

## Определение механических характеристик сублимирующего теплозащитного покрытия для ракетно-космической техники

© Г.П. Швецов<sup>1</sup>, В.А. Романенков<sup>1</sup>, П.В. Круглов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия», г. Королёв,  
Московская область, 141070, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В ракетно-космической технике теплозащитные покрытия используются для обеспечения надежного функционирования конструкции в заданном диапазоне температур. Одним из методов реализации теплозащитных функций является абляционный метод, основанный на разрушении теплозащитного покрытия с одновременным теплоотводом. ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия» является единственным в стране предприятием — изготовителем тепловой защиты для пилотируемых космических кораблей. На предприятии в настоящее время проводятся работы по созданию новых перспективных космических кораблей для пилотируемых межпланетных полетов, у которых тепловая защита является одной из основных составляющих частей конструкции. При создании технологии производства конструкций ракетно-космической техники вследствие многовариантности технологии необходимо, чтобы отдельные элементы конструкций обладали наилучшими физико-механическими свойствами. В данной работе представлены результаты экспериментов по определению механических характеристик фторлона — предела прочности и предельного удлинения. По результатам экспериментов построены зависимости напряжений и деформаций. Получены значения предела прочности 23,1 МПа, предельного удлинения 57,5 %. Следует отметить значительные удлинения образцов, что характеризует пластичность фторлона. При этом прочность материала выше предполагаемых расчетных значений. Данные результаты будут полезны при технологической подготовке производства теплозащитных покрытий ракетно-космической техники.*

**Ключевые слова:** сублимирующее теплозащитное покрытие, абляционный метод теплозащиты, механические характеристики, композиционные материалы

**Введение.** В ракетно-космической технике теплозащитные покрытия используются для обеспечения надежного функционирования конструкции в заданном диапазоне температур. Одним из методов реализации теплозащитных функций является абляционный метод, основанный на разрушении теплозащитного покрытия с одновременным теплоотводом [1, 2]. Разновидностью абляционных покрытий являются сублимирующие покрытия: фторопласт, фторлон, полиэтилен [1]. Использование таких покрытий особенно эффективно при наличии значительных тепловых потоков. Известно, что при создании технологии производства конструкций ракетно-космической

техники вследствие многовариантности технологии необходимо достижение наилучших физико-механических свойств отдельных элементов конструкции [3–8]. Поэтому актуальной задачей является изучение свойств и получение количественных оценок основных физических, механических, технологических свойств, важных как для использования в конструкциях изделий, возвращающихся на Землю с космическими скоростями, так и для определения параметров в технологических процессах изготовления.

В данной работе представлены результаты экспериментов, в которых определены механические характеристики фторлона — предела прочности и предельного удлинения. Материалы на основе фторлоновых нитей и тканей активно используются в машиностроении в качестве антифрикционных покрытий [9–11], в медицине для сосудистых протезов [12]. Цель данных исследований — изучение свойств этого материала в качестве теплозащитного покрытия применительно к конструкциям ракетно-космической техники.

**Экспериментальные исследования.** Для исследования были подготовлены образцы из материала фторлон толщиной  $\delta = 3,8 \dots 4,2$  мм (рис. 1, 2) [13, 14]. Испытания проводили на разрывной машине Neckert FP100 со скоростью  $v = 1$  мм/с (рис. 3).

