

УДК: 629.7.02

EDN: [NHSHXS](#)



## Композиционные материалы в ракетно-космической отрасли

**А.В. Кустов, Е.А. Рожкова, В.А. Бордачев\***

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия

\*E-mail: [vladimir27032001@mail.ru](mailto:vladimir27032001@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены небольшие характеристики стекловолокна, углеродного, армидного и кевлар волокон, которые относятся к композиционным материалам или коротко композитами. Для космической отрасли очень важны такие параметры, как масса и износостойкость, потому что чем больше вес в ракете, тем дороже выйдет её отправить в космос, именно по этой причине началось изучение новых материалов и их активное внедрение в космическую отрасль. Но прежде, чем активно внедрять в конструкцию те или иные волокна, необходимо подробно изучить их особенности, цену и доступность, так как есть вероятность что они просто будут невыгодны для массового производства или ухудшат качество выпускаемой продукции, что приведет к тем же потерям, из-за того, что не будет выполнена основная задача.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, волокна, свойства, структура

## Composite materials in the rocket and space industry

**A.V. Kustov, E.A. Rozhkova, V.A. Bordachev\***

Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, pr. gas. "Krasnoyarsk worker", 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia

\*E-mail: [vladimir27032001@mail.ru](mailto:vladimir27032001@mail.ru)

**Abstract.** The article presents small characteristics of fiberglass, carbon, aramid and kevlar fibers, which belong to composite materials or composites for short. For the space industry, such parameters as mass and wear resistance are very important, because the more weight in the rocket, the more expensive it will be to send it into space, it is for this reason that the study of new materials and their active introduction into the space industry began. But before actively introducing certain fibers into the design, it is necessary to study in detail their features, price and availability, since it is likely that they will simply be unprofitable for mass production or worsen the quality of products, which will lead to the same losses due to because the main task is not completed.

**Keywords:** composite materials, fibers, properties, structure

## 1. Введение

В проектировании космического летательного аппарата первоочередной задачей является уменьшение веса и увеличение полезной нагрузки. Многие достижения в области создания тонкостенных оболочек обязаны своим происхождением этому требованию.

## 2. Где используются материалы для поставленных задач и какие они бывают

В ракетно-космической технике имеют применение легкие сосуды и емкости, которые изготавливают из полимерных композиционных материалов, работающие под давлением, а также создают и эксплуатируют топливные баки, шары-баллоны, корпуса ракетных двигателей, силовые конструкции ракет, аккумуляторы давления, дыхательные баллоны для летчиков и космонавтов. Соответственно определенные материалы пойдут на конкретные задачи.

Но прежде, чем решать те или иные задачи, инженер должен изучить материалы. Их качество, износостойкость, стоимость, доступность и тому подобное, поэтому рассмотрим некоторые композиционные материалы.

### 2.1. Стекланные волокна

Стекланные волокна являются одним из наиболее распространенных видов армирующих наполнителей, которые используются при производстве композитов.

Диоксид кремния, иначе говоря, кварц, который используется при получении стекла, имеет высокую температуру плавления. Если требуется снижение уровня рабочих температур, то в исходный состав вводятся дополнительные компоненты, а они в свою очередь позволяют решать две задачи: получение стекла с определенными свойствами и выполнение требований к технологии. [1]

Также разрабатываются и производятся другие виды стекол, в основе которых специальные композиции исходных материалов, но они не везде находят применение и выпускаются в ограниченных объемах.

Стекловолокна разных марок, несмотря на различия в составе и назначении, обладают общими характерными свойствами, представленные на рисунок.1. Также, можно сделать дополнение, что электрические свойства проявляются в очень низкой электропроводности.



**Рисунок 1.** Основные свойства стекловолокна.

### 2.1.1. Положительные свойства стеклянных волокон

К плюсам стеклянных волокон можно отнести ещё то, что они не дефицитны, экологически чистые, недорогие, имеют простую технологию и неограниченную сырьевую базу для производства. Высокая удельная поверхность волокон и наличие на ней гидроксильных групп обеспечивает полное смачивание стеклянных волокон жидкими полимерными связующими и их растворами, по сравнению с объемными образцами стекол, которые обладают в 50 раз большей прочностью. [1]

Значения механических характеристик стекловолокон могут варьироваться в достаточно широких пределах, которые приведены в таблице. Основная проблема при выборе стекловолокна – максимально полный учет совокупности его свойств и его пригодности для применения в конкретных условиях эксплуатации.

