 лет эксплуатации прочность болтового соединения от термовлажностного воздействия снизится не более чем в 1,5 раза. Можно рекомендовать ввести изменения в нормативные документы, в том числе снизить коэффициент надежности, учитывающий эксплуатационное старение стеклопластика K_2 с 1,2 до 1,13 в СТО «Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: болтовые соединения, климатическое старение, стеклопластик, усилие сдвига, эксплуатация, термовлажностная обработка, разрушающие напряжения, прогнозирование, композиты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Макаров А.И., Морина Е.А., Дауров З.С., Тихонов Р.С. Болтовые соединения композиционных материалов в условиях климатического старения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 7. С. 852–861. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.852-861

Bolt attachments of composite materials under conditions of climatic ageing

Gleb V. Martynov, Daria E. Monastireva, Aleksey I. Makarov,
Elena A. Morina, Zaur S. Daurov, Roman S. Tikhonov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU);
29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: the glass-fibre reinforced plastic (GFRP) is a composite material that found wide application in construction due to its unique properties. One of the techniques of joining composite units is a bolt attachment that is distinguished by its stability and manufacturability. Owing to relative novelty of the material, there is no comprehensive experimental database and it is impossible to define the corresponding reliability coefficients. The given problem can be solved by means of accelerated climatic tests, which will replace multi-year observation over the installations and will allow conducting precise calculations during design work right nowadays.

Materials and methods: the climatic tests were conducted over samples fabricated from polymeric structural pultrusion profile GFRP for construction purposes produced by Research-and-Production Enterprise ApATeCh (Moscow). The samples were fabricated from a single batch of U-channel 388 × 120 × 10/12 (SPPS-340). The test method consists in sequential cyclic exposure of artificially created system of climatic factors (elevated air temperature and humidity, negative temperature, temperature gradients) to the tested samples and determination of material property variations under the described impacts in the main indicators or the indicator responsible for workability of the material.

Results: the obtained data were processed and the strength-time variation dependences were presented in graphic form. Using approximating dependences, the strength reduction coefficients of the bolt attachment were calculated for 100-year thermomoist exposure.

Conclusions: any significant influence of ultraviolet exposure to strength of the bolt attachments was not revealed. 100-year thermomoist exposure will reduce the bolt attachment strength by not more than one third. One can recommend to introduce revisions in normative documents including reduction of reliability coefficient K_2 , allowing for GFRP maintenance ageing, from 1.2 to 1.13 in company standard "Road and construction structures from composite materials".

KEYWORDS: bolt attachment, climatic ageing, glass-fibre reinforced plastic, shear force, maintenance, thermomoist treatment, rupture stress, forecast, composite

FOR CITATION: Martynov G.V., Monastyreva D.E., Makarov A.I., Morina E.A., Daurov Z.S., Tikhonov R.S. Bolt attachments of composite materials under conditions of climatic ageing. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):852-861. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.852-861

ВВЕДЕНИЕ

Композиты по праву можно назвать материалом будущего. Представляя собой пластичную матрицу, заполненную прочным и жестким наполнителем, они позволяют получить уникальные комбинации требуемых характеристик, превышают параметры классических материалов и сплавов. Одним из таких материалов является стеклопластик профильный пултрузионный строительный (СППС). Стеклопластик широко распространен в строительной отрасли благодаря прочностным характеристикам и стойкости к агрессивной среде [1–4].

Одна из сфер применения стеклопластика — мостостроение. К изучению материалов подталкивает не только здравый смысл, но и, к сожалению, многочисленные трагические ситуации. Из-за ошибок при проектировании и неправильной эксплуатации ежегодно разрушаются мостовые конструкции. Только в России за 2018 г. стихией было разрушено более десятка мостов, а одна из наиболее резонансных трагедий в Генуе, вызванная недостаточным техническим обслуживанием, унесла жизни 35 человек. Возможно, при должном уровне проводимых исследований, в будущем удастся избежать подобных катастроф [5–8].

