

УДК 629.78; 620.178.4/.6

doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-84-91

Экспериментальное определение механических и теплофизических характеристик углепластика тонкостенной оболочки антенного рефлектора

А.Д. Новиков, С.В. Резник, О.В. Денисов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Experimental Study to Determine Mechanical and Thermophysical Characteristics of Thin-Walled Carbon Plastic Antenna Reflectors

A.D. Novikov, S.V. Reznik, O.V. Denisov

Bauman Moscow State Technical University

К массе и формо-размеростабильности рефлекторов бортовых зеркальных космических антенн перспективных спутников связи предъявляются высокие требования. Для соответствия этим требованиям разрабатываются новые конструктивно-силовые схемы рефлекторов с использованием полимерных композиционных материалов. Особый интерес вызывает применение в таких конструкциях композитов из плоских армирующих углеродных тканей. Разработана методика экспериментального определения механических и теплофизических характеристик углепластика тонкостенной оболочки (0,6 мм) рефлектора бортовой космической антенны. Получены данные о модуле упругости углепластика на основе углеродной ткани Аспро А-80 и эпоксидного компаунда Huntsman Araldite LY8615 US/XB 5173 Hardener в двух направлениях. Определена теплопроводность материала в плоскости армирования.

Ключевые слова: рефлекторы космических антенн, плоские углеродные ткани, определение характеристик, модуль упругости, теплопроводность в плоскости армирования

High requirements are imposed on the mass and dimensional stability of reflectors of onboard mirror space antennas in promising communication satellites. To meet these requirements, new design and layout schemes for reflectors using composite materials are being developed. The use of flat reinforced carbon fabric composites in these designs is of particular interest. A technique is developed for the experimental determination of mechanical and thermophysical characteristics of the carbon fiber used in a thin-walled shell (0.6 mm) of the onboard space antenna reflector. Data are obtained on the elastic modulus of the carbon fiber based on Aspro-A80 carbon fabric and Huntsman Araldite LY8615 US/XB 5173 Hardener epoxy compound in two directions. The thermal conductivity of the material in the plane of reinforcement is determined.

Keywords: reflectors of space antennas, carbon fiber, characterization, elastic modulus, thermal conductivity

Современные и перспективные спутники связи оснащены бортовыми зеркальными космическими антеннами с рефлекторами из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Уже

освоен диапазон частот радиосвязи 1...40 ГГц и имеются данные о появлении космических аппаратов, антенны которых работают в частотном интервале 40...75 ГГц.

Если исходить из традиционных требований к допустимому отклонению формы рефлектора $\Delta/16$ (Δ — длина волны радиоизлучения), то необходимая точность изготовления и поддержания стабильности формы его оболочки в условиях неравномерного нагрева при орбитальном движении оказывается чрезвычайно высокой, достигая 0,1 мм. Помимо высоких требований по размеростабильности необходимо обеспечивать низкую погонную плотность (отношение массы к площади апертуры), которая для лучших образцов рефлекторов составляет 3,0 кг/м².

Для соответствия таким высоким требованиям разрабатываются все более совершенные конструктивно-силовые схемы рефлекторов [1–5]. Установлено [3–5], что весьма эффективной по размеростабильности и массе является схема оребренного тонкостенного рефлектора из углепластика, полученного с использованием плоских армирующих углеродных тканей (рис. 1). Конструкция представляет собой параболическую оболочку вращения диаметром 1200 мм с реберным усилением в виде шестиконечной звезды на выпуклой поверхности. Толщина оболочки и ребер составляет 0,6 мм, высота реберного подкрепления — 90 мм.

Для проектирования антенных рефлекторов с высокими показателями необходимо располагать механическими и теплофизическими характеристиками ПКМ, которые варьируются в широких пределах и зависят от матрицы, армирующего компонента и способа изготовления. Учитывая отсутствие государственных стандартов и паспортных характеристик углепластиков, необходимо экспериментально исследовать применяемые в каждой отдельной конструкции материалы.

Цель работы — определение модуля упругости и теплопроводности в плоскости армирования ПКМ на основе плоских углеродных тканей толщиной 0,6 мм.

Испытания ПКМ на основе волокнистых наполнителей имеют ряд особенностей. Анизотропия материала и отсутствие пластических деформаций при разрушении обуславливают значительные трудности при идентификации механических характеристик даже в случае одноосного нагружения [6–9]. Также волокнистая структура оказывает влияние на теплофизические и оптические характеристики материала.