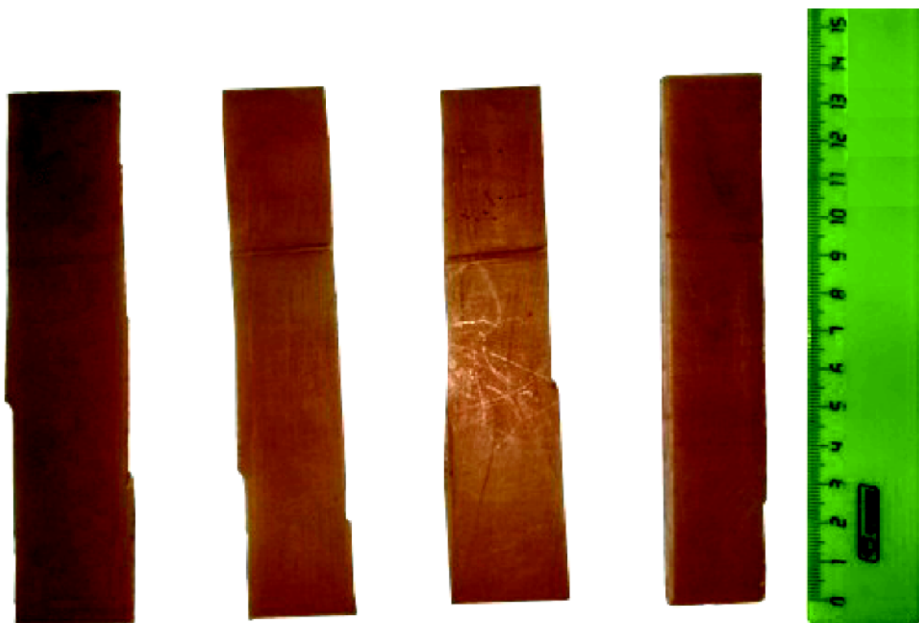
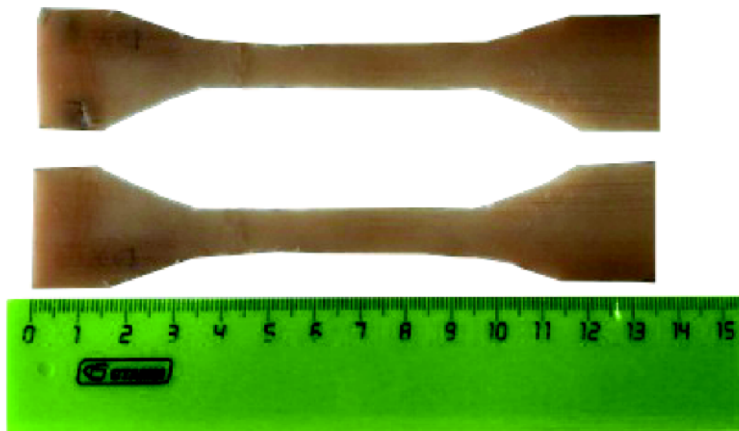
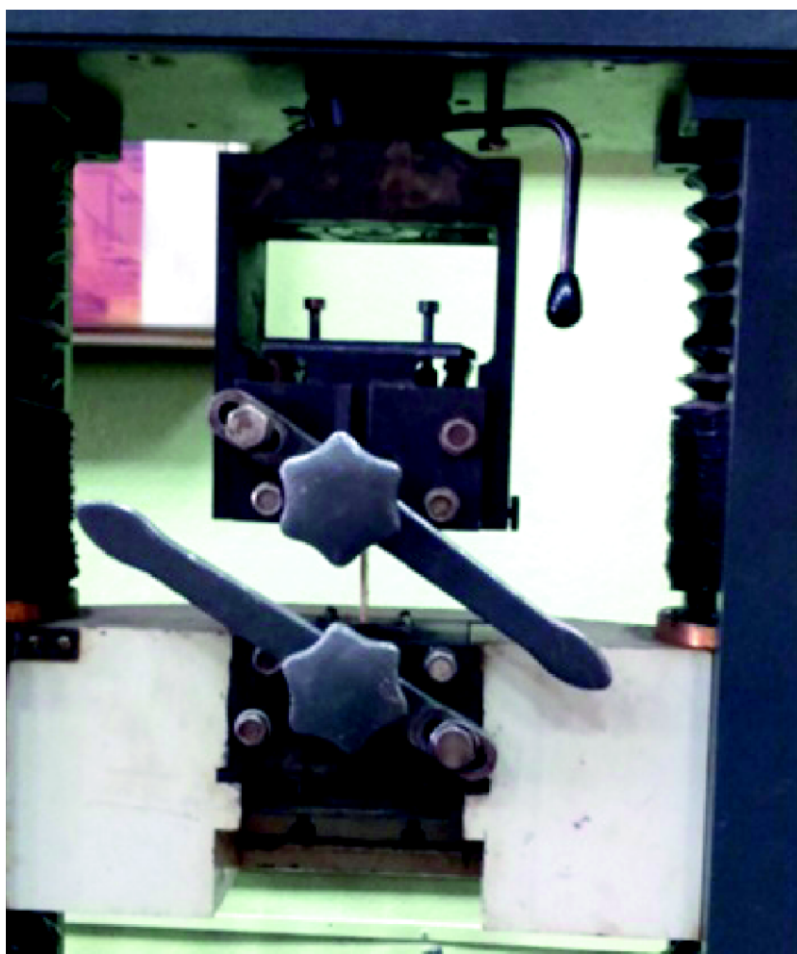


