

*А. М. Бахтиярова<sup>1✉</sup>, В. Р. Костылева<sup>1</sup>, М. С. Исмаилова<sup>1</sup>, Т. В. Ларина<sup>1</sup>*

## **От Земли до звезд: новые материалы, преодолевающие пределы космических технологий**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

**Аннотация.** На протяжении десятилетий космические исследования вызывают у нас восхищение тем, как человечество осваивает просторы Вселенной. Со временем новые технологии изменили подход к проектированию и созданию космических кораблей. Ракеты изготавливают из различных материалов, каждый из которых подбирается в зависимости от специфических требований и условий эксплуатации в космосе. Актуальность поиска новых материалов связана с улучшением определенных свойств и использованием этих материалов в различных эксплуатационных условиях. Важное значение в ракетостроении имеет масса космического аппарата, поэтому главная цель использования новых материалов: увеличение полезной массы за счет снижения веса самой ракеты. В статье представлены виды материалов в конструкциях космических аппаратов, а также основные требования к материалам, из которых изготавливают камеры сгорания, створки реактивных сопел, корпусных деталей камер сгорания.

**Ключевые слова:** космические материалы, ракетостроение, сплавы, композиты

*A. M. Bakhtiyarova<sup>1✉</sup>, V. R. Kostyleva<sup>1</sup>, M. S. Ismailova<sup>1</sup>, T. V. Larina<sup>1</sup>*

## **From Earth to the stars: new materials that overcome the limits of space technology**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

**Abstract.** For decades, space exploration has inspired us to marvel at how humanity has explored the vastness of the Universe. Over time, new technologies have changed the approach to designing and building spacecraft. Rockets are made from a variety of materials, each of which is selected depending on the specific requirements and operating conditions in space. The relevance of finding new materials is associated with improving certain properties and using these materials in various operating conditions. The mass of a spacecraft is of great importance in rocket engineering, so the main goal of using new materials is to increase the useful mass by reducing the weight of the rocket itself. The article presents the types of materials in spacecraft designs, as well as the main requirements for the materials from which combustion chambers, jet nozzle flaps, and combustion chamber body parts are made.

**Keywords:** space materials, rocket engineering, alloys, composites

### ***Введение***

Согласно уравнению Циолковского, приведенному ниже, масса ракеты – важная характеристика.

$$V_p = w \times \ln \left( \frac{m_p + m_r}{m_p} \right), \quad (1)$$

где  $V_p$  – скорость, приобретаемая ракетой после истечения всех газов из сопла реактивного двигателя;  $w$  – скорость истечения газов из двигателя ракеты;  $m_p$  – масса конструкции ракеты;  $m_r$  – масса газов, отброшенных ракетой.

Масса конструкции ракеты требует использования разные материалы, а они в свою очередь должны обладать определенными механическими и химическими свойствами, удовлетворяющими условиям эксплуатации ракет [1, 2].

Изделия космических аппаратов должны быть прочными, легкими, выдерживать как сверхнизкие, так и сверхвысокие температуры. Ряду таких свойств соответствует небольшая часть сплавов и материалов [3]. На рисунке ниже представлены основные материалы, использующиеся в космической индустрии (рис. 1).