Методы соединения конструкций из композитных материалов подразделяют на две группы — адгезионные и механические. Несмотря на преимущества клеевого способа болтовые соединения остаются востребованными при конструировании мостовых конструкций. Грамотный расчет болтовых узлов является особо важным и ответственным в силу конструктивных особенностей. Из-за необходимости просверливать отверстия в элементах для установки болтов нарушается целостность

материала и как следствие возникают зоны повышенной концентрации напряжений, опасные для всего сооружения [9–12]. Основными доводами для применения данного вида соединения служат его технологичность, низкая стоимость и устойчивость к воздействию окружающей среды [13, 14]. Однако последнее утверждение требует дополнительного обоснования. Стеклопластик — относительно новый материал и проверить его эксплуатационные свойства в течение десятилетий не представлялось возможным. Для решения данной проблемы разработаны методы ускоренных климатических испытаний. Натурные многолетние испытания элементов конструкций заменяет обработка в термовлажностных камерах общей длительностью не более нескольких месяцев [15–18].

Множество работ посвящено теоретическим аспектам проектирования болтовых соединений конструкций, напряженно-деформированному состоянию в узлах соединений. Научный коллектив во главе с М.В. Арискиным представил метод расчета болтовых соединений в условиях повышенной сейсмической активности. При помощи созданной расчетной модели и вычислительных комплексов были определены напряжения в конструкциях и даны рекомендации по применению болтов [19]. Другая статья коллектива из НГТУ посвящена проектированию групповых болтовых соединений. Основываясь на базовых положениях и принципах строительной механики, авторы предложили универсальную методику для расчета болтовых соединений любой сложности [20].

Таким образом, вопросам прочности болтовых соединений композитов посвящена значительная база научных исследований, в то время как сфера климатических испытаний остается малоизученной.

Преимуществом климатических испытаний данных соединений является возможность определения срока службы изделия, а также установка влияния внешних условий, которые будут воздействовать на соединения во время эксплуатации. Главный недостаток таких испытаний — неточное соответствие условий, создаваемых в климатической камере, реальным условиям эксплуатации, поскольку они носят вероятностный характер. Наиболее надежных результатов можно достигнуть, проводя климатические испытания согласно нормативным документам, как это было сделано в настоящем исследовании, потому что именно они предполагают наличие запаса условий проведения испытаний относительно реальных условий, воздействующих на объект во время службы.

Цель данной статьи заключается в выявлении эффективности применения болтовых соединений композитных материалов с точки зрения изменения прочностных свойств материала во времени.

В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Провести климатические испытания образцов из стеклопластика СППС.
2. Провести испытания образцов из стеклопластика СППС на сдвиг.
3. Исходя из полученных данных, вычислить коэффициенты снижения прочности.
4. Произвести сравнительный анализ полученных результатов и сформулировать выводы об

эффективности применения болтовых соединений в долгосрочной перспективе.

МЕТОДИКА

Испытанию 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. Эскиз образца представлен на рис. 1. Образцы изготовлены из одной партии швеллера 388 × 120 × 10/12 (СППС-340). Вырезка образцов осуществлялась так, чтобы длинная сторона образца лежала в продольном направлении профиля. Испытания проводились в НИИ Мостов. Количество образцов, испытываемых на каждом этапе, приведено в табл. 1.

В процессе испытаний записывалась диаграмма деформирования «нагрузка – ход поршня силового цилиндра», на основании которой определялись вид разрушения и номинальные предельные контактные напряжения смятия и скалывания при разрушении образца:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{P_c}{t \cdot d}; \quad (1)$$

$$\tau_{\text{ск}} = \frac{P_c}{2 \cdot t \cdot C}, \quad (2)$$

Рис. 1. Эскиз образца из конструкционного стеклопластика СППС

Fig. 1. Sketch of a sample of SPPS structural GFRP

Табл. 1. Количество образцов на каждом этапе испытаний

Table 1. The number of samples at each stage of testing

Базовые образцы, 0 цикл / Basic samples, 0th cycle	Режим 1 (без ультрафиолета) / Mode 1 (without UV)					Режим 2 (с ультрафиолетом) / Mode 2 (with UV)				
	1-й цикл / 1st cycle	2-й цикл / 2nd cycle	3-й цикл / 3rd cycle	4-й цикл / 4th cycle	5-й цикл / 5th cycle	1-й цикл / 1st cycle	2-й цикл / 2nd cycle	3-й цикл / 3rd cycle	4-й цикл / 4th cycle	5-й цикл / 5th cycle
5	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2