Рис. 1. Образцы исходного материала фторлон



**Рис. 2.** Вид образцов из материала фторлон перед испытаниями



**Рис. 3.** Испытания на разрывной машине (общий вид)

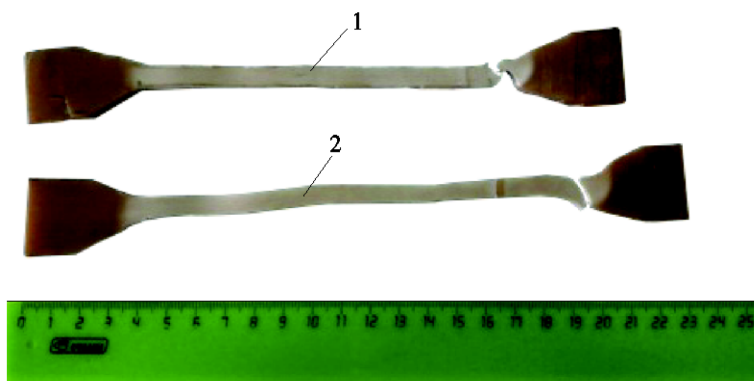


Рис. 4. Образцы 1 и 2 после испытаний

Результаты испытаний (рис. 4) представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний фторлона на растяжение**

Образец	Толщина $\delta$ , мм	Предел прочности $\delta_b$ , МПа	Относительное удлинение $\gamma$ , %
1	4	23,75	52
2	4	22,5	63

**Результаты эксперимента.** По результатам экспериментов построены зависимости напряжений и деформаций (рис. 5). Следует отметить значительные удлинения образцов, что характеризует пластичность фторлона. Вместе с тем видно, что прочность материала выше предполагаемых расчетных значений.

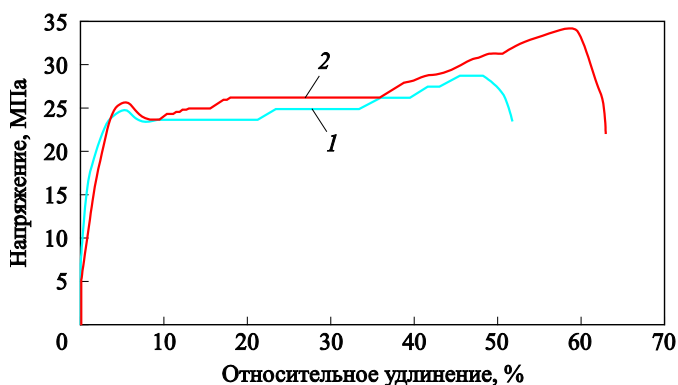


Рис. 5. Диаграмма растяжения, совмещенная для двух образцов: 1 — образец 1; 2 — образец 2

Проводили также испытания для дополнительной части образцов, размеры которых отличались от рекомендуемых стандартом. При их растяжении были получены образцы со значительными деформациями (рис. 6). В таких условиях растяжения в зону деформации вытягивался материал из зоны закрепления, поэтому предельное удлинение таких образцов оказалось выше, чем у стандартных, и достигало 78 %. В табл. 2 приведены результаты испытаний дополнительных образцов, на рис. 7 — диаграмма растяжения этих образцов.