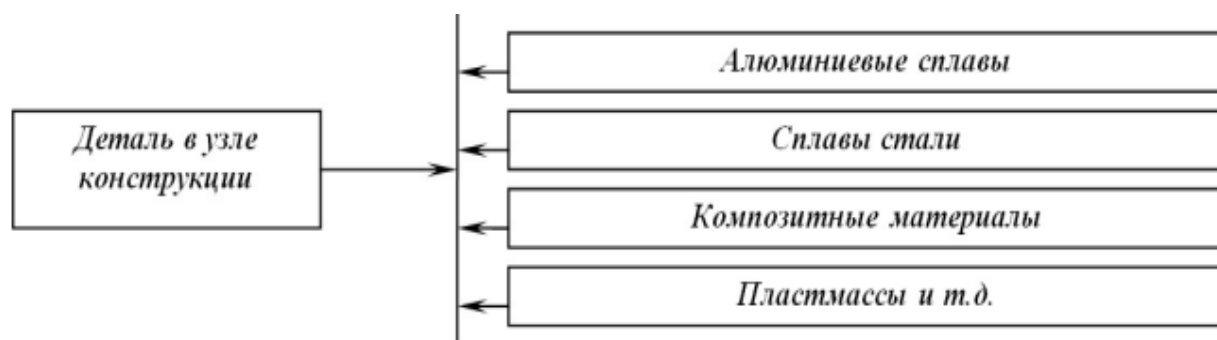


Рис. 1. Виды материалов в конструкциях космических аппаратов

Материалы в конструкциях космических аппаратов должны обладать высокими жесткостью и способностью конструкции сопротивляться разрушению и деформации.

Для увеличения прочности и жесткости конструкции космических аппаратов изменяется ее форма, что приводит к увеличению массы изделия.

Но благодаря созданию новых материалов, а именно композитов, можно делать переменные характеристики изделиям, работающим под разными нагрузками. Такое решение упрощает сборку и снижает массу конструкции [4, 5].

Композиты, включающие такие компоненты, как углеродное волокно и эпоксидную смолу, характеризуются высокой прочностью и жесткостью при небольшом весе. Они используются для создания крыльев и фюзеляжей космических аппаратов [6].

Внедрение композитных материалов позволяет уменьшить массу конструкции, повысить прочность и жесткость изделий ракеты, а также повысить их теплостойкость. Так, вместо обычного дюралюмина плотностью  $2640 \text{ кг/м}^3$  теперь используют боралюминиевые композиты, имеющие плотность  $750 \text{ кг/м}^3$  и предел механической прочности  $800 \text{ МПа}$ . Это в два раза больше, чем у дюралюмина

[7, 8]. На рисунке ниже представлена обшивка головной части ракеты-носителя «Ангара-а5», выполненной из композитных материалов (рис. 2).



Рис. 2. Ракета носитель «Ангара-а5»

Космическая ракета включает в себя несколько отсеков, которые изолированы от других частей аппарата (рис. 3).

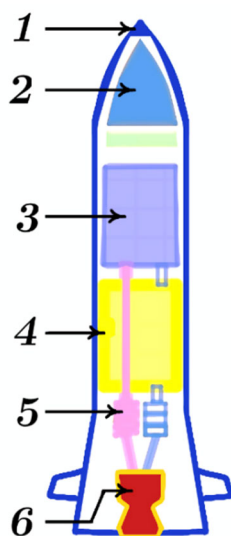


Рис. 3. Устройство ракеты: 1 – головная часть, 2 – приборный отсек, 3 – бак с топливом, 4 – окислитель, 5 – насосы, 6 – сопло

Реактивный двигатель – это устройство, создающее реактивную силу и состоящее из двух основных компонентов камеры сгорания и реактивного сопла.

Материалы, из которых изготавливают камеры сгорания, должны обладать следующими свойствами: высокая жаропрочность, высокое сопротивление усталости и трещинообразование при низкой скорости распространения трещин, хорошие характеристики теплопроводности и пластичности, а также высокая устойчивость к газовой коррозии. Корпусные детали камер сгорания изготавли-

вают из жаропрочных сталей, титановых сплавов и сплавов на никелевой основе [7].

Створки реактивных сопел сложной конфигурации, изготавливают из литейных сплавов, легированных такими металлами, как молибден и вольфрам, обладающими хорошей тугоплавкостью [9, 10]. Медные сплавы используются для изготовления стенок сопел ракетных двигателей у «Союзов», так как они обладают хорошей тугоплавкостью. Внутренняя стенка двигателя делается из меди, чтобы выдерживать высокую температуру, а внешняя стенка – из стали, чтобы держать механические нагрузки [11]. А серебро применяется в создании жидкостных реактивных двигателей, соединяя стальные и медные части камеры сгорания методом пайки в вакуумной печи [12]. В табл. 1 представлены характеристики материалов.

