

УДК 629.78

**РАССМОТРЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПОЛНЕННЫХ ШНУРОВ  
ИЗ КРУЧЕНЫХ НИТЕЙ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ  
ДЛЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

М.Я. Гофин, П.В. Пичужкин, А.В. Галеев

Канд. техн. наук М.Я. Гофин; П.В. Пичужкин;  
канд. техн. наук А.В. Галеев (МАИ)

В статье рассматривается одна из актуальных проблем в эксплуатации пилотируемых космических летательных аппаратов (КЛА) – это герметичность и тепловая защита элементов летательного аппарата. В данной работе изучаются проблемы изменения характеристик материалов КЛА под нагревом, вызывающие разгерметизацию элементов конструкции, которую предлагается устранить с помощью высокотемпературных уплотнительных шнуров, в составе тепловой защиты пилотируемых КЛА, помогающих за счет своих уникальных свойств сгладить изменения механических характеристик конструкционных материалов КЛА при эксплуатации. Целью работы является рассмотрение основных свойств высокотемпературных наполненных шнуров из крученых нитей посредством подбора испытательного оборудования, способов их испытания и проведения необходимых мероприятий по применению этих шнуров в конструкциях КЛА.

**Ключевые слова:** гибкие высокотемпературные уплотнения, тепловая защита, гиперзвуковые летательные аппараты, оплетка, наполнитель, критический диаметр, температура

**Consideration of the Main Properties of High-Temperature Filled  
Cords of Twisted Aluminum Oxide Yarns for Manned Space  
Vehicles. M.Ya. Gofin, P.V. Pichuzhkin, A.V. Galeev**

The paper deals with one of the urgent problems in the operation of manned space vehicles (MSV) that is the hermeticity and thermal protection of the elements of a flying vehicle. This paper studies the problem of changes in the characteristics of materials of the MSVs under the impact of heating, causing depressurization of structural elements. It is proposed to eliminate the problem by using high-temperature sealing cords, as part of the thermal protection of manned spacecraft, helping due to its unique properties to smooth over the changes in the mechanical characteristics of structural materials of spacecraft during operation. The purpose of the work is to consider the main properties of high-temperature filled cords made of twisted yarns by selecting the testing equipment, ways of testing, and carrying out the necessary operations on using these cords for the spacecraft structures.

**Keywords:** flexible high-temperature seals, thermal protection, hypersonic flying vehicles, braid, filler, critical diameter, temperature

Потребность в гибких высокотемпературных уплотнениях как одном из элементов тепловой защиты, имеющих низкую газопроницаемость, высокую износостойкость, способность к сопротивлению циклическим механическим нагрузкам, возникла с началом разработки многоразовых транспортно-космических систем (МТКС) и продолжается в настоящее время. Важнейшее требование к тепловой защите – обеспечить приемлемые весовые характеристики при заданных значениях показателей надежности и безопасности. Разработка тепловой защиты предусматривает решение проблемы предотвращения проникновения теплового потока между элементами конструкции теплозащиты в местах установки створок и люков различного назначения, элевонеров с крылом и рулей направления тепловой защиты КЛА. В связи с этим важной задачей является разработка гибких высокотемпературных уплотнений, обеспечивающих тепловую защиту заданного уровня. И в этом контексте важную роль играет подбор испытательного оборудования для изучения основных свойств этих высокотемпературных уплотнений.

Проблема защиты подвижных и неподвижных элементов конструкций от проникновения в них раскаленной плазмы являлась одной из ключевых при разработке теплозащиты.

Рассмотрим строение передней кромки крыла с последовательным монтажом секций. Носок крыла (рис. 1) состоит из 12 секций, устанавливаемых последовательно, начиная с хвостовой, с перекрытием 30 мм, расположенным по потоку. В пазах перекрытий и по периметру контакта секций с теплозащитой верхней и нижней поверхностей крыла устанавливаются термоуплотняющие жгуты типа ШТКк. Жгуты крепятся высокотемпературным клеем типа ВК-54М. Конструктивно секция носка крыла спроектирована из высокопрочного углеродного материала типа КАРБОСИЛ в виде оболочки толщиной 3 мм, подкрепленной двумя поперечными ребрами толщиной 6 мм. Рабочая температура материала КАРБОСИЛ до 1850 °С.

