

УДК 677.494
EDN VJUJEF (<https://elibrary.ru/vjujef>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2024.30.04.05



СВЕРХПРОЧНЫЕ ВОЛОКНА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРОСОВ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ*

Келбышева Е.С.¹, Данилин А.Н.¹, Фельдштейн В.А.^{1,2}

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

АННОТАЦИЯ

К настоящему времени композитные материалы приобрели большую популярность в технике и строительстве благодаря их уникальным свойствам, которые можно оптимизировать на стадиях разработки и проектирования. Без их использования уже не представляется возможным создание перспективных летательных аппаратов, судов, автомобилей, машин различного назначения. Применение композитов позволяет существенно снизить вес конструкций, сохраняя и улучшая их прочностные и другие эксплуатационные характеристики по сравнению с их аналогами из традиционных материалов: металлов, пластмасс, полимеров, стекла, керамики. Изделия из композитных материалов могут быть приспособлены к эксплуатации в экстремальных наземных и космических условиях. К таким изделиям относится «космический лифт» – гипотетическая система астрономического масштаба для безракетного вывода спутников на орбиту Земли и в открытый космос. Интерес исследователей к этой идее не ослабевает, охватывая различные инженерные и экономические аспекты. Конструкция основана на применении троса, удерживаемого одним концом на поверхности Земли, другим – в неподвижной относительно планеты точке выше геостационарной орбиты. От троса требуется чрезвычайно большая прочность на разрыв в сочетании с низкой плотностью.

В данном обзоре будут рассмотрены основные высокопрочные материалы и будут сделаны выводы о возможности использования этих материалов для создания высокопрочных тросов для систем наземно-космического применения.

Ключевые слова: композитные материалы; высокопрочные волокна; полимерные волокна; высокопрочные стали; тросы; наземно-космические системы; космический лифт

HIGH-STRENGTH FIBERS AS A PROMISING MATERIAL FOR CREATING CABLES FOR GROUND AND SPACE APPLICATIONS

Kelbysheva E.S.¹, Danilin A.N.¹, Feldstein V.A.^{1,2}

¹Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russia

* Работа выполнена в рамках исследования, поддержанного грантом Российского научного фонда (РНФ №22-19-00678).

ABSTRACT

Composite materials have become very popular in engineering and construction due to their unique properties, which can be optimized at the development and design stages. Without their use, it is no longer possible to create advanced aircraft, ships, cars, and various-purpose machines. The use of composites allows for a significant reduction in the weight of structures, while maintaining and improving their strength and other performance characteristics compared to their counterparts made of traditional materials: metals, plastics, polymers, glass, and ceramics. Products made of composite materials can be adapted for use in extreme terrestrial and space conditions. Such products include the "space elevator" - a hypothetical astronomical-scale system for rocket-free launch of satellites into Earth orbit and outer space. Researchers' interest in this idea is unabated, covering various engineering and economic aspects. The design is based on the use of a cable held at one end on the Earth's surface and at the other at a point above the geostationary orbit that is stationary relative to the planet. The cable is required to have extremely high tensile strength combined with low density. This review will examine the main high-strength materials and draw conclusions about the possibility of using these materials to create high-strength cables for ground-space applications.

Keywords: composite materials; high-strength fibers; polymer fibers; high-strength steels; cables; ground-space systems; space elevator

ВВЕДЕНИЕ

Основоположником космонавтики К.Э. Циолковским, обосновавшим ракетную технологию освоения космоса, была также высказана идея безракетного вывода спутников Земли на орбиту [1]. Идею, возникшую под впечатлением от Эйфелевой башни, он обрисовал в виде гигантской башни, достигающей геоцентрической орбиты, по которой можно поднять спутник на необходимую высоту. Как всякая идея, не противоречащая законам физики, она заслуживает объективного научного анализа, несмотря на очевидную неосуществимость проекта силами современных технологий.

Российский последователь этой идеи Ю.Н. Арцутанов модифицировал её, заменив башню, материал которой работает на сжатие, тросом, растянутым центробежной силой вращения Земли [2]. Впоследствии тема космического лифта неоднократно обсуждалась в отечественной и зарубежной литературе [3-14]. К ней непосредственно примыкают исследования космических тросовых систем, несомненно, уже имеющих реальную техническую перспективу [15-16].

Заметную долю стоимости космических миссий до сих пор составляет их доставка, что существенно тормозит развитие космонавтики. Космический лифт позволил бы людям совершать экономически выгодные путешествия в космос, регулярно доставлять грузы и эффективно проводить космические исследования и работы.

