

Научная статья

УДК 620.174:678.01; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-93-101

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

✉ Андрюшкин Александр Юрьевич;

Изюмова Елизавета Андреевна.

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия.

Кадочникова Елена Николаевна.

Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева,
Санкт-Петербург, Россия

✉ Sascha1a@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования по оценке деформационной теплостойкости однонаправлено армированных стеклопластиковых образцов с учетом увеличенного напряжения изгиба. Из-за высоких эксплуатационных и механических свойств полимерные композиты нашли широкое применение при изготовлении ответственных конструкций. Деформационная теплостойкость обуславливает надежность и безопасность полимерных композитных конструкций. На базе метода Мартенса предложен метод оценки деформационной теплостойкости композитных образцов с непрерывным армированием при увеличенном напряжении изгиба образца. По результатам испытаний построены термомеханические кривые и оценена деформационная теплостойкость стеклопластиковых образцов с однонаправленной непрерывной арматурой при повышенных напряжениях изгиба 5, 20, 35, 50, 65 МПа. Испытания стеклопластиковых образцов проводились в интервале температур 20÷200 °С. По перегибам на термомеханических кривых определены значения деформационной теплостойкости однонаправлено армированных стеклопластиковых образцов в интервале 160÷120 °С. Получены полиномиальные зависимости деформации от температуры при различных напряжениях изгиба однонаправлено армированных стеклопластиковых образцов. Показано, что допускаемую деформационную теплоустойчивость полимерной композитной конструкции необходимо определять с учетом действующих в ней напряжений.

Ключевые слова: деформационная теплостойкость, метод Мартенса, полимерная композитная конструкция, армированный стеклопластик, испытания на теплостойкость

Для цитирования: Андрюшкин А.Ю., Изюмова Е.А., Кадочникова Е.Н. Экспериментальное определение деформационной теплостойкости стеклопластиковых образцов композитных конструкций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 93–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-93-101.

Scientific article

ASSESSMENT OF THE DEFORMATION HEAT RESISTANCE OF FIBERGLASS SAMPLES OF COMPOSITE STRUCTURES

✉ Andryushkin Aleksander Yu.;

Izyumova Elizaveta A.

Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia.

Kadochnikova Elena N.

Military educational institution of logistics named after general of the army

A.V. Khrulyov, Saint-Petersburg, Russia

✉ Sascha1a@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study assessing the deformation heat resistance of unidirectionally reinforced fiberglass samples taking into account increased bending stress. Due to their high performance and mechanical properties, polymer composites are widely used in the manufacture of critical structures. Deformation heat resistance determines the reliability and safety of polymer composite structures. Based on the Martens method, a method for assessing the deformation heat resistance of composite samples with continuous reinforcement at increased bending stress of the sample is proposed. Based on the test results, thermomechanical curves were constructed and the deformation heat resistance of fiberglass samples with unidirectional continuous reinforcement was assessed at increased bending stresses of 5, 20, 35, 50, 65 MPa. Tests of fiberglass samples were carried out in the temperature range 20÷200 °C. Based on the inflections on the thermomechanical curves, the values of the deformation heat resistance of unidirectionally reinforced fiberglass samples in the range of 160÷120 °C were determined. Polynomial dependences of deformation on temperature at various bending stresses of unidirectionally reinforced fiberglass samples were obtained. It is shown that the permissible deformation heat resistance of a polymer composite structure must be determined taking into account the stresses acting in it.

Keywords: deformation heat resistance, Martens method, polymer composite structure, reinforced fiberglass; heat resistance tests

For citation: Andryushkin A.Yu., Izyumova E.A., Kadochnikova E.N. Assessment of the deformation heat resistance of fiberglass samples of composite structures // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 93–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-93-101.

Введение

В настоящее время широкое применение для изготовления ответственных конструкций нашли полимерные композиты, которые по сравнению с металлическими материалами обладают стойкостью к коррозии и агрессивному воздействию различных сред, высокой удельной прочностью и удельной жесткостью. Поэтому оценка риска и надежности ответственных композитных конструкций в чрезвычайных ситуациях при аварийных воздействиях природного и техногенного характера является актуальной проблемой. Тенденция внедрения композитов связана с повышением требований к надежности и безопасности конструкций в условиях термомеханических воздействий. Одним из факторов, сдерживающих внедрение полимерных композитных конструкций, является их низкая деформационная теплостойкость – устойчивость нагруженных полимерных композитных конструкций при повышенных температурах. Пониженная устойчивость полимерного композита к высоким температурам вызывает потерю жесткости (ползучесть), приводящую к неравномерному распределению нагрузки между армирующими элементами, к значительным деформациям и короблениям элементов конструкции.