Для крепления к крылу на ребрах секции устанавливают кронштейны из ниобиевого сплава ВН-3 с рабочей температурой до 1100 °С.

На передней стенке крыла на стеклотекстолитовых теплоизолирующих прокладках 2, II [1] устанавливаются ответные кронштейны 4 из жаростойкой стали типа ЖС6У с основными характеристиками:

- рабочая температура – до 1150 °С;
- предел прочности –  $\sigma_b = 650$  МПа, при  $t = 850$  °С и  $\sigma_b = 200...260$  МПа, при  $t = 1100$  °С;
- модуль упругости –  $1,5 \times 10^5$  МПа.

Основная особенность конструкции состоит в том, что обращенные к задней кромке крыла и удаленные от сборщика кронштейны содержат направляющие опорные штифты, воспринимающие нагрузки только в направлениях, перпендикулярных их продольной оси. Вдоль их оси обеспечивается свобода перемещений, в том числе и при температурных нагрузках. Обращенная к сборщику пара кронштейнов крепится жестко к ответным кронштейнам крыла и воспринимает нагрузки по всем направлениям [1].

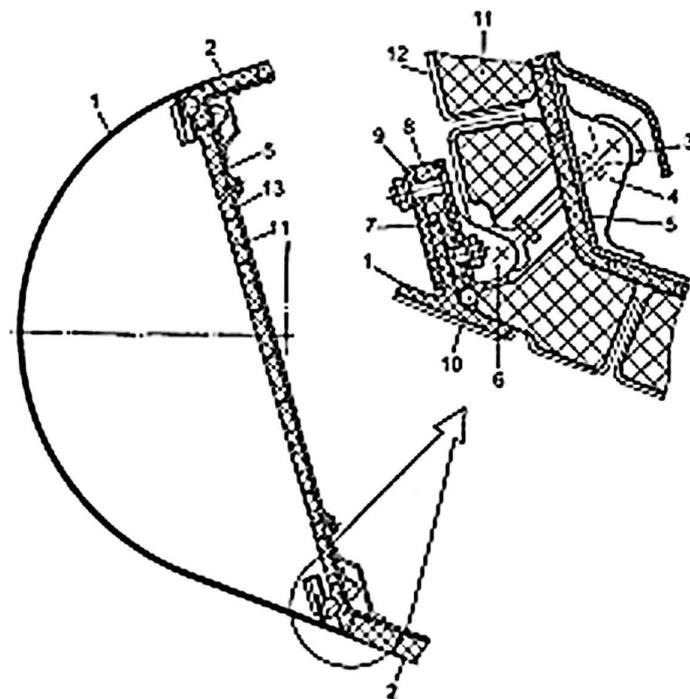


Рис. 1. Схема варианта установки носового кока космического корабля «Буран»:

1 – носовой кок; 2 – плиточная теплозащитная конструкция внешней конструкции фюзеляжа; 3 – тандер; 4 – кронштейн; 5 – передняя стенка фюзеляжа; 6 – кронштейн прижимного устройства; 7 – прижимное устройство; 8 – кольцо; 9 – сегмент; 10 – жгут уплотнительный; 11 – плиточная теплозащитная конструкция передней стенки фюзеляжа; 12 – внешние покрытие черного цвета; 13 – крышка люка

При установке носового кока на теплозащитную конструкцию передней стенки фюзеляжа одним из важных элементов является уплотнительный жгут 10, представляющий собой шнур с оплеткой и наполнением из жаростойких и теплоизоляционных материалов.

В соответствии с федеральной целевой программой [5] в АО «НПО Стеклопластик» на сегодняшний день разработана технология производства перспективного шнура с оплеткой и наполнением из крученых нитей оксида алюминия, обладающего высокой твердостью и износостойкостью, а также высокой температурной стойкостью (температура плавления около 2050 °С) [6]. Оплетка шнура выполнена из крученых нитей марки ОА–13–30×1×4×2–240 в два сложения, а наполнитель из крученых нитей марки ОА–11–20×1×3×2–120 выполнен в двадцать сложений. Так же, благодаря крученым нитям из оксида алюминия, шнур теоретически должен быть стоек к вибрации и термическим ударам, иметь высокие электроизоляционные свойства, обладать высокой прочностью, сохранять работоспособность при нагреве до 1000–1500 °С и иметь устойчивость к коррозии и истиранию.