До настоящего времени уже опубликовано достаточно много работ по инженерным и экономическим проблемам космического лифта, который является совершенно особым наземно-космическим объектом. До сих пор далеко не все особенности функционирования космического лифта должным образом изучены. Очевидно, что решение проблемы «космического лифта» в целом может быть получено на «встречных курсах» технологии материалов, успехи которой позволят получить материалы с необходимыми свойствами, и механики, которая определит оптимальную конструкцию тросовой системы и обоснованно сформулирует требования к материалам [7-13,17,18].

В 21-м веке стали появляться компании, которые заявили о возможности создания такой системы. Этими компаниями стали интенсивно изучаться и даже производиться материалы, из которых планируется конструирование космического лифта [19-22]. Экономическая составляющая исследований по созданию космического лифта, подбор материалов и устройств является одной из ведущих задач [23-25]. В частности, начали разрабатываться композиционные нити, в которые в качестве добавок, повышающих прочность материала, были введены углеродные нанотрубки [26-28]. Однако данная идея не привела к позитивному итогу. И в мире продолжают поиск и разработки новых сверхпрочных материалов с низкой плотностью и улучшенными термомеханическими свойствами, легких и одновременно долговечных, огнестойких, химически стойких и термически стабильных. Данный обзор посвящен сверхпрочным материалам, из которых в перспективе можно было бы создать трос для наземно-космических применений.

Прочность материалов на разрыв является одной из главнейших их характеристик. Значения удельной прочности материалов особенно важны для авиастроения, ракетостроения, космической техники. Удельная прочность имеет фундаментальное значение при выборе материалов для крупногабаритных космических тросовых систем, к которым относится космический лифт.

Необходимо заметить, что обычно высокая удельная прочность является признанным фактором весового совершенства конструкции. В данном случае повышение удельной прочности за счет снижения плотности материала важно и по той причине, что все нагрузки на трос являются инерционными или гравитационными, пропорциональными массе. Поэтому повышение удельной прочности материала не только увеличивает несущую способность, но и одновременно снижает внешние нагрузки. Отметим, что фонд Spaceward, отдавая дань заслугам Юрия Николаевича Арцутанова в пропаганде идеи космического лифта, предложил ввести единицу эффективности материала: отношение разрывного напряжения (временного сопротивления) к плотности материала: *Юрий* ($Yuri = \sigma_g / \rho$). Это отношение, известное как *удельная прочность*, широко употребляется в технике.

В работе [29] показано, что этому критерию можно дать также динамическое истолкование на «частотном» языке. Применительно к космическому лифту более правильно было бы присвоить наименование *Yuri* безразмерному параметру $\lambda_a = \Omega r_0 / a$, который связывает и свойства материала, и угловую скорость вращения Земли Ω , определяющую нагрузки на эту специфическую конструкцию; $a = \sqrt{\sigma / \rho}$ – скорость поперечных волн в тросе; $r_0 = \sqrt[3]{\gamma M_3 / \Omega^2} \approx 42000$ км – радиус геостационарной орбиты; M_3 – масса Земли; $\Omega r_0 \approx 3000$ м/с – линейная скорость на геостационарной орбите, которая сопоставима со скоростью упругих волн даже в существующих материалах.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Значительную группу высокопрочных материалов представляют конструкционные стали [30], которые обладают не только высокой прочностью (пределом прочности от 420 до 1300 МПа), но также высокой пластичностью, вязкостью и хорошей свариваемостью и т.д. Стали, у которых предел прочности

при растяжении превышает 1300 МПа, называются сверхпрочными (UHS – Ultrahigh-strength steels). Такие стали широко используются в критически важных отраслях промышленности, например, при изготовлении сложных и ответственных конструкций, таких как шасси самолётов, корпуса ракет и подводных лодок, судовые валы и винты, уплотнительные кольца и пр. Помимо прочности, существуют и другие важные факторы, которые всегда являются определяющими при выборе материалов. Высокая прочность должна сочетаться с вязкостью, чтобы противостоять разрушению, пластичностью для обеспечения коэффициента безопасности в процессе эксплуатации и устойчивостью к коррозионным повреждениям [31-33]. Свойства большинства новых материалов сравнивают со свойствами высокопрочных сталей, которые рассматриваются как условный эталон, прежде всего, ввиду их прочностных и ресурсных свойств.