### 2.1.2. Отрицательные свойства стеклянных волокон

К недостаткам стеклянных волокон относится их высокая хрупкость, порождающая резкое снижение прочности волокон вследствие наличия сетки поверхностных трещин субмикроскопической глубины. Сетка трещин, или сетка дефектов, уменьшает прочность стеклянного волокна, в связи с чем требуется защита волокон путем нанесения на их поверхность технологических или гидрофобно-адгезионных замазливателей прямого действия, проще говоря - аппретов, представляющих собой аминосиланы и другие кремнийорганические соединения. Аппретовые в свою очередь улучшают склеивание волокон и матрицы, создают эластичную низкомолекулярную полимерную пленку на поверхности элементарных волокон, улучшают смачиваемость стеклянного волокна связующим, способствуют увеличению адгезии, прочности сцепления на границе раздела стекло - полимер. К минусам

стеклянных волокон также следует отнести их относительно высокую плотность и низкий модуль упругости, сравнимые с аналогичными характеристиками для алюминиевых сплавов [2].

Благодаря сравнительно низкой стоимости и высокой прочности стеклянных волокон из полиэфирных и эпоксидных стеклопластиков методом пултрузии в большом объеме изготавливают длинномерные стержни, профили, трубы. Методом намотки получают трубопроводы для коммунального хозяйства и нефтегазовой промышленности, цилиндрические баллоны высокого давления для газобаллонных автомобилей и других транспортных средств, а также баллоны для дыхательных аппаратов пожарников, водолазов, промышленных рабочих.

## *2.2. Углеродные волокна*

На сегодняшний день широко исследуются, разрабатываются и выпускаются многочисленные типы и марки углеродных волокон, обладающих ценными, а по ряду показателей непревзойденными механическими и теплофизическими характеристиками, большим потенциалом развития и перспективами получения уникальных свойств. Кроме того, углеродным волокнам присущи высокая теплостойкость, низкие коэффициент трения и термического расширения, высокая стойкость к атмосферным воздействиям и химическим реагентам, а также самые высокие значения удельной прочности и модуля упругости при растяжении. Перечисленные свойства углеродных волокон определяют их широкое применение в качестве армирующих наполнителей композитных материалов с полимерной, углеродной, керамической и металлической матрицами.

### *2.2.1. Особенности и свойства углеродных волокон*

Углеродные волокна имеют различные электрофизические свойства от полупроводников до проводников. Они могут иметь сильно развитую поверхность, сохраняют свою прочность и жесткость при нагреве на воздухе до 300 °С. При более высоких температурах происходит термоокислительная деструкция, и свойства волокон резко падают. В вакууме или инертных средах свойства углеродных волокон сохраняются до 2200°С [3].

Отличительной особенностью углеродных волокон является их отрицательный температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур от –250 до +350 °С. Они обладают химической стойкостью в кислотах, щелочах и других агрессивных средах. Недостатком углеродных волокон является их плохая

смачиваемость, которая, наряду со сложностью строения, обуславливает трудность пропитки связующим. Для его устранения на поверхность волокон наносят специальные покрытия. Потенциальные возможности УВ определяются строением кристаллов графита, из которого они состоят, и теоретическими значениями характеристик его свойств.

В идеальном кристалле графита атомы углерода сгруппированы по базовым плоскостям. В каждой плоскости атомы связаны силами химического взаимодействия, между плоскостями действуют сравнительно слабые силы межатомного взаимодействия. Теоретические предел прочности и модуль упругости при растяжении вдоль атомных плоскостей составляют соответственно 100 и 1000 ГПа. Значения характеристик в направлении нормали к атомным плоскостям значительно ниже, например, модуль упругости равен 35 ГПа [4].

Реальные кристаллы графита отличаются от идеальных тем, что их атомные плоскости расположены дальше друг от друга, а степень ориентации самих плоскостей относительно оси кристалла существенно ниже. В связи с этим значения механических характеристик реальных кристаллов графита ниже своих теоретических значений.

В зависимости от степени реализации потенциальных свойств волокна принято подразделять на графитовые и углеродные. Графитовыми называют волокна с высокой степенью ориентации атомных плоскостей, что проявляется в высоких значениях модуля упругости это более 345 ГПа, углеродными – волокна с более низкими характеристиками их модуль упругости не превышает 345 ГПа [4].