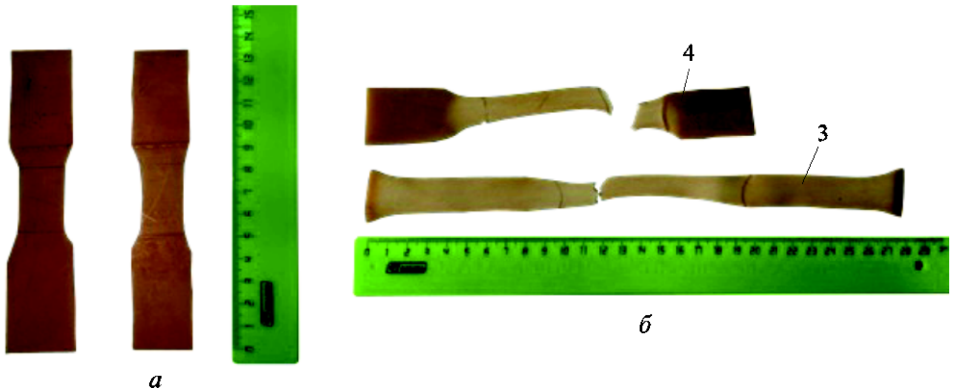


Рис. 6. Образцы (3 и 4) нестандартной формы до (а) и после (б) испытаний

Таблица 2

Результаты испытаний дополнительных образцов на растяжение

Образец	Толщина $\delta$ , мм	Предел прочности $\delta_b$ , МПа	Относительное удлинение $\gamma$ , %
3	3,6	29,9	78
4	3,6	16,4	41

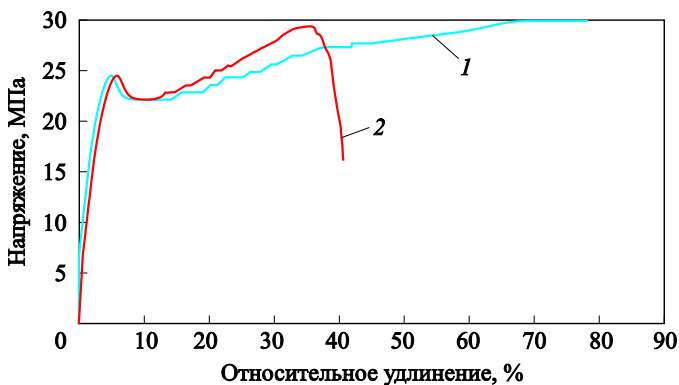


Рис. 7. Диаграмма растяжения, совмещенная для двух дополнительных образцов:  
 1 — образец 3; 2 — образец 4

**Заключение.** Проведено экспериментальное исследование механических характеристик теплозащитного материала сублимирующего типа фторлон. Получены значения предела прочности  $\delta_b = 23,1$  МПа, предельного удлинения  $\gamma = 57,5$  %. Данные результаты будут полезны при технологической подготовке производства теплозащитных покрытий ракетно-космической техники.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Джур Е.А., Вдовин С.И., Кучма Л.Д. и др. *Технология производства космических ракет*. Днепропетровск, Издательство ДГУ, 1992, 184 с.
- [2] Калинин В.А. *Технология теплозащиты и теплоизоляции изделий*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 61 с.
- [3] Романенков В.А., Колесниченко А.Ф., Мартынов М.В. и др. Повышение физико-механических показателей теплозащитных покрытий при автоклавном формовании в нейтральной среде. *XI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: сб. тезисов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 406–407.
- [4] Романенков В.А., Кузнецова Л.Н., Мамьянова Е.Н., Гуськова М.Р. Технологии машинного раскроя и шивки многослойных стеклокаркасных полотен для тепловой защиты спускаемого аппарата космического корабля. *Актуальные проблемы космонавтики: Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 459–460.
- [5] Тарасов В.А., Романенков В.А., Комков М.А. Технологические основы снижения длительности цикла и повышения безопасности изготовления тепловой защиты спускаемых космических аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 8, с. 35–43
- [6] Круглов П.В., Тарасов В.А. Метод генерации проектных решений сборки изделий с применением ориентированных гиперграфов. *Наука и образование*, 2012, № 1. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/260312.html>
- [7] Круглов П.В., Тарасов В.А., Болотина И.А. Метод формирования совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов. *Наука и образование*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/339658.html>
- [8] Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 5. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-5-1494>
- [9] Колоколкина Н.В., Субботин В.В., Петрова А.В., Редина Л.В. Получение модифицированного волокна фторлон с повышенным уровнем гидро-, олеофобности. *Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс): Сб. материалов междунар. науч.-техн. конф.* Иваново, Изд-во Ивановской государственной текстильной академии, 2013, с. 403–404.
- [10] Семенов А.П. Антифрикционные материалы: опыт применения и перспективы. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2007, № 12, с. 21–36.