Теоретическая оценка деформационной теплостойкости полимерных композитов затруднена, так как их физико-механические свойства зависят не только от свойств компонентов (матрицы и наполнителя) при определенной температуре, а также от структуры наполнения, а именно геометрии, плотности укладки и объемного содержания армирующих элементов. Существенное влияние на свойства полимерного композита оказывает технология его формирования. Поэтому теплостойкость конкретного полимерного композита определяют экспериментально на образцах, подвергающихся нагружению при повышенной температуре. По результатам испытаний получают термомеханические кривые – зависимость деформации от температуры. Экспериментальные данные испытаний образцов на теплостойкость учитывают при расчете несущей способности композитной конструкции и ее безопасности, корректируя допускаемые напряжения [1–6].

Часто для оценки деформационной теплостойкости используют метод Мартенса, при котором термомеханическому нагружению подвергают неармированные полимерные образцы. Равномерно нагреваемый в интервале температур от 20 до 200 °С и изгибаемый с напряжением 5,0 МПа неармированный полимерный образец существенно деформируется. Эта деформация хорошо фиксируется прибором, реализующим метод Мартенса, и составляет несколько миллиметров. При достижении деформацией величины 6,0 мм фиксируют значение температуры t_m , соответствующей деформационной теплостойкости по Мартенсу.

Выдерживающие значительные нагрузки конструкции изготавливают из армированных (наполненных) композитов, при этом наполнитель представляет собой непрерывную арматуру в виде волокон, нитей, жгутов, тканей, сеток. Непрерывная арматура значительно повышает прочность полимерного композита, поэтому для достижения существенной деформации образца необходимо изменить условия испытания, увеличив изгибающее напряжение, то есть значительно превышающее значение 5,0 МПа. Поэтому актуальна задача экспериментального исследования по методу Мартенса деформационных свойств непрерывно армированных композитных образцов при повышенном напряжении изгиба [7–20].

Целью исследования является экспериментальное исследование деформационной теплостойкости стеклопластиковых образцов с учетом увеличенного напряжения изгиба.

Задачи исследования:

1. На базе метода Мартенса предложить экспериментальный метод определения деформационной теплостойкости композитных образцов с непрерывным армированием при увеличенном напряжении изгиба в образце.
2. Экспериментально оценить деформационную теплостойкость стеклопластиковых образцов с учетом увеличенного напряжения изгиба.

Методы исследования

Деформационную теплостойкость полимерного композита оценивают по изменению изгибной жесткости балочного образца при нагревании. Наиболее часто для этого используют метод определения деформационной теплостойкости по Мартенсу (ГОСТ 21341–75 «Пластмассы и эбонит. Метод определения теплостойкости по Мартенсу»), сущность которого заключается в нахождении температуры t_m , при которой нагруженный постоянным изгибающим моментом полимерный образец, нагреваемый с постоянной скоростью, деформируется на заданную величину.

Для определения деформационной теплостойкости были вырезаны образцы в форме брусков с размерами 120×15×10 мм из листа однонаправленно армированного стеклопластика толщиной 10 мм.

Экспериментальная установка для определения деформационной теплостойкости по Мартенсу (рис. 1) состоит из термостата с системой регулирования и измерения температуры. В термостате размещен стеклопластиковый образец, установленный вертикально в нижней и верхней головках зажимно-нагрузочного устройства, оснащенного указателем деформации

и перемещаемым по рейке-рычагу грузом. Груз на рычаге устанавливается так, чтобы в стеклопластиковом образце возникало необходимое изгибающее напряжение. Положение перемещаемого груза на рейке-рычаге – расстояние между центром тяжести перемещаемого груза и продольной осью образца:

$$L_G = \frac{5 \cdot b \cdot s^2}{6 \cdot F_G} - \frac{F_H \cdot L_H + F_A \cdot L_A}{F_G},$$

где F_H – нагрузка, создаваемая верхней зажимной головкой, Н; L_H – расстояние между центром тяжести рейки-рычага с верхней зажимной головкой и продольной осью образца, м; F_A – нагрузка, создаваемая указателем деформации, Н; L_A – расстояние продольной осью указателя и продольной осью образца, м; F_G – нагрузка, создаваемая перемещаемым грузом, м; L_G – расстояние между центром тяжести перемещаемого груза и продольной осью образца, м; b – ширина образца, м; s – толщина образца, м.