В связи с перечисленными требованиями перед установкой упомянутого шнура из крученных нитей оксида алюминия в конструкцию (см. рис. 1) необходимо на начальных этапах испытаний количественно и качественно определить его основные свойства, к которым относятся: газопроницаемость (степень негерметичности), исходная сопротивляемость к действию сжимающей нагрузки, наличие остаточных деформаций по плоскости сжимающей нагрузки и стойкость к истиранию.

Для определения перечисленных свойств термоизоляционных шнуров рекомендуется использовать испытательные установки ТВК-4 и ТВАН-ВШ ЦАГИ (рис. 2, 3).

Установка ТВК-4 имеет следующие характеристики:

- минимальное давление – 0,08 мм. рт. ст.;
- температурный диапазон – от  $-150$  до  $+300$  °С;
- скорость изменения температуры – 10 град/мин;
- автоматическая система разгерметизации.

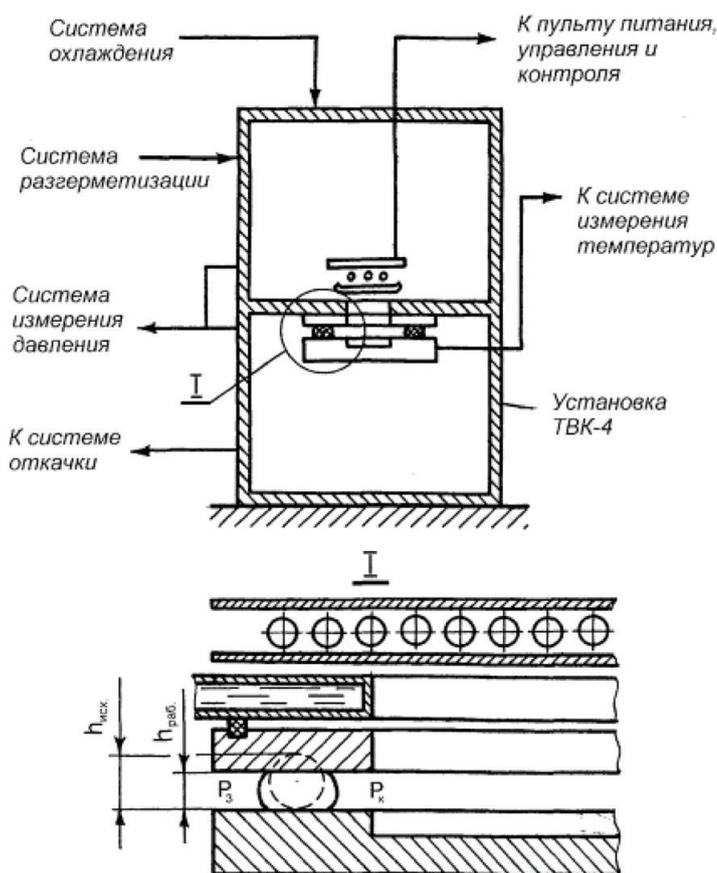


Рис. 2. Схема испытания жгута на газопроницаемость на установке ТВК-4:

$P_з$  – заданное давление;  $P_к$  – контролируемое давление

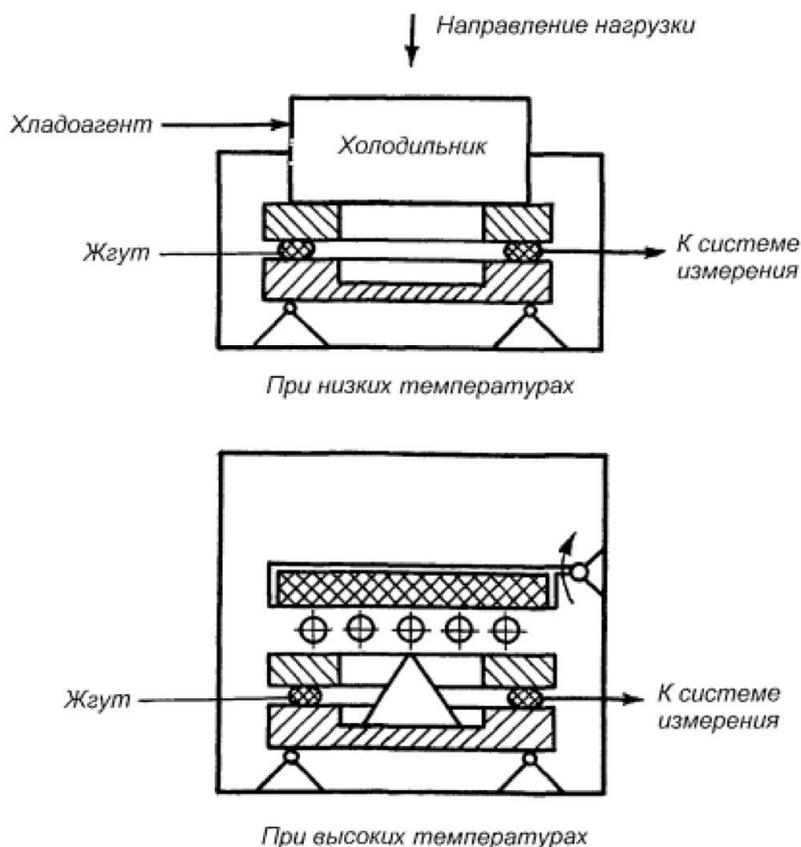


Рис. 3. Схема испытаний жгута на газопроницаемость на установке ТВАН-ВШ

Установка ТВАН-ВШ имеет следующие характеристики:

- нормальное атмосферное давление;
- температурный диапазон от +20 до +1300 °С;
- скорость нагрева – 7 град/с. [1].

На испытательной оснастке данных стендов возможно исследовать не только общие характеристики уплотнений, но и имитировать условия их деформации в штатных соединениях. На рис. 4 приведены примеры штатных узлов уплотнений (*а, б*) и способы их имитации на испытательной установке (*в, г*).

Для уплотнений, работающих в подвижных узлах, также большое значение имеет их стойкость к истиранию. Так, например, для защиты редуктора привода руля направления – воздушного тормоза (РН-ВТ) используется защитный кожух (ЗК), представляющий собой незамкнутую коническую оболочку, выполненную из стальных сотовых панелей. По линии сопряжения створок РН-ВК с конструкцией ЗК выполнены конструктивные зазоры, которые перекрыты уплотнением с повышенными требованиями к износостойкости.

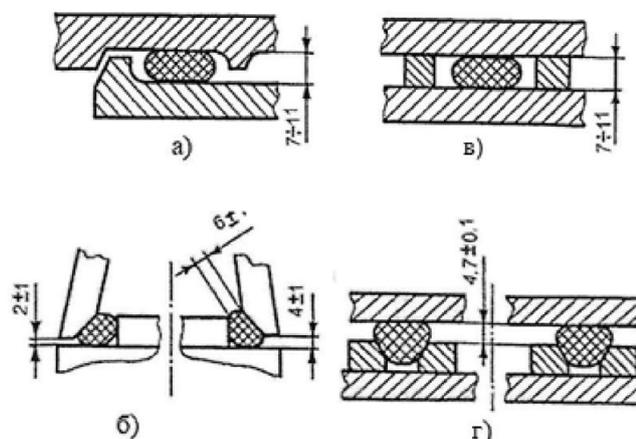


Рис. 4. Штатные узлы уплотнений (а, б) и условия их деформаций и способы их имитации на испытательной оснастке (в, г)

В процессе обработки изделия возможно отслеживать разрушение оплетки шнура и частичное высыпание его сердцевины, приводящее к появлению недопустимых зазоров между ЗК и РН-ВТ при штатных отклонениях РН-ВТ в пределах одного полета.