- [11] Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения. *Российский химический журнал*, 2009, т. LIII, № 4, с. 4–18.
- [12] Лазаренко С.В., Липатов В.А., Иванов А.В., Парфенов И.П. Сравнительный анализ физико-механических свойств заплат для операций на магистральных сосудах. *Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии*, 2014, № 4, с. 90–96.
- [13] *ГОСТ 11262–76. Пластмассы. Метод испытания на растяжение*. Москва, Изд-во стандартов, 1986, 16 с.
- [14] Буланов И.М., Нехороших Г.Е. *Определение механических характеристик композиционных материалов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993, 39 с.

Статья поступила в редакцию 30.08.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Швецов Г.П., Романенков В.А., Круглов П.В. Определение механических характеристик сублимирующего теплозащитного покрытия для ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1687>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Швецов Герман Павлович** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2016 г. по специальности «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Инженер ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия». e-mail: shvetsov.g@gmail.com

**Романенков Владимир Алексеевич** окончил МАТИ им. К.Э. Циолковского в 1979 г. по специальности «Технологии переработки неметаллов в детали и изделия». Главный химик ЗАО «ЗЭМ» РКК «Энергия». Автор более 30 публикаций в области изготовления конструкций из композиционных материалов. e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru

**Круглов Павел Владимирович** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1996 г. по специальности «Ракетостроение». Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций в области технологий специального машиностроения. e-mail: kruglov@sm.bmstu.ru

## Determination of the mechanical characteristics of the subliming thermal protective coating for rocket and space technology

© G.P. Shvetsov<sup>1</sup>, V.A. Romanenkov<sup>1</sup>, P.V. Kruglov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Closed JSC Experimental Machinery Plant “S.P. Korolev RSC Energia”, Korolev town, Moscow region, 141070, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Thermal protective coatings are used in rocket and space technology to ensure reliable operation of the structure in a specified temperature range. One method for implementing heat-shielding is the ablation method, based on the destruction of the thermal protective coating simultaneously with heat removal. Closed JSC Experimental Machinery Plant “RSC Energia” is the only enterprise in the country manufacturing thermal protection for manned spacecraft. The enterprise is currently working on the creation of new promising spacecraft for manned interplanetary flights, where thermal protection is one of the main constituent parts of the design. When creating a technology for the rocket and space equipment production due to technology multivariance it is necessary for individual structural elements to possess the best physical and mechanical properties. Here the results of experiments to determine the mechanical characteristics of the fluorolon: the ultimate strength and ultimate elongation are presented. Based on the results of the experiments, relationships for the stresses and strains are constructed. The values of the tensile strength of 23.1 MPa and the ultimate elongation of 57.5% are obtained. It should be noted that significant elongation of the samples is characterizing the plasticity of the fluorolon. Therewith the strength of the material is higher than the assumed design values. These results will be useful in the technological preparation of the production of thermal protective coatings for rocket and space technology.*

**Keywords:** *subliming thermal protective coating, ablation method, thermal protection, mechanical characteristics, composite materials*