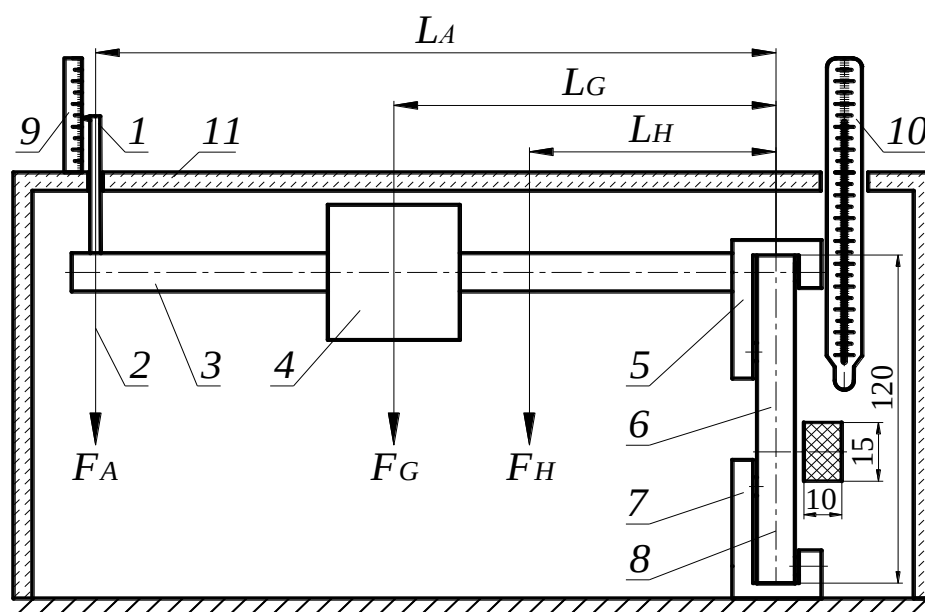


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – указатель деформации; 2 – ось указателя деформации; 3 – рейка-рычаг; 4 – перемещаемый груз; 5 – верхняя зажимная головка; 6 – испытываемый образец; 7 – нижняя зажимная головка; 8 – продольная ось образца; 9 – миллиметровая шкала; 10 – термометр; 11 – термостат; F_H – нагрузка, создаваемая верхней зажимной головкой; L_H – расстояние между центром тяжести рейки-рычага с верхней зажимной головкой и продольной осью образца; F_A – нагрузка, создаваемая указателем деформации; L_A – расстояние продольной осью указателя и продольной осью образца; F_G – нагрузка, создаваемая перемещаемым грузом; L_G – расстояние между центром тяжести перемещаемого груза и продольной осью образца

Для построения термомеханических кривых были проведены испытания стеклопластиковых образцов при изгибе с напряжением 5, 20, 35, 50, 65 МПа, для чего на рейке-рычаге устанавливался более тяжелый груз. Температура начала испытаний составляет 20 °С, далее температура в термостате равномерно повышается со скоростью 50 °С/ч. Деформация нагреваемого стеклопластикового образца под нагрузкой отмечается по миллиметровой шкале с помощью указателя деформации. По результатам испытания образцов строили термомеханическую кривую – зависимость деформации от температуры.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам испытаний стеклопластиковых образцов построены экспериментальные термомеханические кривые (рис. 2).