Рис. 1. Оребренная выпуклая поверхность опытной конструкции антенного рефлектора

На практике наиболее часто для определения механических характеристик ПКМ применяют испытания на одноосное растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг [10, 11]. Для выявления теплофизических характеристик могут быть использованы методы контактного [12] и бесконтактного [13] нагрева, лазерной вспышки [14] и др.

При испытаниях ПКМ необходимо учитывать следующие особенности [15]:

- существенное влияние характеристик отдельных компонентов материала, технологических методов производства и типа армирования на характеристики ПКМ в целом, что требует увеличения количества испытываемых образцов;
- анизотропию характеристик материала;
- предел прочности ПКМ при сжатии часто ниже, чем предел прочности при растяжении;
- близость эксплуатационных температур к таковым для фазовых переходов полимера.

Изготовление образцов. Экспериментальные образцы состояли из углеродной ткани Аспро А-80 и эпоксидного компаунда Huntsman Araldite LY8615 US/XB 5173 Hardener. Основу углеродной ткани образует плоский углеродный жгут для повышения механических характеристик ПКМ. Также использование плоских жгутов в основе ткани способствует сглаживанию рельефа лицевой поверхности рефлектора.

Паспортные характеристики углеродной ткани Аспро А-80

Материал основы и утка (0°)	Углеродная лента IMS65 24K
Материал утка (90°)	Углеродная лента IMS65 24K
Аппрет	Эпоксидная смола марки ВМ (~ 7,0 г/м ²)
Поверхностная плотность, г/м ²	80
Прочность на растяжение волокна, МПа	6000
Модуль упругости при растяжении, ГПа	290
Удлинение при разрыве, %	1,9

Образцы для всех видов испытаний изготавливали методом вакуумного формования. Для этого изначально подготавливали преформу из шести слоев ткани размером 200×200 мм по схеме 0°/90°, 45°/-45°, 0°/90°, 45°/-45°, 0°/90°, 45°/-45° (рис. 2). Затем собирали вакуумный пакет. Далее преформу пропитывали эпоксидным компаундом с помощью инъекционной машины Radius (рис. 3).



Рис. 2. Преформа образцов для испытаний



Рис. 3. Процесс пропитки преформы образцов

Впоследствии подготовленные образцы проходили подготовку для каждого типа испытаний в соответствии с требованиями.

Определение механических характеристик.

Для выявления механических характеристик углепластика использован метод растяжения плоских образцов согласно ГОСТ Р 56785–2015 и ГОСТ 31938–2012. Метод заключается в определении при разрыве модуля упругости и удлинения, а также разрывной нагрузки путем растяжения образца с помощью испытательной машины.

Испытания проходили в машине Zwick Z100 по ГОСТ 28840–90 (рис. 4), обеспечивающей линейное перемещение траверсы с постоянной скоростью и измерение нагрузки с погрешностью не более ±1 %. Образец закрепляли соосно оси симметрии испытательной машины, оборудованной клиновидными зажимами.

Плоские образцы углепластика вырезали из пластин с армированием по схеме 0°/90°, 45°/-45°, 0°/90°, 45°/-45°, 0°/90°, 45°/-45°. Перед испытаниями выполняли контроль образцов на предмет отсутствия дефектов.

Испытания проводили в следующем порядке:

- выбор шкалы нагрузки;
- установка скорости деформирования (10 мм/мин);
- измерение размеров (ширины и толщины) образца штангенциркулем;
- установка образца в клиновидные зажимы;
- контроль соосности образца прилагаемой нагрузке (см. рис. 3);
- начало испытания, регистрация нагрузки при текущем удлинении и момента разрыва;
- прекращение испытания при полном разрушении образца;
- изъятие образца из клиновидных зажимов.

За результаты испытаний принимали средние значения десяти измерений модуля упругости в двух направлениях и напряжения при разрыве образца после испытаний всех образцов. После испытаний получены следующие механические характеристики углепластика, ГПа:

Модуль Юнга вдоль оси x	110
Модуль Юнга вдоль оси y	108
Напряжение при разрыве	0,9

Несмотря на то, что модули упругости вдоль осей x и y (E_x и E_y) совпадают, сделать заключение о квазиизотропии материала нельзя. По-



Рис. 4. Образец в клиновидных захватах

мимо равенства E_x и E_y должно выполняться условие

$$G_{xy} = \frac{E_x}{2(1 + \mu_{xy})},$$

где G_{xy} — модуль сдвига в плоскости xy ; μ_{xy} — коэффициент Пуассона.