где P_c — разрушающая нагрузка; t — толщина образца; d — диаметр болта; C — расстояние от оси отверстия до торцевой кромки образца.

Ускоренные испытания образцов на стойкость к воздействию эксплуатационных климатических факторов проводили циклически по методике, разработанной в соответствии с требованиями ГОСТ 9.707-81, метод 2 по двум режимам.

Методика заключается в последовательном циклическом воздействии на испытуемые образцы искусственно создаваемого комплекса климатических факторов: повышенной температуры и влажности

воздуха, отрицательной температуры, перепадов температуры, и определении изменения свойств материала при указанных воздействиях по основным показателям или показателю, ответственному за работоспособность материала.

Первый режим одного цикла ускоренных испытаний, имитирующих годовичную эксплуатацию, приведен в табл. 2.

Второй режим одного цикла ускоренных испытаний, имитирующих годовичную эксплуатацию с учетом воздействия УФ-излучения, приведен в табл. 3.

Табл. 2. Режим одного цикла ускоренных испытаний

Table 2. Accelerated test single-cycle mode

Имитирующее воздействие / Simulating exposure	Продолжительность воздействия, ч / Duration of exposure, h	Относительная влажность воздуха, % / Relative air humidity, %	Температура, °C / Temperature, °C	Оборудование / Equipment
Воздействие положительной температуры и влажности воздуха / Exposure of positive air temperature and humidity	330	97±3	60	Камера тепла и влаги / Heat and moisture chamber
Воздействие отрицательной температуры / Exposure of negative temperature	6	Не регламентируется / Not regulated	–60	Камера тепла и холода / Heat and cold chamber

Табл. 3. Режим одного цикла ускоренных испытаний с учетом воздействия УФ-излучения

Table 3. Accelerated test single-cycle mode allowing for UV exposure

Имитирующее воздействие / Simulating exposure	Продолжительность воздействия, ч / Duration of exposure, h	Относительная влажность воздуха, % / Relative air humidity, %	Температура, °C / Temperature, °C	Поверхностная плотность УФ излучения (280–400 Нм), Вт/м² / Surface UV radiation density (280 to 400 Nm), W/m²	Интегральная плотность теплового потока, Вт/м² / Integral 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 of positive air temperature and humidity	274	97±3	60	—	—	Камера тепла и влаги / Heat and moisture chamber
Воздействие отрицательной температуры / Exposure of negative temperature	6	Не регламентируется / Not regulated	–60	—	—	Камера тепла и холода / Heat and cold chamber

Испытания по I режиму проводили следующим образом.

Образцы помещали в камеру тепла и влаги и выдерживали при температуре 60 °С и влажности 97±3 % в течение 330 ч.

Затем из камеры тепла и влаги образцы переносили в камеру тепла и холода, выдерживали в течение 2 ч при температуре 20 °С, и начинали охлаждение от 20 до –20 °С со скоростью 1 °/мин, выдерживали при –20 °С в течение 30 мин, охлаждали до –60 °С со скоростью 1 °/мин и выдерживали при температуре –60 °С в течение 6 ч. Затем ступенчато повышали температуру до 60 °С со скоростью 1 °/мин и выдержкой при 20 °С в течение 30 мин. При температуре 60 °С выдерживали 30 мин. Затем цикл повторяли.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 342,8 ч. Общая продолжительность ускоренных испытаний составила 1714 ч (5 циклов).

Испытания по II режиму проводили следующим образом.

Образцы помещали в камеру солнечной радиации и выдерживали при температуре 60 °С в течение 56 ч.