В работе [34] представлена новая микроструктура стали, состоящая из тонких кристаллов феррита, масштаб которых сравним с масштабом углеродных нанотрубок. Кристаллы образуются в результате частичной трансформации аустенита, что приводит к необычному сочетанию прочности, твердости и ударной вязкости. Причём, такие свойства приобретает материал без использования дорогих легирующих элементов. Авторами предложена технология производства сверхпрочной стали, которую можно использовать для изготовления изделий, в том числе, больших размеров, без специальной термомеханической обработки, быстрого охлаждения. Предел прочности новой стали около 1400 МПа, причём материал дешевле в производстве.

Тем не менее, такие стали имеют и ряд недостатков, прежде всего, большой вес. Изделия после отливки из этого материала обладают обратимой отпускной хрупкостью, поэтому подвергаются температурной обработке, вследствие чего металл становится мягче и снижается его сопротивление усталости. В результатековки и прокатки элементы из конструкционной стали приобретают строчечную структуру. Кроме того, в местах деформирования их свойства становятся неоднородными. Такой материал впоследствии с трудом поддается резке. В связи с этим в последнее время активно изучается возможность получения композиционных материалов, где в качестве армирующего компонента выступают стальные волокна. В работе [35] предложен композитный материал, армированный стальными волокнами диаметром 22 мкм с модулем упругости 193 ГПа, пределом прочности до разрушения 20%. Результаты этого исследования показали, что использование стальных волокон в композите является многообещающим методом повышения трещиностойкости композитных соединений. Для улучшения пластичности жестких, армированных стальными волокнами композиционных материалов, добавляют также стекловолокна. Например, в работе [36] исследован механизм разрушения такого сложного композита по оценке поглощения в структуре материала энергии внешнего воздействия, а также способность сопротивления материала при повторном нагружении.

Очевидно, что сверхпрочные стали не найдут применение в изготовлении основного элемента космического лифта – троса. Однако они, безусловно, найдут применение в изготовлении силовой арматуры, космического челнока, стартовой и орбитальной платформ, инфраструктуры.

2. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

С открытием углеродных нанотрубок (УНТ) японским ученым С. Иджимой в 1991 г. стало возможным реалистично обсуждать строительство космического лифта [37-39]. К группе сверхпрочных материалов на основе углерода относят: УНТ, графен, углеродное волокно и композиты на их основе. Теоретически, УНТ обладают прочностью на разрыв 120 ГПа, что существенно больше, чем у стали – 0.7 ГПа [40]. Однако на практике самая высокая растяжимость однослойной нанотрубки была получена при 52 ГПа, а в среднем они ломались в диапазоне 30-50 ГПа. Для космического лифта необходимы материалы с прочностью 65-120 ГПа. Что касается плотности нанотрубок, то она примерно в 6 раз меньше плотности стали (УНТ – 1300 кг/м³, сталь – 7900 кг/м³) [41]. Подробно механические свойства нанотрубок описаны в работе [42].

Существуют несколько методов получения каждого вида УНТ на основе электрического дугового разряда, химического осаждения из паровой фазы (метод CVD – Chemical Vapor Deposition) и лазерного испарения. Для изучения атомной структуры УНТ и их классификации используют квантовый метод Монте-Карло (QMC), представляющий собой современный вычислительный подход к получению высокоточных волновых функций квантового состояния вещества. На его основе в сочетании с методом пространственного преобразования координат SWCT (Space-Warp Coordinate Transformation) УНТ классифицируются как прямые или ахиральные ($m \neq n$), зигзагообразные ($m = 0$) и кресельные или зубчатые ($m = n$). Два параметра n и m определяют одну из основных характеристик нанотрубки – ее хиральность, т.е. возможность или невозможность совмещения со своим зеркальным изображением. Основная классификация нанотрубок проводится по способу сворачивания графеновой плоскости, который задается числами n и m .

Однако и этим сверхпрочным материалам присущи недостатки [43]. К основному можно отнести склонность к окислению на воздухе, химическую активность при взаимодействии с металлическими матрицами, относительно слабую адгезию к полимерным матрицам, что требует дополнительной обработки поверхности волокон для повышения их адгезии с матрицей. Следует отметить, что прочность троса из углеродных нанотрубок в значительной степени зависит от наличия в структуре материала дефектов, которые бывают в виде nanoотверстий и nanoтрещин [44].