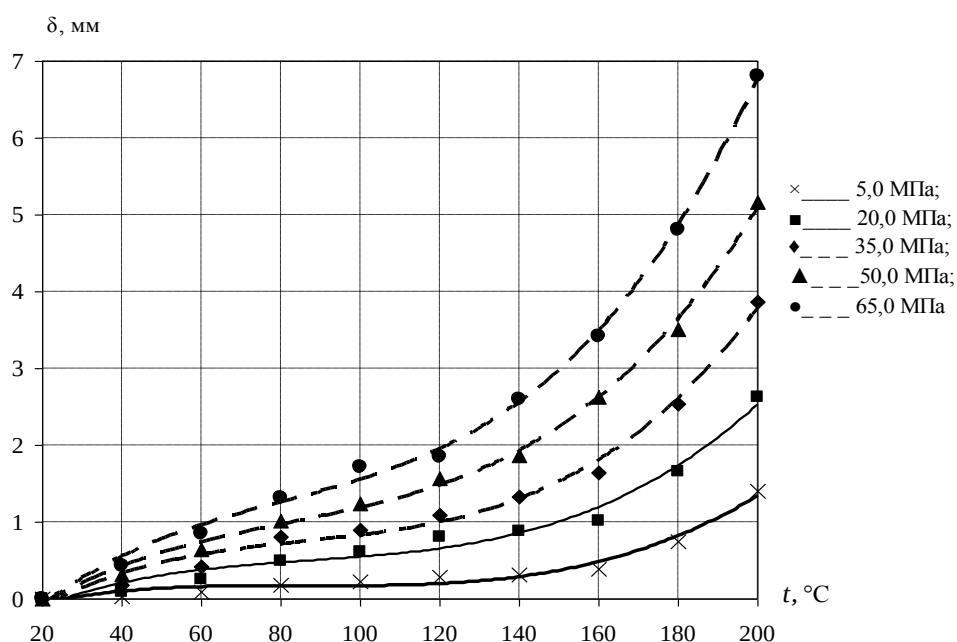


Рис. 2. Экспериментальные термомеханические кривые образцов из однонаправленно армированного стеклопластика, нагруженных при изгибе напряжением 5, 20, 35, 50, 65 МПа: δ – деформация; t – температура

Из анализа термомеханических кривых можно заключить, что деформация сильно зависит от изгибающего напряжения в образце однонаправленно армированного стеклопластика. По перегибу на термомеханической кривой можно определить температуру деформационной теплостойкости t_m (табл.). Чем выше напряжение изгиба в стеклопластиковом образце, тем ярче выражен перегиб термомеханической кривой.

Таблица

Деформационная теплостойкость стеклопластиковых образцов

Напряжения в образце при изгибе, МПа	5,0	20,0	35,0	50,0	65,0
Деформационная теплостойкость, °C	160	150	140	130	120

Перегибы на термомеханических кривых наблюдаются в диапазоне температур 120÷160 °C. С увеличением напряжения изгиба в образцах однонаправленно армированного стеклопластика с 5 до 65 МПа деформационная теплостойкость снижается со 160 до 120 °C. Поэтому допускаемую деформационную теплостойкость полимерной композитной конструкции необходимо назначать с учетом действующих в ней напряжений.

Экспериментальные данные зависимости деформации δ от температуры t при различных напряжениях изгиба образца хорошо аппроксимируются полиномиальными зависимостями (рис. 2):

– напряжение изгиба образца 5,0 МПа:

$$\delta = 8 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0178 \cdot t - 0,3378;$$

– напряжение изгиба образца 20,0 МПа:

$$\delta = 1 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,03 \cdot t - 0,5869;$$

– напряжение изгиба образца 35,0 МПа:

$$\delta = 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0429 \cdot t - 0,813;$$

– напряжение изгиба образца 50,0 МПа:

$$\delta = 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0458 \cdot t - 0,841;$$

– напряжение изгиба образца 65,0 МПа:

$$\delta = 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0578 \cdot t - 1,041,$$

где δ – деформация, фиксируемая прибором определения теплостойкости, мм; t – температура нагрева образца, °С.

Цель исследования можно считать достигнутой – экспериментально установлена деформационная теплостойкость однонаправленно армированных стеклопластиковых образцов с учетом увеличенного напряжения изгиба.

Заключение

По проведенному исследованию можно сделать следующие выводы:

1. На базе метода Мартенса предложен экспериментальный метод определения деформационной теплостойкости непрерывно армированных композитных образцов, отличающийся увеличенными напряжениями изгиба.

2. По предложенному методу построены термомеханические кривые и оценена деформационная теплостойкость однонаправленно армированных стеклопластиковых образцов при повышенных напряжениях изгиба.

3. С увеличением напряжения изгиба однонаправленно армированного стеклопластикового образца деформационная теплостойкость снижается, поэтому при определении допустимого значения деформационной теплостойкости полимерной композитной конструкции необходимо учитывать действующие в ней напряжения.

Список источников

1. Слюсаренко В.В., Журавлева Л.А. Техничко-экономическая оценка стеклопластиков как конструкционных материалов // Пластические массы. 2005. № 2. С. 53–54.

2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер [и др.]; под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия. 2008. 560 с.