Затем из камеры солнечной радиации образцы переносили в камеру тепла и влаги и выдерживали при температуре 60 °С и влажности 97±3 % в течение 274 ч.

Далее из камеры тепла и влаги образцы переносили в камеру тепла и холода, выдерживали в течение 2 ч при температуре 20 °С, и начинали охлаждение от 20 °С до –20 °С со скоростью 1 °/мин, выдерживали при –20 °С в течение 30 мин, охлаждали до –60 °С со скоростью 1 °/мин и выдерживали при температуре –60 °С в течение 6 ч. Затем ступенчато повышали температуру до 60 °С со скоростью 1 °/мин и выдержкой при 20 °С в течение 30 мин. При температуре 60 °С выдерживали 30 мин.

Продолжительность одного цикла испытаний, имитирующих один год эксплуатации изделия, составляет 342,8 ч. Общая продолжительность ускоренных испытаний по II режиму составила 1714 ч (5 циклов).

В процессе испытаний (после каждого цикла) проводили съем образцов, визуально оценивали внешний вид образцов на наличие дефектов (образование пузырей, растрескивание).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид образцов в ходе климатической обработки незначительно изменился за счет изменения цвета образцов. При этом следует отметить, что более интенсивное изменение цвета (пожелтение) наблюдается на образцах, испытываемых по

II режиму, включающему воздействие ультрафиолетового излучения. На поверхности всех образцов после испытаний отсутствуют какие-либо дефекты (трещины, пузыри). Результаты испытаний приведены в табл. 4.

В соответствии с рекомендациями п. 2.6.1 ГОСТ 9.707-81 экспериментальные точки обработки методом наименьших квадратов с использованием полинома второго порядка (приложение 6 ГОСТ 9.707-81 [2]):

$$X(\tau) = A + \frac{B}{(\tau+1)} + \frac{C}{(\tau+1)^2}, \quad (3)$$

где $X(\tau)$ контролируемый параметр; A , B , C — определяемые по экспериментальным данным константы; τ — время.

Так как при испытаниях мода разрушения образцов изменялась как от серии к серии, так и внутри серии, принимаем, что предельные напряжения всех полученных мод близки и в дальнейшей обработке используем напряжения скалывания.

На рис. 2 показаны зависимости прочности одноболтового соединения от времени эксплуатации для двух типов климатического воздействия с и без влияния ультрафиолета. Значения констант в формуле (3) приведены в табл. 5. Основной причиной различия аппроксимационных кривых являются высокие значения прочности соединений, подвергнутых воздействию УФ, на первых двух съемах. На последующих съемах прочность образцов, состаренных по обеим программам, практически одинакова. В табл. 6 продемонстрированы средние значения, средние квадратические отклонения (СКО) и коэффициенты вариации для каждого съема, из которого видно, что для объединенной выборки коэффициент вариации практически не изменяется от времени старения. Кроме того, экстраполяция снижения прочности на 100 лет — крайний правый столбец в табл. 5 для различных программ старения и объединенной выборки практически совпадают. В табл. 5 коэффициент снижения прочности равен отношению прочности образцов в состоянии поставки к прогнозируемой прочности через 100 лет. Таким образом, по полученным данным не выявлено значимого влияния воздействия УФ на прочность болтовых соединений, поэтому в дальнейшем будем рассматривать объединенную выборку.

В соответствии с данными табл. 5 через 100 лет эксплуатации прочность болтового соединения от термовлажностного воздействия снизится в 1,5 раза. В соответствии с СТО «Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов» для прочности болтовых соединений в продольном направлении для учета термовлажностных факторов предусмотрено два коэффициента надежности:

Табл. 4. Результаты испытаний одноболтовых соединений на прочность

Table 4. Strength test results of single-bolt attachments

Номер образца / Sample number	t , мм / t , mm	$\varnothing_{\text{отв.}}$, мм / hole diameter, mm	C , мм / C , mm	P_c , кгс / P_c , kgf	$t_{\text{ср}}$, кгс/мм ² / t_{SH} , kgf/mm ²	$\sigma_{\text{ср}}$, кгс/мм ² / σ_{SH} , kgf/mm ²	Вид разрушения / Rupture type
1п / 1 _R	10,49	12	38,25	3448	4,30	27,4	ск / SH
2п / 2 _R	10,24	12	38,25	3516	4,49	28,6	ск / SH
3п / 3 _R	10,20	12	38,25	3772	4,83	30,8	ск / SH
4п / 4 _R	10,64	12	38,25	3968	4,87	31,1	ск / SH
5п / 5 _R	10,36	12	38,25	3787	4,78	30,5	ск / SH
5.1	10,13	12	38,25	3468	4,48	28,5	см / CR
5.2	10,58	12	38,25	3639	4,50	28,7	см / CR
5.3	10,30	12	38,25	3242	4,11	26,2	ск / SH
5.16y / 5.16 _{UV}	10,35	12	38,25	3631	4,59	29,2	ск / SH
5.17y / 5.17 _{UV}	10,20	12	38,25	3620	4,64	29,6	ск / SH
5.4	10,35	12	38,25	2967	3,75	23,9	см-ск / CR-SH
5.5	10,37	12	38,25	3368	4,25	27,1	см-ск / CR-SH
5.6	10,71	12	38,25	3282	4,01	25,5	см-ск / CR-SH
5.18y / 5.18 _{UV}	10,57	12	38,25	3480	4,30	27,4	см-ск / CR-SH
5.19y / 5.19 _{UV}	10,33	12	38,25	3331	4,22	26,9	см-ск / CR-SH
5.7	10,55	12	38,25	2988	3,70	23,6	см/см-ск / CR/CR-SH
5.8	10,49	12	38,35	3148	3,91	25,0	см/см-ск / CR/CR-SH
5.9	10,50	12	38,50	2865	3,54	22,7	см-ск / CR-SH
5.20y / 5.20 _{UV}	10,59	12	38,45	2958	3,63	23,3	см / CR
5.21y / 5.21 _{UV}	10,71	12	38,55	3518	4,26	27,4	см-ск / CR-SH
5.10	10,41	12	38,30	2607	3,27	20,9	см/см-ск / CR/CR-SH
5.11	10,70	12	38,45	3047	3,70	23,7	см/см-ск / CR/CR-SH
5.12	10,55	12	38,30	3352	4,15	26,5	см/см-ск / CR/CR-SH
5.22y / 5.22 _{UV}	10,63	12	38,50	3118	3,81	24,4	см/см-ск / CR/CR-SH
5.23y / 5.23 _{UV}	10,62	12	38,15	2910	3,59	22,8	см / CR
5.13	10,30	12	38,30	2839	3,60	23,0	см/см-ск / CR/CR-SH
5.14	10,41	12	38,50	3069	3,83	24,6	см/см-ск / CR/CR-SH
5.15	10,65	12	38,25	3139	3,85	24,6	см/см-ск / CR/CR-SH
5.24y / 5.24 _{UV}	10,38	12	38,40	3129	3,93	25,1	см/см-ск / CR/CR-SH
5.25y / 5.25 _{UV}	10,57	12	38,30	2841	3,51	22,4	см/см-ск / CR/CR-SH

Примечание: «п» — образцы до климатических испытаний, в состоянии поставки; «у» — образцы после воздействия климатических факторов, включая ультрафиолетовое излучение; «ск» — мода разрушения скалывание (продольные трещины от краев отверстий, максимально удаленных от оси симметрии образца); «см» — мода разрушения смятие под болтом; «см-ск» — смешанная мода разрушения смятие со сдвигом; «/» — различные моды разрушения для двух отверстий в образце.

Notes: “R” is samples before climatic tests, as received; “UV” is samples after exposure to climatic factors including ultraviolet radiation; “SH” is rupture mode, shear (longitudinal cracks running from edges of holes which are maximally distant from sample symmetry axis); “CR” is rupture mode, crushing under bolt; “CR-SH” is mixed rupture mode, crushing with shear; “/” is various rupture modes for two holes in sample.