Однако оценить модуль сдвига для углепластика толщиной 0,6 мм достаточно трудно, и большинство известных методов непригодны, так как предусматривают испытание более толстых образцов.

При этом значения механических характеристик, особенно напряжения при разрыве, показывают, что у плетеных тканей механические характеристики выше, чем у традиционных углеродных тканей.

Определение теплофизических характеристик. Для определения теплофизических характеристик использована установка контактного нагрева, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана [16, 17] (рис. 5). Так как вследствие малой толщины образцов углепластика теплопроводность поперек армирования не оказывает существенного влияния на тепловое состояние конструкции, необходимо определить теплопроводность в плоскости армирования.

Для нахождения теплопроводности образец длиной 100 мм и шириной 30 мм устанавливали между медными пластинами и нагревательными элементами, смонтированными на опорной конструкции.

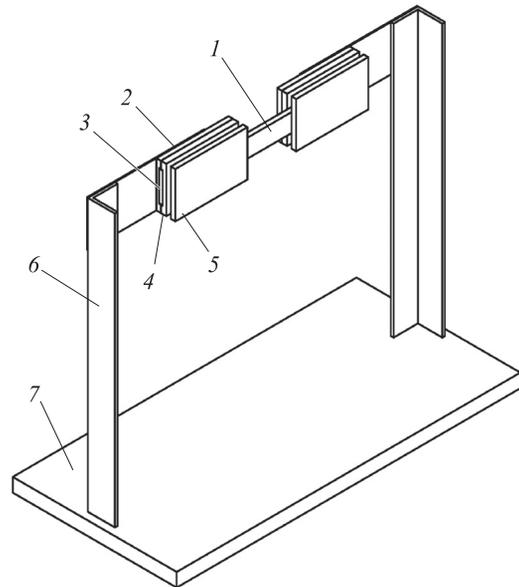


Рис. 5. Схема установки контактного нагрева: 1 — образец; 2 — алюминиевая пластина; 3, 5 — медные пластины; 4 — нагревательные элементы; 6 — стойка; 7 — основание

Для контроля температуры на открытом участке образца длиной 50 мм использовали терморпары и тепловизор Fluke Ti400 (рис. 6–8).

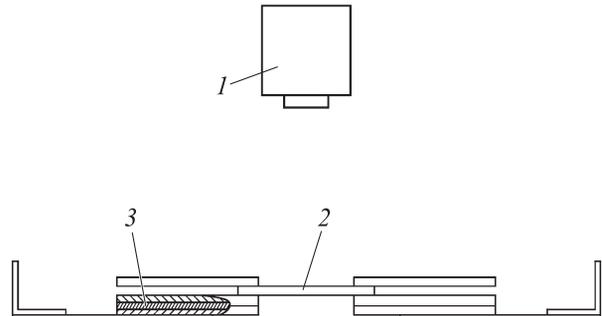


Рис. 6. Схема установки тепловизора: 1 — тепловизор; 2 — образец; 3 — нагреватель