3. Андрияшкин А.Ю. Технологии изготовления элементов конструкций ракетно-космической техники из газонаполненных пластмасс // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 1. С. 162–168.

4. Андрияшкин А.Ю. Повышение функциональных и конструкционных свойств газонаполненных пластмасс // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2011. № 3 (69). С. 60–69.

5. Андрияшкин А.Ю., Конышев М.В., Охупкин М.В. Пропитка волокнистого наполнителя при формировании армированного полимерного покрытия для техники специального назначения // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 11–12 (113–114). С. 63–69.

6. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2010. Т. 16. № 2. С. 214–232.
7. Связующие для получения теплостойких композиционных материалов / Ю.А. Григорьев [и др.] // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. № 11. С. 9–13.
8. Лапицкий А.В. Эпоксидные полимерные матрицы для высокопрочных и теплостойких композитов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2010. № 2. С. 12–15.
9. Воронков А.Г., Ярцев В.П. Влияние температуры и вида нагрузки на закономерности разрушения эпоксидных композитов // *Пластические массы*. 2004. № 6. С. 27–29.
10. Савин В.Ф., Луговой А.Н., Волков Ю.П. Методика определения термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2003. Т. 69. № 6. С. 40–43.
11. Продольный изгиб как метод определения механических характеристик материалов / В.Ф. Савин [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006. Т. 72. № 1. С. 55–58.
12. Волков Ю.П., Савин В.Ф., Луговой А.Н. Методика определения верхнего температурного предела работоспособности полимерных материалов // *Пластические массы*. 2005. № 3. С. 44–45.
13. Кудрина А.В. Методы определения теплофизических свойств полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. № 4. С. 33–35.
14. Продольный изгиб полимерных стержней с учетом деформаций ползучести и начальных несовершенств / С.В. Литвинов [и др.] // *Пластические массы*. 2013. № 7. С. 26–31.
15. Атясова Е.В., Блазнов А.Н., Савин В.Ф. Теплостойкость полимерных композиционных материалов при продольном изгибе // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. № 12. С. 53–57.
16. Влияние температуры на прочность базальто- и стеклопластиков / А.Н. Блазнов [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2014. № 4. Т. 2. С. 154–158.
17. Исследование теплостойкости полимерных композитов на основе эпоксидных матриц / В.В. Самойленко [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2015. № 4. Т. 1. С. 131–135.
18. Исследование термомеханических свойств СВМПЭ / Н.А. Адаменко [и др.] // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 10 (257). С. 30–33.
19. Чимчикова М.К., Карпухин А.А. Влияние минеральных наполнителей на теплостойкость полимерных композиционных материалов // *Бюллетень науки и практики*. 2022. Т. 8. № 8. С. 403–408.
20. Гусева М.А., Петрова А.П. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для ПКМ // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2021. Т. 27. № 1. С. 47–64.

References

1. Slyusarenko V.V., Zhuravleva L.A. Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka stekloplastikov kak konstrukcionnyh materialov // *Plasticheskie massy*. 2005. № 2. С. 53–54.
2. Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya: ucheb. posobie / M.L. Kerber [i dr.]; pod red. A.A. Berlina. SPb.: Professiya. 2008. 560 s.
3. Andryushkin A.Yu. Tekhnologii izgotovleniya elementov konstrukcij raketno-kosmicheskoy tekhniki iz gazonapolnennyh plastmass // *Kosmonavtika i raketostroenie*. 2012. № 1. С. 162–168.
4. Andryushkin A.Yu. Povyshenie funkcional'nyh i konstrukcionnyh svojstv gazonapolnennyh plastmass // *Izvestiya rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk*. 2011. № 3 (69). С. 60–69.
5. Andryushkin A.Yu., Konyshchev M.V., Ohapkin M.V. Propitka voloknistogo napolnitelya pri formirovanii armirovannogo polimernogo pokrytiya dlya tekhniki special'nogo naznacheniya //

Voprosy oboronnoj tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2017. № 11–12 (113–114). S. 63–69.

6. Afanas'ev A.V., Rabinskij L.N., Shershak P.V. Eksperimental'noe opredelenie deformacionnyh i prochnostnyh harakteristik polimernyh kompozicionnyh materialov // Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. 2010. T. 16. № 2. S. 214–232.

7. Svyazuyushchie dlya polucheniya teplostojkih kompozicionnyh materialov / Yu.A. Grigor'ev [i dr.] // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2014. № 11. S. 9–13.