Рис. 2. Зависимости прочности одноболтового соединения от времени эксплуатации для двух типов климатического воздействия

Fig. 2. Strength dependences of single-bolt joint on maintenance time for two climatic exposure types

Табл. 5. Значения констант в формуле $X(\tau)$, коэффициент снижения прочности за 100 лет

Table 5. The values of constants in formula $X(\tau)$ and strength reduction coefficient for 100 years

Выборка / Sample	Константы в формуле (3), $X(\tau)$, кгс/мм ² / Constants in formula (3), $X(\tau)$, kgf/mm ²			Коэффициент снижения прочности за 100 лет / Strength reduction coefficient for 100 years
	A	B	C	
Общая выборка / Total sample	3,08	3,82	-2,24	1,50
Без УФ / Without UV	3,20	2,94	-1,47	1,44
С УФ / UV	2,89	5,15	-3,38	1,59

Табл. 6. Средние значения, СКО и коэффициенты вариации для каждого съема

Table 6. Average values, standard deviations (SD) and variation coefficients for each removal

Параметр / Parameter	Без старения / No ageing		1-й цикл / 1st cycle		2-й цикл / 2nd cycle		3-й цикл / 3rd cycle		4-й цикл / 4th cycle		5-й цикл / 5th cycle	
	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$	$\tau_{ск} / \tau_{ш}$	$\sigma_{см} / \sigma_{ш}$
Среднее, кгс/мм ² / Average value, kgf/mm ²	4,65	29,7	4,46	28,5	4,10	26,2	3,81	24,4	3,70	23,7	3,70	23,9
СКО, кгс/мм ² / SD, kgf/mm ²	0,25	1,60	0,21	1,31	0,23	1,46	0,29	1,86	0,32	2,06	0,18	1,17
Коэффициент вариации, % / Variation coefficient, %	5,4	5,4	4,6	4,6	5,6	5,6	7,5	7,6	8,6	8,7	4,8	4,9

K_1 — коэффициент, учитывающий влияние увлажнения на механические характеристики стеклопластика, $K_1 = 1,33$; K_2 — коэффициент, учитывающий старение стеклопластика за время эксплуатации. В случае отсутствия статистических данных принимается равным 1,2 для 100 лет эксплуатации.

Суммарный коэффициент надежности равен $1,33 \cdot 1,2 = 1,6$. Это значение больше полученного 1,5. Таким образом, по результатам исследований можно рекомендовать снизить коэффициент надежности K_2 с 1,2 до 1,13.

Следует отметить, что полученный результат по коэффициенту надежности на термовлажностное воздействие является пессимистическим (в запас) в силу следующих факторов. Используемая аппроксимирующая зависимость (3) характеризуется резким снижением на начальном этапе с переходом к более пологому участку. В настоящее время получены данные для начального и переходного участков, а увеличение количества съемов приведет к добавлению точек на пологом участке. При этом можно прогнозировать меньшее, чем получено, снижение прочности.

Подводя итоги, данное исследование позволит:

- снизить коэффициент надежности, учитывающий старение стеклопластика за время эксплуатации;
- выявить влияние ультрафиолета на прочность болтовых соединений;
- получить относительное изменение прочности болтового соединения через 100 лет эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования были проведены ускоренные испытания образцов на стойкость к воздействию эксплуатационных климатических факторов по методике, разработанной в соответствии с требованиями ГОСТ 9.707-81. Проведено экспериментальное определение зависимости прочности одноболтового соединения элемента из пултрузионного стеклопластика СППС-340 в продольном направлении от влияния термовлажностных факторов, эквивалентных пяти годам эксплуатации. Поставленные задачи исследования выполнены, эффективность применения болтовых соединений в долгосрочной перспективе была оценена, предложены рекомендации по корректировке стандарта организации. Данные были представлены в графическом виде и обработаны методами аппроксимации. Следует отметить основные положения:

1. По полученным данным не выявлено значимого влияния воздействия ультрафиолета на прочность болтовых соединений.