*Таблица 1*

#### Характеристики материалов

| Материал                                   | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Прочность при растяжении, МПа | Модуль упругости при растяжении, ГПа | Удлинение при разрыве, % |
|--------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Композиты                                  | 1,73–1,81                    | 4 500–7 000                   | 280–325                              | 1,7–2,1                  |
| Дюралюминий                                | 2,7–2,8                      | 390–440                       | 7,3–7,4                              | до 50                    |
| Серебро                                    | 10,491                       | 245–250                       | 82,7                                 | 50–59                    |
| Медные сплавы                              | 8,92                         | 200                           | 110–130                              | 60                       |
| Титановые сплавы (Ti-6Al-4V)               | 4,43                         | 1 280                         | 115                                  | 16                       |
| Керамика (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 3,96                         | 2 100                         | 434                                  | до 1                     |

Но на смену меди приходят более технологичные и легкообрабатываемые материалы: графит, эрозионно-стойкие пластмассы, углепластик. Данные материалы обладают хорошей теплопроводностью и прочностью [5].

Также инженеры начали внедрять титановые сплавы. Они используются для производства газовых баллонов высокого давления за счет своей тугоплавкости, высокой прочности, легкости и устойчивости к коррозии. Титановые сплавы BT14, BT23 используются для создания оболочек, стержней, резьбовых соединений космических кораблей, а также баков для хранения топлива и сжатых газов [13, 14].

Для космических аппаратов важно, чтобы из применяемого материала не выделялся газ, так как в космосе он может попасть на чувствительные элементы космического аппарата: оптические элементы и электронные устройства [3]. Это может повредить работе космического аппарата. Для того, чтобы обеспечить отсутствие газа в материале, добиваются полной полимеризации, чтобы не было

свободных несвязанных молекул, и они не высвобождались в космосе, оседая на чувствительных элементах аппарата.

Корпус должен держать форму под нагрузками, выдерживать вибрации, которые присутствуют при запуске ракеты. Также он должен соответствовать требованиям по пожаростойкости и химической стойкости – чтобы химические вещества батарей в случае прокола не разрушили конструкцию [15, 16].

Керамика обладает высокой термостойкостью, малым коэффициентом расширения при нагреве и низкой плотностью. За счет этих свойств, такие керамические материалы, как карбид кремния и оксид алюминия, используются для создания теплозащитных покрытий и других элементов космических аппаратов [17, 18]. Термозащитные плитки космических ракет состоят из высококремнеземного и боросиликатного стекла. Углерод-карбидные материалы также используются в элементах двигательных установок и защитных экранах [19, 20]. Ниже представлены термозащитные плитки Бурана (рис. 4).