В работе [41], учитывая влияние микрометеоритов, предложен трос ленточной конструкции. Традиционно, УНТ-композиты состоят из 60% углеродных нанотрубок и 40% эпоксидного композита. Для уменьшения массы эпоксидного компонента (вплоть до 2% по массе) в работе предложена структура троса в виде чередующихся секций композитных и голых нанотрубок. Предполагается, что секции эпоксидного композита будут иметь минимальную длину 100 мкм и использоваться для соединения сегментов углеродных нанотрубок по 4 мм длиной для изготовления троса в целом. Сегменты углеродных нанотрубок предлагается формировать из параллельных (вдоль оси троса) и диагональных нанотрубок прессованием, считая, что отказ отдельной углеродной нанотрубки не повлияет на группу и что дефекты не увеличатся в размере. Однако, как показано в работе [44], даже один небольшой дефект может оказать большое влияние на прочность УНТ. Например, потеря всего лишь одного шестиугольного кольца снижает предел прочности на разрыв углеродной

нанотрубки со 105 ГПа до 70 ГПа и углеродного волокна с 88 ГПа до 56 ГПа [44]. Предполагая существование дефектов, больших, чем одно шестиугольное кольцо, трос из УНТ, скорее всего, сохранит прочность около 30% от прочности бездефектного троса из УНТ. Прочность троса после учёта дефектных нанотрубок составляет менее 36 ГПа, что существенно меньше прочности бездефектного троса (63 ГПа), и тем более, требуемой прочности при эксплуатации (120 ГПа). Это обстоятельство является основной причиной невозможности создания троса космического лифта в обозримом будущем. Тем не менее, исследования в данной области продолжаются. Идет поиск наиболее эффективных катализаторов для выращивания идеальных и наиболее прочных углеродных нанотрубок [45].

Достижения в области нанотехнологий активно применяются в области аэрокосмической техники. Одно из перспективных направлений является создание армированных УНТ керамических композитов [46]. Кроме того, активно развиваются технологии армирования полимерных материалов УНТ и изучаются возможности их использования в аэрокосмической области [47]. В качестве полимерных матриц используют: полиамиды (ПА), полиимиды (ПИ), эпоксидную смолу, полиуретан (ПУ) и полипропилен (ПП), с помощью которых были синтезированы многочисленные нанокомпозиты [48]. Более того, УНТ применяются в качестве добавочного материала в полимерах, в основном поликарбонатах (ПК), эпоксидных смолах, полиэтиленах, полиамидах, полистироле (ПС) и полиуретане [49].

3. ПОЛИМЕРНЫЕ ВОЛОКНА

Из-за невозможности на данном этапе развития химических технологий получения идеальных углеродных наноматериалов с требуемыми прочностными характеристиками актуальной задачей является разработка и последующее применение новых полимерных материалов повышенной прочности, которые кроме всего прочего имеют сниженную конечную массу. При этом необходимо учитывать возможное изменение свойств полимера в процессе эксплуатации конечного изделия, например, при изменении влажности, резких перепадах температуры, при воздействии облучения и сильных ветрах. При выборе материала необходимо принимать во внимание также экономические аспекты, простоту технологий производства, доступность исходных реагентов.

Увеличение прочности материалов обеспечивается путём применения композитов, состоящие из высокопрочных волокон и мягкой матрицы [50]. Основную нагрузку принимают на себя волокна, а матрица обеспечивает сохранение формы и относительно равномерное распределение нагрузки между волокнами.

К полимерным материалам, обладающим наибольшей удельной прочностью, относят: вектран (VectranVR), кевлар (KevlarVR), зилон (ZylonVR) и полиимиды (например, каптон (KaptonVR)). Данные материалы (в том числе в виде волокон) уже активно применяются в ряде областей. Тем не менее, в литературе появляется много новых работ, расширяющих потенциал использования новых полимерных материалов. Перечисленные и другие материалы широко используются в аэрокосмической и других областях применения, где экономия веса оправдывает более высокую стоимость материала.