2. Через 100 лет эксплуатации прочность болтового соединения от термовлажностного воздействия снизится не более чем в 1,5 раза.

3. Можно рекомендовать ввести изменения в нормативные документы — в том числе снизить коэффициент надежности, учитывающий эксплуатационное старение стеклопластика K_2 с 1,2 до 1,13 в СТО «Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов А.В., Полилов А.Н. Алгоритм построения рациональных траекторий волокон в произвольно нагруженной композитной пластине // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 5. С. 71–80.

2. Ларионова А.А., Дудченко А.А., Сергеев В.Н. Проектирование узлов механических композитно-металлических соединений // Труды МАИ. 2016. № 90. С. 4.

3. Бондарев А.Б., Югов А.М. Методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 1 (61). С. 60–73.

4. Бирюков А.С., Деменко О.Г., Михаленко Н.А. Влияние жесткости соединительной связи на передачу продольной ударной нагрузки через болтовое соединение тел // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 1 (35). С. 53–63.

5. Солодов Н.В. Прочность и деформативность при смятии в болтовом соединении // Вестник

БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 82–87. DOI: 10.12737/23889

6. Lipińska M., Ura-bińczyk E., Olejnik I., Rosochowski A., Lewandowska M. Microstructure and corrosion behavior of the friction stir welded joints made from ultrafine grained aluminum // Advanced Engineering Materials. 2017. Vol. 19. Issue 7. Pp. 160–167. DOI: 10.1002/adem.201600807

7. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60. Issue 6. Pp. 1022–1026. DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x

8. Reshetnikova E.S., Usatyi D.U., Usataya T.V. Bolts manufacturing technology // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. Pp. 79–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.79

9. Baiburin A.Kh., Semenov K.O. Contribution of clearance holes to semi-rigid effects of bolted joints // IOP Conference Series: Materials Science and Engineer-

ing. 2017. Vol. 262. Pp. 12–73. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012073

10. Семенов К.О., Пикус Г.А., Байбурун А.Х. Начальные деформации болтовых соединений металлоконструкций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. : Строительство и архитектура. 2016. Т. 16. № 2. С. 18–21. DOI: 10.14529/build160203

11. Сергеев К.О., Жуков А.С. Метод контроля ответственных болтовых соединений // Наука и образование в арктическом регионе. 2015. С. 295–300.

12. Солодов Н.В. Прочность и деформативность при смятии в болтовом соединении // Вестник БГТУ. 2017. № 1. С. 82–87. DOI: 10.12737/23889

13. Li H.S., Gu R.J., Zhao X. Global sensitivity analysis of load distribution and displacement in multi-bolt composite joints // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 116. Pp. 200–210. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.058

14. Nerilli F., Vairo G. Progressive damage in composite bolted joints via a computational micromechanical approach // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 111. Pp. 357–371. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.056

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

16. 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.

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

18. Karabinesh S.S., Annenkov O.V. The strength property of welding, glue and gluwelding joints under different types of loading // Scientific papers SWorld. 2016. No. 11. Pp. 185–190. DOI: 10.21893/2410-6720-2016-44-1-028

19. Арискин М.В., Гарькин И.Н., Назаров О.М. Метод расчета болтовых соединений в условиях повышенной сейсмической активности // Дневник науки. 2017. № 10 (10). С. 12.

20. Балеев Б.Ф. Расчет группового болтового соединения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2 (117). С. 88–93.

Поступила в редакцию 11 мая 2019 г.

Принята в доработанном виде 7 июня 2019 г.

Одобрена для публикации 28 июня 2019 г.

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

Дарья Евгеньевна Монастырева — студентка; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; 12dm02@rambler.ru;

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

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

Заур Сосланович Дауров — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; zaur25k@gmail.com;

Роман Сергеевич Тихонов — студент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; tikhonovrs96@mail.ru.