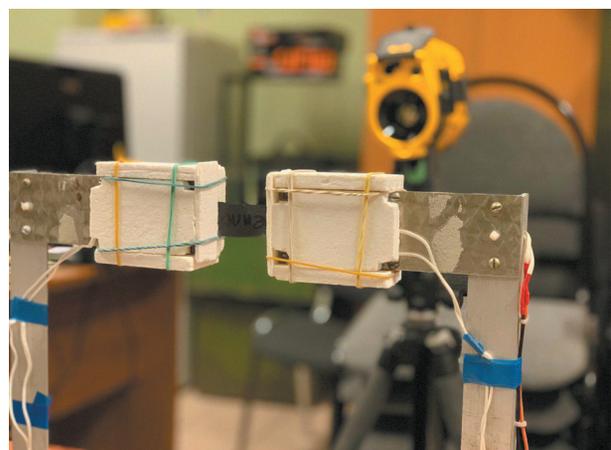


Рис. 7. Образец в установке контактного нагрева

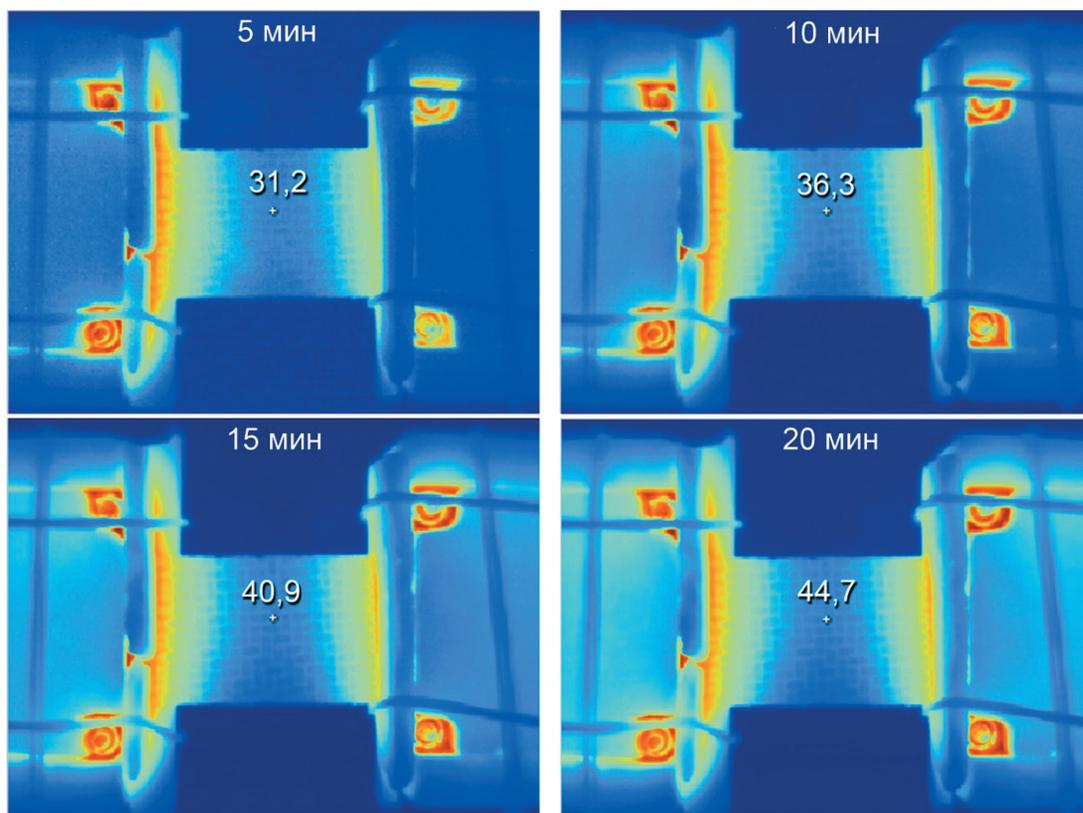


Рис. 8. Данные прогрева образца, полученные с помощью тепловизора

Нагрев образца происходил симметрично. Термоэлектроды подключали к регистрирующему устройству Мера МС-227К и выводили вдоль изотермических поверхностей образца. Регистрация данных осуществлялась в автоматическом режиме. Экспериментальные термограммы образца и нагревателя использовали в качестве исходных данных при решении нелинейной двумерной обратной задачи теплопроводности, реализованной в программе COMSOL Multiphysics.

По результатам эксперимента установлено, что в интервале температур 20...50 °C среднее значение теплопроводности ПКМ составляет 15 Вт/(м·К). Такое значение теплопроводности является достаточно высоким для ПКМ, что объясняется использованием плетеных тканей, так как процентное содержание связующего в таком материале меньше, чем в традиционных армирующих тканях.

Литература

- [1] Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью. *Инженерно-физический журнал*, 2015, т. 88, № 3, с. 674–680.

Значения удельной теплоемкости, необходимые для проведения проектных исследований, рассчитывали по известному составу компонентов ПКМ.

Выводы

1. Для обеспечения теплового проектирования конструкций рефлекторов бортовых космических антенн разработана методика, по которой экспериментально определены значения модулей упругости и теплопроводности углепластика на основе углеродной ткани Аспро А-80 и эпоксидного компаунда Huntsman Araldite LY8615 US/XB 5173 Hardener.
2. Показано, что использование плетеных углеродных тканей улучшает механические и теплофизические характеристики ПКМ.