Углеродные волокна получают из высокомолекулярных соединений волокнистой формы путем термической деструкции и последующего преобразования органических веществ в углерод. Исходное сырье в виде волокон должно удовлетворять следующим основным требованиям: не плавиться в процессе пиролиза, сохраняться как единое целое на всех стадиях термической обработки, давать высокий выход коксового остатка, перерабатываться в углеродные волокна с хорошими физико-механическими характеристиками, иметь приемлемую стоимость.

Углеродные волокна, так же, как и другие виды волокон, часто подвергаются дополнительной обработке, которая представляет собой обработку поверхности волокна и нанесение замасливателей. Эта операция позволяет повысить совместимость УВ со связующим и облегчает переработку волокон. В качестве покрытий применяются поливиниловый спирт, эпоксидные смолы, полиимиды и другие материалы. Основной

целью нанесения покрытий является улучшение связи волокон со связующим, поскольку именно этот фактор в значительной степени определяет механические свойства материалов на основе УВ, в особенности - сдвиговую прочность композитов.

### *2.3. Арамидные волокна*

Арамидные волокна относятся к группе ароматических полиамидных волокон. Они представляют собой химические волокна, приобретенные на базе линейных и волокнообразующих полиамидов, в которых не менее 85% амидных классов напрямую сопряжено с двумя ароматическими кольцами. Подобные волокна различаются высокими значениями прочности, модуля упругости, теплостойкости, а также химостойкости [5].

#### *2.3.1. Свойства арамидных волокон*

Высокопрочные арамидные волокна обладают значительными удельными прочностными и упругими характеристиками, ударной вязкостью, электрическим сопротивлением, химической стойкостью, хорошими теплоизоляционными свойствами. Впервые они стали известны под маркой «кевлар» [5].

Свойства волокон могут зависеть от состава исходного сырья, свойств использованных растворителей, условий технологического процесса получения волокон и условий термообработки сформованных нитей.

Можно подметить и тот факт, что в арамидных волокнах не повышается хрупкость при криогенных температурах. Арамидные волокна не плавятся, а карбонизируются при температуре выше 350 °С, имеют высокую ударную вязкость и низкую чувствительность к поверхностным повреждениям. Такие волокна применяют для получения высокопрочных и высокомодульных композитных материалов с полимерной матрицей, иначе говоря органопластиков.

#### *2.3.2. Получение арамидных волокон*

Арамидные волокнообразующие полимеры получают методом поликонденсации в растворе при низкой температуре (5... 10 °С). Полимер получают добавлением к раствору реагентов при интенсивном перемешивании. Полимер выделяется из исходного раствора в виде геля или крошки, затем промывается и высушивается. Полученный полимер растворяется в одной из сильных кислот, например, в концентрированной серной кислоте. Из раствора полимера методом экструзии через фильеры формируются

волокна и нити. Экструдированные волокна проходят небольшую воздушную прослойку и попадают в осадительную ванну с холодной водой (менее 4 °С). Волокно промывается, собирается на приемном устройстве и высушивается. На выходе из осадительной ванны волокно может подвергаться дополнительной обработке для повышения его механических характеристик [6].

### *2.3.3. Положительные характеристики*

Арамидные нити среди всех органических волокон имеют наиболее высокие эксплуатационные характеристики. Они отличаются устойчивостью к воздействию пламени, высоких температур, органических растворителей, нефтепродуктов и т. п. Арамидные волокна менее хрупки по сравнению с углеродными и стеклянными волокнами и пригодны для переработки на обычном оборудовании текстильных производств.

### *2.3.4. Отрицательные характеристики*

Недостатки арамидных волокон - невысокий предел прочности при сжатии, сравнительно низкая температура плавления (350 °С) и модуль упругости, усредненное значение которого в ортотропном волокнистом полимерном композиционном материале сравнимо со значением модуля упругости изотропного алюминиевого сплава (71 ГПа). При этом использован практически весь потенциал улучшения механических характеристик арамидных волокон.

## *2.4. Кевлар волокно*

Волокно кевлар представляет собой кристаллизующийся полимер. Химическая структура волокна отличается высокой степенью ориентированности и жесткости. Эти характеристики, в частности, обусловлены наличием в структуре большого количества ароматических колец. По своей структуре волокно кевлар может быть отнесено к сетчатым полимерам [7].