REFERENCES

1. Malakhov A.V., Polilov A.N. Algorithm for constructing rational fiber trajectories in an arbitrarily loaded composite plate. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2017; 5:71-80. (rus.).

2. Larionova A.A., Dudchenko A.A., Sergeyev V.N. Designing of units of mechanical composite-metal compounds. *Trudy MAI*. 2016; 90:4. (rus.).

3. Bondarev A.B., Yugov A.M. Methods of calculating the accuracy of long-span hinge-rod metal coatings. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 1(61):60-73. (rus.).

4. Biryukov A.S., Demenko O.G., Mikhailenko N.A. Influence of the stiffness of the coupling connection on the transfer of longitudinal shock load

through the bolted connection of bodies. *Bulletin NPO named after S.A. Lavochkin*. 2017; 1(35):53-63. (rus.).

5. Solodov N.V. Durability and deformability at smacking in bolted connection. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017; 1:82-87. DOI: 10.12737/23889 (rus.).

6. Lipitska M., Urabicz E., Olejnik I., Rosochowski A., Lewandowska M. Microstructure and corrosion behavior of the friction stir welded joints made from ultrafine grained aluminum. *Advanced Engineering Materials*. 2017; 19(7):160-167. DOI: 10.1002/adem.201600807

7. Eliseev A.A., Fortuna S.V., Kalashnikova T.A., Chumaevskii A.V., Kolubaev E.A. Structural phase evolution in ultrasonic-assisted friction stir welded 2195 aluminum alloy joints. *Russian Physics Journal*. 2017; 60(6):1022-1026. DOI: 10.1007/s11182-017-1172-x

8. Reshetnikova E.S., Usatyi D.U., Usataya T.V. Bolts manufacturing technology. *Solid State Phenomena*. 2017; 265:79-85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.79

9. Baiburin A.Kh., Semenov K.O. Contribution of clearance holes to semi-rigid effects of bolted joints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 262:12-73. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012073

10. Semenov K.O., Pikus G.A., Bayburin A.Kh. Initial deformations of bolted connections of metal structures. *Bulletin of the South Ural State University Series Construction Engineering and Architecture*. 2016; 16(2):18-21. DOI: 10.14529/build160203 (rus.).

11. Sergeyev K.O., Zhukov A.S. Control method for responsible bolted connections. *Science and education in the arctic region*. 2015; 295-300. (rus.).

12. Solodov N.V. Strength and deformability in the course of a crushing in a bolted connection. *Bulletin of BSTU*. 2017; 1:82-87. DOI: 10.12737/23889 (rus.).

13. Li H.S., Gu R.J., Zhao X. Global sensitivity analysis of load distribution and displacement in multi-bolt composite joints. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 116:200-210. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.058

14. Nerilli F., Vairo G. Progressive damage in composite bolted joints via a computational micro-mechanical approach. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 111:357-371. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.056

15. 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, Series D*. 2017; 10(4):313-317. DOI: 10.1134/S1995421217040141

16. 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.

17. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviation Materials and Technologies*. 2015; 4:38-52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52 (rus.).

18. Karabinesh S.S., Annenkov O.V. The strength property of welding, glue and gluwelding joints under different types of loading. *Scientific papers SWorld*. 2016; 11:185-190. DOI: 10.21893/2410-6720-2016-44-1-028

19. Ariskin M.V., Garkin I.N., Nazarov O.M. The method of calculating bolted connections in conditions of increased seismic activity. *Science Diary*. 2017; 10(10):12. (rus.).

20. Baleev B.F. Calculation of group bolting. *Works of NSTU named after R.E. Alekseeva*. 2017; 2(117):88-93. (rus.).

Received May 11, 2019

Adopted in a modified form June 7, 2019

Approved for publication June 28, 2019

B I O N O T E S : **Gleb V. Martynov** — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; martynovgleb@rambler.ru;

Daria E. Monastyreva — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; 12dm02@rambler.ru;

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

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

Zaur S. Daurov — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; zaur25k@gmail.com;

Roman S. Tikhonov — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; tikhonovrs96@mail.ru.