- [2] Резник С.В., Просунцов П.В., Азаров А.В. Моделирование температурного и напряженно-деформированного состояний рефлектора зеркальной космической антенны. *Инженерно-физический журнал*, 2015, т. 88, № 4, с. 945–950.
- [3] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D., Zaw Ye Aung Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, no. 1. 012012, doi: 10.1088/1757-899X/153/1/012012
- [4] Резник С.В., Просунцов П.В., Новиков А.Д. Методика и результаты теплового проектирования легкого формо-размеростабильного рефлектора космической антенны. *XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Тез. докл. и сообщений*, Минск, 23–26 мая 2016, Минск, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016, т. 2, с. 423–427.
- [5] Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2017, т. 18, № 3, с. 308–317.
- [6] Стрижало В.А., Земцов В.П. Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении. *Проблемы прочности*, 2011, № 6, с. 61–71.
- [7] Dumansky A.M., Tairova L.P. The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon reinforced plastic. *Proceedings of World Congress on Engineering*, 2–4 July 2007, vol. II, London, UK, 2007, pp. 1346–1351.
- [8] Коваленко Н.А., Олегин И.П., Гоцелюк Т.Б., Чаплыгин В.Н., Петров П.М. Численно-экспериментальное исследование прочности элементов конструкций из слоистых углепластиков. *Обработка металлов*, 2014, № 1(62), с. 69–75.
- [9] Dumansky A.M., Tairova L.P. Construction of hereditary constitutive equations of composite laminates. *Proceedings of the Second International Conference on Heterogeneous Material Mechanics Advances in heterogeneous Material Mechanics*, DEStech Publications Inc., 2008, pp. 934–937.
- [10] Русланцев А.Н., Думанский А.М. Деформирование углепластиков под действием переменных во времени нагрузок. *Труды МАИ*, 2017, № 97. URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/46b/Ruslantsev_Dumanskiy_rus.pdf?lang=en&issue=97 (дата обращения 01 февраля 2020).
- [11] Dumanskii A.M., Alimov M.A., Radchenko A.A., Komarov V.A. On the effect of fiber rotation upon deformation on carbon-fiber angle-ply laminates. *Polymer Science. Series D*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 197–199, doi: 10.1134/S199542121702006X
- [12] Резник С.В., Денисов О.В., Просунцов П.В., Денисова Л.В., Бондалетов Д.Н., Петров Н.М. Отработка методики исследования коэффициента теплопроводности анизотропных композитов. *Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Матер. XXI Междунар. конф.*, Самара, 3–6 сентября 2019, Самара, ООО «Офорт», 2019, с. 443–446.
- [13] Балджиев Р.С., Просунцов П.В., Алексеев А.А. Обоснование возможности применения стэндов на базе галогенных ламп накаливания для термоциклических испытаний высокотемпературных материалов. *Будущее машиностроения России. Сб. матер. конф.*, Москва, 24–26 сентября 2018, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 646–648.
- [14] Кемпан А.В., Макаренко И.В., Страхов В.Л. Экспериментальное исследование комплекса термохимических, теплофизических свойств и кинетики процесса отверждения полимерных композиционных материалов. *Композиты и наноструктуры*, 2016, т. 8, № 4(32), с. 251–264.
- [15] Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при разных видах нагружения. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2015, № 2, с. 244–262.
- [16] Резник С.В., Просунцов П.В., Петров Н.М., Шуляковский А.В., Денисова Л.В. Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры. *Тепловые процессы в технике*, 2016, т. 8, № 12, с. 557–563.
- [17] Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Хеонг Л.В. Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного

материала корпуса наноспутника. *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Инженерные исследования*, 2017, т. 18, № 3, с. 345–352, doi: 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352