8. Lapickij A.V. Epoksidnye polimernye matricy dlya vysokoprochnyh i teplostojkih kompozitov // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2010. № 2. S. 12–15.

9. Voronkov A.G., Yarcev V.P. Vliyanie temperatury i vida nagruzki na zakonomernosti razrusheniya epoksidnyh kompozitov // Plasticheskie massy. 2004. № 6. S. 27–29.

10. Savin V.F., Lugovoj A.N., Volkov Yu.P. Metodika opredeleniya termomekhanicheskikh harakteristik polimernyh kompozicionnyh materialov // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2003. T. 69. № 6. S. 40–43.

11. Prodol'nyj izgib kak metod opredeleniya mekhanicheskikh harakteristik materialov / V.F. Savin [i dr.] // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2006. T. 72. № 1. S. 55–58.

12. Volkov Yu.P., Savin V.F., Lugovoj A.N. Metodika opredeleniya verhnego temperaturnogo predela rabotosposobnosti polimernyh materialov // Plasticheskie massy. 2005. № 3. S. 44–45.

13. Kudrina A.V. Metody opredeleniya teplofizicheskikh svojstv polimernyh svyazuyushchih // Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2014. № 4. S. 33–35.

14. Prodol'nyj izgib polimernyh sterzhnej s uchetom deformacij polzuchesti i nachal'nyh nesovershenstv / S.V. Litvinov [i dr.] // Plasticheskie massy. 2013. № 7. S. 26–31.

15. Atyasova E.V., Blaznov A.N., Savin V.F. Teplostojkost' polimernyh kompozicionnyh materialov pri prodol'nom izgibe // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2014. T. 80. № 12. S. 53–57.

16. Vliyanie temperatury na prochnost' bazal'to- i stekloplastikov / A.N. Blaznov [i dr.] // Polzunovskij vestnik. 2014. № 4. T. 2. S. 154–158.

17. Issledovanie teplostojkosti polimernyh kompozitov na osnove epoksidnyh matric / V.V. Samojlenko [i dr.] // Polzunovskij vestnik. 2015. № 4. T. 1. S. 131–135.

18. Issledovanie termomekhanicheskikh svojstv SVMPE / N.A. Adamenko [i dr.] // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. № 10 (257). S. 30–33.

19. Chimchikova M.K., Karpuhin A.A. Vliyanie mineral'nyh napolnitelej na teplostojkost' polimernyh kompozicionnyh materialov // Byulleten' nauki i praktiki. 2022. T. 8. № 8. S. 403–408.

20. Guseva M.A., Petrova A.P. Metody ispytanij i issledovanij termoreaktivnyh svyazuyushchih dlya PKM // Mekhanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. 2021. T. 27. № 1. S. 47–64.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 27.06.2024; одобрена после рецензирования: 29.10.2024;
принята к публикации: 31.10.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 27.06.2024; approved after review: 29.10.2024;
accepted for publication: 31.10.2024

Информация об авторах:

Андрюшкин Александр Юрьевич, заведующий кафедрой А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), доцент, кандидат технических наук, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN-код: 7905-9345

Изюмова Елизавета Андреевна, аспирант кафедры А2 «Технологии конструкционных материалов и производства ракетно-космической техники» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1), e-mail: 1997liza1997@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4432-2637>, SPIN-код: 3503-8422

Кадочникова Елена Николаевна, старший научный сотрудник 26 отдела научно-исследовательского Научно-исследовательского института (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (191123, Санкт-Петербург, Воскресенская набережная, д. 10 А), доцент, кандидат технических наук, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN-код: 9778-4011

Information about the authors:

Andryushkin Alexander Yu., head of the A2 department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of the D.F. Ustinov Baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: Sascha1a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7812-069X>, SPIN: 7905-9345

Izyumova Elizaveta A., post-graduate student of the A2 department «Technologies of structural materials and production of rocket and space technology» of the D.F. Ustinov baltic state technical university «VOENMEH» (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), e-mail: 1997liza1997@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4432-2637>, SPIN: 3503-8422

Kadochnikova Elena N., senior researcher of 26 department of scientific research at the Research institute (military system research of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation) of Military academy of logistics named after general of the army A.V. Khrulev (191123, Saint-Petersburg, Voskresenskaya Embankment, 10 A), associate professor, candidate of technical sciences, e-mail: vf10@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4577-390X>, SPIN: 9778-4011