### *2.4.1. Природа волокна*

Жесткие полимерные цепи находятся в распрямленном состоянии и образуют очень плотную упаковку в объеме волокна, что определяет высокие механические свойства волокна типа кевлар. Кристаллическая природа полимера обеспечивает высокую термическую стабильность волокон, а наличие ароматических колец в структуре макромолекулы обуславливает химическую стабильность волокон. Благодаря

жесткой сетчатой структуре макромолекул арамидные волокна при нагревании не испытывают никаких фазовых превращений вплоть до температуры термического разложения [7].

#### *2.4.2. Применении кевлара*

Композитные материалы на основе кевлара применяются в авиации при изготовлении частей несущих конструкций, переборок, дверей, полов, обтекателей. При изготовлении военной техники и снаряжения эти материалы находят применение при производстве корпусов ракетных двигателей, пулезащитной одежды, легких бронеплит и т. п. Применение кевлара в данных изделиях связано с малой плотностью и высокой стойкостью к ударным нагрузкам.

#### *2.4.3. Свойства материала*

Невысокая плотность, хорошие демпфирующие свойства, гибкость способствуют применению кевлара при изготовлении спортивного снаряжения: лодок, клюшек и т. д.

#### *2.4.4. Применение кевлара*

Волокна кевлара в чистом виде либо в сочетании с каучуком используются при изготовлении канатов, которые находят применение в судостроении и горном деле, где они используются вместо стальных канатов. Достоинствами таких канатов являются малый вес, высокая прочность, высокая коррозионная стойкость и хорошие электроизоляционные свойства. Кевлар находит применение при изготовлении шин в качестве корда, где сочетание таких свойств, как малая плотность, хорошая вибростойкость, высокая прочность и коррозионная стойкость делают его более выгодным по сравнению с кордом из вискозных, полиэфирных волокон и стальной проволоки. [8]

### **3. Выводы**

Таким образом, проанализировав информацию про некоторые виды композиционных материалов, можно сказать о том, что их применение с металлической матрицей позволяет нам, при использовании в будущем в ракетно-космической отрасли, уменьшить массу ракеты на 10–50 %, тем самым увеличивая массу полезной нагрузки на 10–30 %. При этом применение армирования «усами» из оксида алюминия на основе вольфрама и молибдена, увеличивает прочность в два раза. Но всё это возможно при



правильно подобранном волокне, так что при изготовлении ракет, можно обратить внимание на относительно новые материалы, которые только вводятся в эту отрасль.

### Список литературы

1. Виртуальная среда обучения КНИТУ (КХТИ) [Электронный ресурс]. URL: [https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/216063/mod\\_resource/content/1/Армирующие%20наполнители%20для%20КМ.pdf](https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/216063/mod_resource/content/1/Армирующие%20наполнители%20для%20КМ.pdf) (дата обращения: 14.07.2022).
2. Баданина, Ю. В. Композиционные материалы в ракетно-космической технике : учебное пособие / Ю. В. Баданина, В. Д. Баскаков, А. Л. Галиновский [и др.] ; под редакцией Г. В. Малышевой. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – ISBN 978-5-7038-5136-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/172743> (дата обращения: 15.07.2022).
3. Михеев, А. Е. Ракетные и космические конструкции из композиционных материалов: учеб. пособие / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 128 с.
4. Электронная библиотека диссертаций disserCat [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-struktury-i-svoistv-kompozitsionnykh-materialov-na-osnove-sverkhvysokomolekulya> (дата обращения: 15.07.2022).
5. ВГТУ: статьи, руководства и инструкции на различные темы. [Электронный ресурс]. URL: [https://wiki.cchgeu.ru/index.php?title=Арамидные\\_волокна](https://wiki.cchgeu.ru/index.php?title=Арамидные_волокна) (дата обращения: 15.07.2022).
6. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1998.
7. Файловый архив для студентов. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5282548/> (дата обращения: 13.07.2022).
8. Publishing house Education and Science s.r.o. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rusnauka.com/32\\_PVMN\\_2011/Phisica/10\\_96571.doc.htm](http://www.rusnauka.com/32_PVMN_2011/Phisica/10_96571.doc.htm) (дата обращения: 14.07.2022).