Целесообразность использования данных стендов для исследования основных свойств высокотемпературных наполненных шнуров из крученых нитей оксида алюминия подтверждается успешными натурными испытаниями жгута на основе нитевидных кристаллов карбида кремния ВТНК<sub>к</sub> с кварцевой оплеткой диаметром 14 мм, жгута на основе высокотемпературных волокон ВТТ с кварцевой оплеткой диаметром 14 мм и жгута на основе нитевидных кристаллов карбида кремния с оплеткой из нити Nextel диаметром 15,5 мм [1].

Программы исследований и разработок по созданию высокотемпературных уплотнений для КЛА в США выполнялись NASA по проектам, включающим несколько взаимосвязанных этапов. По результатам испытаний [2] NASA подтвердило решение о разработке конструкции гибких уплотнений под разрабатываемый узел уплотнения зазоров подвижных элементов двигателя, эффективно работающего в высокоскоростных потоках газов при температурах от 2000 до 2500 F (от 1093 до 1200 °С) только из керамических нитей Nextel™ 440 и 550 производства 3M Company [2–4].

## Выводы

Таким образом, в статье были рассмотрены уплотнительные шнуры из перспективного материала оксида алюминия, позволяющие более эффективно предотвращать проникновение теплового потока между элементами конструкции теплозащиты в местах установки створок, люков, элевонов

с крылом и рулей направления тепловой защиты КЛА. Проанализированы аналогичные исследования высокотемпературных уплотнений в США на примере керамических нитей Nextel™ 440 и 550. Для определения основных свойств перспективных высокотемпературных наполненных шнуров из крученых нитей оксида алюминия была рассмотрена технология установки носового кока на примере корабля «Буран» с расположением уплотнительного жгута, а также проанализировано и предложено эффективное испытательное оборудование российского производства ТВК-4 и ТВАН-ВШ.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Гофин, М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. – Москва: Твер. полигр. комб, 2003. – 671 с. – ISBN 5-93612-007-4.  
Gofin, M.Ya. Heat-Resistant and Heat-Protective Structures of Reusable Aerospace Vehicles. – Moscow: Tver. poligr. comb., 2003. – 671 p. – ISBN 5-93612-007-4.
- [2] Dellacorte, C. Sliding Durability of Candidate Seal Fiber Materials in Hydrogen from 25 to 900 °C. NASA Technical Memorandum 105939 / C. Dellacorte, B. Steinetz. – Cleveland, Ohio: Lewis Research Center, 1992. – 21 p. – URL: <https://www.ntrs.nasa.gov> (дата обращения 12.05.2024).
- [3] Steinetz, B.M. A Test Fixture for Measuring High-Temperature Hypersonic-Engine Seal Performance NASA Technical Memorandum 103658. – Cleveland, Ohio: Lewis Research Center, December 1990. – 20 p. – URL: <http://www.sti.nasa.gov>. (дата обращения 06.05.2024).
- [4] Dunlap, P.H. High Temperature Propulsion System Structural Seals for Future Space Launch Vehicles Technical Memorandum 2004-212907 / P.H. Dunlap, Jr. and B.M. Steinetz, J.J. DeMange [et al.]. – Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 2003. – 23 p. – URL: <http://www.sti.nasa.gov>. (дата обращения 12.05.2024).
- [5] Постановления Правительства Российской Федерации от 11.09.2008 г. № 658-25 «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009–2011 год и на период до 2015 года». – URL: <http://archive.government.ru/docs/436/> (дата обращения 24.10.2024).  
Resolution of the Government of the Russian Federation of 11.09.2008 No 658-25 “Development, Restoration and Organization of Production of Strategic, Scarce and Import-Substituting Materials and Low-Tonnage Chemicals for Weapons, Military and Special Equipment for 2009–2011 and for 2015”. – URL: <http://archive.government.ru/docs/436/> (date of application 24.10.2024).
- [6] Медведев, А.В. Шнур из крученых нитей оксида алюминия отечественного производства / А.В. Медведев. – DOI: 10.46418/0021-3489\_2020\_48\_2\_12 // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2020. – Том 48, № 2. – С. 59–63.  
Medvedev, A.V. Cord Made of Twisted Aluminum Oxide Yarns of Domestic Production / A.V. Medvedev. – DOI: 10.46418/0021-3489\_2020\_48\_2\_12 // News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry. – 2020. – Vol. 48, No 2. – P. 59–63.