### REFERENCES

- [1] Dzhur E.A., Vdovin S.I., Kuchma L.D. et al. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh raket* [Space rocket manufacturing technology]. Dnepropetrovsk, Dnepropetrovsk State University Publ., 1992, 184 p.
- [2] Kalinchev V.A. *Tekhnologiya teplozashchity i teploizolyatsii izdeliy* [Technology of thermal protection and thermal insulation of products]. Moscow, BMSTU Publ., 1993, 61 p.
- [3] Romanenkov V.A., Kolesnichenko A.F., Martynov M.V. et al. *Povyshenie fiziko-mekhanicheskikh pokazateley teplozashchitnykh pokrytiy pri avtoklavnom formovanii v neytralnoy srede* [Increase of physical and mechanical characteristics of thermal protective coatings when autoclave molding in a neutral environment]. *XL Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva*. Sbornik tezisov [Collection of abstracts of XL Academic readings on cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, pp. 406–407.



- [4] Romanenkov V.A., Kuznetsova L.N., Mamyanova E.N., Guskova M.R. Tekhnologiya mashinnogo raskroya i sshivki mnogosloynnykh steklokarkasnykh poloten dlya teplovoy zashchity spuskaemogo apparata kosmicheskogo korablya [Technology of machine pattern cutting and joining multi-layer glass-frame fabrics for thermal protection of the descent vehicle of the spacecraft]. *Aktualnye problem kosmonavtiki: Trudy XXXIX Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Actual problems of cosmonautics: Proceedings of XXXIX Academic readings on cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU, 2015, pp. 459–460.
- [5] Tarasov V.A., Romanenkov V.A., Komkov M.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2014, no. 8, pp. 35–43.
- [6] Kruglov P.V., Tarasov V.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/260312.html>
- [7] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Bolotina I.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/339658.html>
- [8] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 5. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-5-1494>
- [9] Kolokol'kina N.V., Subbotin V.V., Petrova A.V., Redina L.V. Poluchenie modifitsirovannogo volokna ftorlon s povyshennym urovnem gidro-, oleofobnosti [The preparation of the modified fluorolon fiber with an increased level of hydro-, oleophobicity]. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennye naukoemkie tekhnologii i perspektivnye materialy tekstilnoy i legkoy promyshlennosti" (PROGRESS 2013). Ivanovo, 28–29 maya 2013* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Current High Technology and Promising Materials of Textile and Light Industry (ADVANCEMENTS — 2013). Ivanovo, May 28–29, 2013]. Ivanovo, Ivanovo State Textile Academy Publ., 2013, pp. 403–404.
- [10] Semenov A.P. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax — Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*, 2007, no. 12, pp. 21–36.
- [11] Bakhareva V.E., Nikolaev G.I., Anisimov A.V. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal — Russian Chemical Bulletin*, 2009, vol. LIII, no. 4, pp. 4–18.
- [12] Lazarenko S.V., Lipatov V.A., Ivanov A.V., Parfenov I.P. *Izvestiya Ugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii — Proceedings of South-Western State University. Ser. Technics and Technologies*, 2014, no. 4, pp. 90–96.
- [13] *GOST 11262–76. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie* [State Standard 11262–76. Plastics. Tensile test technique]. Moscow, Standartinform Publ., 1986, 16 p.
- [14] Bulanov I.M., Nekhoroshikh G.E. *Opreделение mekhanicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov* [Determination of the mechanical characteristics of composite materials]. Moscow, BMSTU Publ., 1993, 39 p.

**Shvetsov G.P.** graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2016 on the speciality "Design, production and operation of missiles and rocket-space complexes". Engineer, Closed JSC Experimental Machinery Plant "S.P. Korolev RSC Energia". e-mail: shvetsov.g@gmail.com

**Romanenkov V.A.** graduated from Tsiolkovsky Moscow Institute of Aviation Technology in 1979 on the specialty “Technologies for processing non-metals in parts and products”. Chief Chemist, Closed JSC Experimental Machinery Plant “S.P. Korolev RSC Energia”. Author of over 30 research publications in the field of manufacturing structures of composite materials. e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru

**Kruglov P.V.** graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1996 on the specialty “Rocket Engineering”. Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of special machinery technology. e-mail: kruglov@sm.bmstu.ru