References

- [1] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Simulation of supersonic flow in a channel with a step on nonstructured meshes with the use of the weno scheme. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 4, pp 877–884, doi: 10.1007/s10891-015-1263-x
- [2] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Modeling of the temperature and stressed-strained states of the reflector of a mirror space antenna. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 4, pp. 978–983, doi: 10.1007/s10891-015-1273-8
- [3] Prosuntsov P.V., Reznik S.V., Mikhailovsky K.V., Novikov A.D., Zaw Ye Aung Study variants of hard CFRP reflector for intersatellite communication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 153, no. 1. 012012, doi: 10.1088/1757-899X/153/1/012012
- [4] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Novikov A.D. Methodology and results of thermal designing of a light form-stable dimensional reflector of a space antenna. *XV minskiy mezhdunar. forum po teplo i massoobmenu. Tez. dokl. i soobshcheniy* [XV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. Abstracts of reports and messages]. Minsk, 2016, vol. 2, pp. 423–427.
- [5] Novikov A.D., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 308–317 (in Russ.).
- [6] Strizhalo V.A., Zemtsov V.P. Rigidity and strength of laminated carbon plastics under uniaxial loading. *Strength of Materials*, 2011, no. 6, pp. 61–71 (in Russ.).
- [7] Dumansky A.M., Tairova L.P. The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon reinforced plastic. *Proceedings of World Congress on Engineering*, 2–4 July 2007, vol. II, London, UK, 2007, pp. 1346–1351.
- [8] Kovalenko N.A., Olegin I.P., Gotselyuk T.B., Chaplygin V.N., Petrov P.M. Numerical-experimental study of the strength of constructional elements, made of carbon laminate. *Obrabotka metallov*, 2014, no. 1(62), pp. 69–75 (in Russ.).
- [9] Dumansky A.M., Tairova L.P. Construction of hereditary constitutive equations of composite laminates. *Proceedings of the Second International Conference on Heterogeneous Material Mechanics Advances in heterogeneous Material Mechanics*, DEStech Publications Inc., 2008, pp. 934–937.
- [10] Ruslantsev A.N., Dumanskiy A.M. Deformation of carbon fiber-reinforced plastic deformation under the time-varying loads. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. Available at: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/46b/Ruslantsev_Dumanskiy_rus.pdf?lang=en&issue=97 (accessed 01 February 2020).
- [11] Dumanskii A.M., Alimov M.A., Radchenko A.A., Komarov V.A. On the effect of fiber rotation upon deformation on carbon-fiber angle-ply laminates. *Polymer Science. Series D*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 197–199, doi: 10.1134/S199542121702006X
- [12] Reznik S.V., Denisov O.V., Prosuntsov P.V., Denisova L.V., Bondaletov D.N., Petrov N.M. Testing the methods for studying the thermal conductivity of anisotropic composites. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh. Mater. XXI mezhdunar. konf.* [Complex Systems: Control and Modeling Problems. Materials of the XXI international conference]. Samara, 2019, pp. 443–446.
- [13] Baldzhiyev R.S., Prosuntsov P.V., Alekseyev A.A. Justification of the possibility of using stands based on halogen incandescent lamps for thermocyclic testing of high-temperature materials. *Budushcheye mashinostroyeniya Rossii. Sb. mater. konf.* [The future of engineering in Russia. Conference proceedings]. Moscow, Bauman Press, 2018, pp. 646–648.
- [14] Kempam A.V., Makarenko I.V., Strakhov V.L. Experimental study of polymer composite materials thermochemical and thermophysical properties and their curing process kinetics. *Composites and nanostructures*, 2016, vol. 8, no. 4(32), pp. 251–264 (in Russ.).
- [15] Laptev M.Yu., Adamov A.A. Comparison of methods for determining the elastic and strength characteristics of polymer composite materials under different types of loading. *Computational Continuous Mechanics*, 2015, no. 2, pp. 244–262 (in Russ.).

- [16] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Petrov N.M., Shulyakovskiy A.V., Denisova L.V. Numerical and Experimental Estimation of Heat Conductivity of Carbon Plastic in a Reinforcement Plane on the Basis of Contactless Measurement of Temperature. *Teplovyye protsessy v tekhnike*, 2016, vol. 8, no. 12, pp. 557–563 (in Russ.).
- [17] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Denisov O.V., Petrov N.M., Kheong L.V. Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method. *RUDN Journal of Engineering researches*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 345–352 (in Russ.), doi: 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352

Статья поступила в редакцию 20.02.2020

Информация об авторах

НОВИКОВ Андрей Дмитриевич — аспирант, старший преподаватель кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com).

РЕЗНИК Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

ДЕНИСОВ Олег Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: denisov.sm13@mail.ru).

Information about the authors

NOVIKOV Andrey Dmitrievich — Postgraduate, Senior Lecturer, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: e-mail: novikov.andrey.sm13@gmail.com).

REZNIK Sergey Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sreznik@bmstu.ru).

DENISOV Oleg Valerievich — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Space-Rocket Composite Design Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: denisov.sm13@mail.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Новиков А.Д., Резник С.В., Денисов О.В. Экспериментальное определение механических и теплофизических характеристик углепластика тонкостенной оболочки антенного рефлектора. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 84–91, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-84-91

Please cite this article in English as:

Novikov A.D., Reznik S.V., Denisov O.V. An Experimental Study to Determine Mechanical and Thermophysical Characteristics of Thin-Walled Carbon Plastic Antenna Reflectors. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 84–91, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-84-91