Одним из наиболее прочных полимерных материалов является кевлар (прочность около 3.6 ГПа и плотность 1440 кг/м³), который представляет собой

пара-арамидное волокно (полипарафенилен-терефталамид), выпускаемое фирмой DuPont. Обзор работ по деформационному поведению и прочности волокон кевлара и композитов, армированных волокнами кевлара, при механическом воздействии и ударе приведен в работе [51]. Авторы отмечают высокие прочностные характеристики кевлара, одновременно указывая на негативное влияние на прочностные свойства материала солнечного света (УФ – ультрафиолета) и влажности окружающей среды, что существенно ограничивает области применения кевлара и композитов на его основе. Следует отметить, что исследования по воздействию на материал УФ и влажности, которые часто приводят к ухудшению механических свойств, в наибольшей степени востребованы в аэрокосмической отрасли [52]. Тем не менее, волокна кевлара активно изучаются [53-54]. Помимо воздействия на прочностные характеристики УФ и влажности, волокна из кевлара также испытывают и на воздействие озона [55]. Было показано, что прочность на разрыв волокна постепенно уменьшалась с увеличением концентрации озона и времени воздействия. Когда концентрация озона увеличивалась с 0 pphm до 1000 pphm, прочность на разрыв волокна уменьшалась с 2397 МПа до 2059 МПа. С увеличением времени воздействия озона с 0 ч до 1000 ч при концентрации озона 1000 pphm прочность на разрыв волокна уменьшалась с 2332 МПа до 1954 МПа. Отмечается, что увеличение прочности композитных волокон на основе кевлара можно добиться, распределяя различным образом слои волокон, меняя их количество и ориентацию волокон в композите [56].

В настоящее время в аэрокосмической отрасли помимо кевлара активно применяют промышленные волокна вектрана [57-58]. Вектран представляет собой волокно, полученное из жидкокристаллического полимера, созданного корпорацией Celanese, а в настоящее время производимое компанией Kuraray. Химически это ароматический полиэфир, получаемый поликонденсацией 4-гидроксibenзойной кислоты и 6-гидрокси-нафталин-2-карбоновой кислоты [59]. Вектран относится к высокопрочным материалам, так как при определенной обработке его прочность на разрыв составляет 2900 МПа при плотности 1.4 г/см³ [60]. Ранее на основе вектранового волокна был разработан сверхпрочный и, в то же время, сверхлегкий щит для защиты космических конструкций от космического мусора [61]. Однако, так же как и в случае кевлара, механические характеристики изделия из волокон вектрана заметно ухудшаются при воздействии на материал УФ излучения и влажности. Как показано в работах [62], при УФ-облучении образцов в течение 186 часов средняя потеря прочности на разрыв волокна вектран составила около 43%, что связано с деградацией и структурными изменениями. Отмечается, что скорость деградации и количество разрывов цепи на воздухе резко увеличивается по сравнению с инертной атмосферой азота, что говорит о прямом взаимодействии УФ-облучения с кислородом воздуха, создавая гидроксильные концевые группы ОН/СООН в воздушной атмосфере.

Также к высокопрочным относятся волокна, полученные из зилона [63,64]. Однако волокна из зилона имеют низкое адгезионное сродство с различными матрицами, в том числе с эпоксидными смолами [65]. С целью оценки и улучшения эксплуатационных характеристик тросов создают так называемый гибридный волокнистый композитный сэндвич-сердечник [66]. В таких исследованиях трапециевидные гофрированные стекловолоконные сэндвич-структуры были гибридизированы с использованием волокон кевлара и зилона

для улучшения прочностных динамических ударных характеристик. Композитные сердечники были изготовлены из четырех слоев стекловолокна, и один из слоев был заменен либо слоем кевлара, либо зилона для создания гибридного композитного сердечника (соотношение стекла к кевлару или стекла к зилону 75:25). Подобные гибридные волокнистые материалы описаны и в работе [67]. Волокна зилона и РЕЕК (полиэфирэфиркетон) были сплетены в равных соотношениях, а затем подвергнуты компрессионному формованию для получения однонаправленных (UD) и двунаправленных (BD) композитов. Характеристики полученных композитов были сравнены с характеристиками чистого РЕЕК. Было отмечено, что для композита UD по сравнению с чистым РЕЕК было достигнуто исключительное увеличение ударной вязкости и прочности: на 10000% и на 662% соответственно.

В настоящее время интенсивно изучаются механические свойства высокопрочных волокон на основе полиимидов [68-70], в том числе и для последующего применения полиимидных волокон в аэрокосмической отрасли [71-73]. Из литературы [74] известно, что высокопрочные полиимидные волокна представляют собой тип нового высокопроизводительного органического волокна с начальным модулем выше 90 ГПа и чрезвычайно высокой прочностью на разрыв более 2,5 ГПа. В работе [74] авторы показывают, что прочностные характеристики нитей зависят от технологии их переплетения при двухстадийном процессе имидизации. Уменьшать влияние влаги на прочностные характеристики полиимидного волокна научились, используя функционализацию их графеном [75]. Показано, что на адгезионные свойства полиимидных волокон можно влиять, обрабатывая их плазмой [76]. Следует отметить, что одним из преимуществ полиимидных волокон являются их особые термопластичные свойства [77].