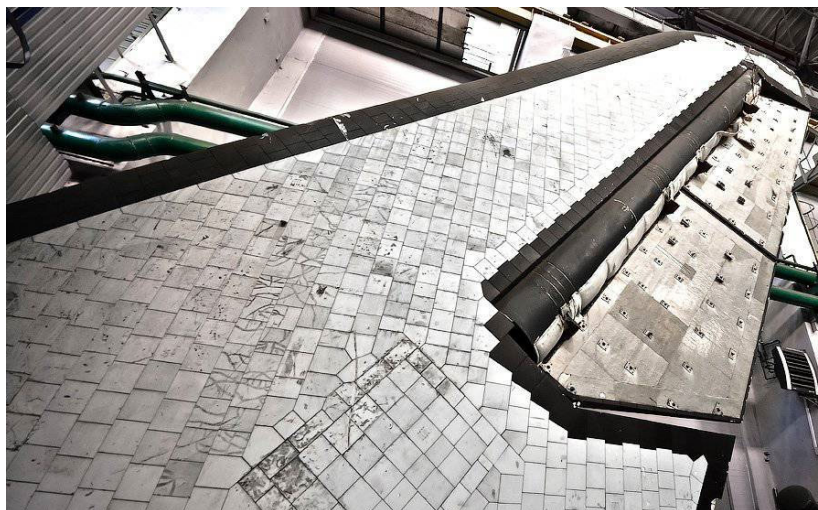


Рис. 4. Термозащитные плитки Бурана

### ***Заключение***

Все материалы, используемые в космических кораблях, выбираются для обеспечения прочности, легкости и устойчивости к вибрациям, коррозии, экстремальным температурам и радиации, что позволяет выводить аппараты на околоземную орбиту и успешно работать в условиях космоса. Все больше металлы и сплавы заменяют композитами, углеродными материалами, пластмассами, где это возможно. Уменьшение массы космических ракет позволяет увеличить массу полезного груза.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Куренков В.И., Сайгак В.М. Основные проектные параметры ракет-носителей: метод. указания к лабораторной работе. Самара: Самар. гос. аэрокос. ун-т. Самара, 1994. 12 с.
2. Ракетное уравнение Циолковского. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sas.com.ru/wp/ru/raketnoe-uravnenie-ciolkovskogo/> 10.05.25

3. Композиты для космоса: какими они должны быть и как их создают. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/smileexpo/articles/411337/> 11.05.25
4. Куренков В.И., Юмашев Л.П. Нагрузки, действующие на летательный аппарат: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1985. 19 с.
5. Куренков В.И. Аэродинамика летательных аппаратов: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1984. 16 с.
6. Куренков В.И. Внутренние усилия в элементах конструкций летательных аппаратов: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1986. 16 с.
7. Мишин В.П., Карраск В.К. Основы конструирования ракет-носителей: учеб. для студентов втузов. М.: Машиностроение, 1991. 260 с.
8. Ракеты и композиты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://compositesinfo.ru/rakety-i-kompozity/> 12.05.25
9. Харитонов В. Ф., Соловьев П. В. Материалы деталей авиационных двигателей. учеб. пособие. Уфа : УГАТУ, 2021. – 80 с.
10. Материалы камер сгорания и выходных устройств. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/2211714/page:14/> 09.05.25
11. Из какого металла делают спутники и/или ракеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/q/space/8332057601/> 12.05.25
12. Юмашев Л.П. Устройство ракет-носителей (сухие отсеки и топливные баки): учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. унт, 1995. 57 с.
13. Титановые сплавы. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://mazprom.ru/stati/titanovye-splavy/> 13.05.25
14. Волоцуев В. В., Ткаченко И.С. Введение в проектирование, конструирование и производство ракет: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2017. – 88 с.
15. Материалы, проверенные временем: из чего строят современные космические ракеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/6230-raketnye-metally-kak-zakalyalas-stal-i-drugie-metally/> 13.05.25
16. Овсянников В.Е., Шпитко Г.Н. Основы проектирования и конструирования машин: учеб. пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 75 с.
17. Применение современной керамики в области износостойких материалов. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techkingceramic.com/ru/news/applications-of-advanced-ceramics-in-the-field-of-wear-resistant-materials/> 14.05.25
18. Химическая и радиационная стойкость керамики. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2148> 14.05.25
19. Некоторые особенности покрытий для плиток многоразовой теплозащиты орбитальных космических кораблей. Статья. [Электронный ресурс]. URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=641](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=641) 15.05.25
20. Как уберечь космический корабль от превращения в пепел. Статья. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ferra.ru/review/techlife/heatshield.htm> 15.05.25

© А. М. Бахтиярова, В. Р. Костылева, М. С. Исмаилова, Т. В. Ларина, 2025