Одним из самых распространённых полимеров данного класса является каптон. Систематическое название полимера: поли(4,4'-оксидифениленпиромеллитимид) [78]. В работе [79] описана разработка армированных волокнистых ламинатов для оболочки (корпуса) высотных дирижаблей, использующей этиленвиниловый спирт (EVOH) в качестве слоя клеевого компонента. Данные ламинаты также являлись гибридными тканями, в основе которых поли(п-фениленбензобисоксазол) (зилон), металлизированный полиэфир (MylarVR) и каптон. Материалы имели прочность от 702 до 970 Н/см. Эти сверхпрочные ламинаты с базовым весом в диапазоне от 103 до 113 г/м² являются самыми легкими материалами на сегодняшний день. Кроме того, данные материалы обладают устойчивостью к УФ-излучению и видимому свету (УФ-Вид). Хотя, как показано в работе [80], что полиимидные материалы остаются подверженными при воздействии комбинации высокоэнергетических электронов, протонов и ультрафиолетовых фотонов и частиц, в первую очередь ответственных за радиационно-индуцированные повреждения на геостационарной орбите Земли (GEO), которые радикально изменяют свойства ПИ.

В работе [81] авторы указывают на то, что теоретические (расчетные) прочностные характеристики полимерных волокон значительно выше их реальных, полученных экспериментальным путем. Поэтому стало больше работ, связанных с разработкой различных волокнистых металлических ламинатов (ВМЛ), которые представляют собой супергибридный материал, который обеспечивает объединенные преимущества металлов и композитов и предлагает значительный

потенциал в качестве сверхлегкого конструкционного материала в аэрокосмической промышленности [82-84].

Очевидно, использование волоконистых материалов в индивидуальном виде уже не актуально из-за значительного количества недостатков, присущих этим волокнам и связанных как с невозможностью получить бездефектные волокна, так и структурной нестабильностью в различных агрессивных условиях (высокие температуры, излучения, озон, влага и т.д.). Тем не менее, комбинация материалов с различными свойствами и преимуществами позволит получить новые гибридные многослойные сверхпрочные материалы, которые могут быть использованы при конструировании троса для космического лифта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Циолковский К.Э. *Грезы о Земле и небе*. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – 96 с.
2. Арцутанов Ю.Н. *В космос без ракет: новая идея космического старта // Знание – сила*. – 1969. – №7. – С.25.
3. Белецкий В.В., Иванов М.Б., Отставнов Е.И. *Модельная задача о космическом лифте // Космические исследования*. – 2005. – Т.43. – №3. – С.157-160.
4. Поляков Г.Г. *Обобщенные задачи о космическом лифте // Известия АН СССР. Механика твердого тела*. – 1972. – №6. – С.54-59.
5. Шошунов Н.Л. *Космический лифт: надежды и проблемы // Полет*. – 2006. – №3. – С.53-60.
6. Okino T., Yamagiwa Y., Arita S., Ishikawa Y., Otsuka K. *Three-dimensional analysis of a counterweight type space elevator // Acta Astronaut.* – 2021. – Vol.185. – Pp.132-139.
7. Smitherman D.V. *Space elevators: an advanced earth-space infrastructure for the new millennium // NASA/CP-2000-210429*. – 2010.
<http://www.spaceelevator.com/docs/elevator.pdf>.
8. Miao M. *Yarn spun from carbon nanotube forests: Production, structure, properties and applications // Particuology*. – 2013. – Vol.11. – Pp.378-393.
9. Edwards B.C. *The Space Elevator*. Houston, TX: BC Edwards, 2003. – 280 p.
10. Perek L. *Space Elevator: Stability // Acta Astronaut.* – 2008. – Vol.62. – No.8-9. – Pp.514-520.
11. Artukovic R. *The Space Elevator. Physical Principles*. www.zadar.net/space-elevator
12. Contant-Jorgenson C., La'la P., Schrogl K.-U. *The IAA cosmic study on space traffic management // Space Policy*. – 2006. – Vol.22. – Pp.283-288.
13. Садов Ю.А., Нуралиева А.Б. *О концепции нагруженного секционированного космического лифта*. – М.: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2011. – 24 с.
14. Нуралиева А.Б. *О динамике троса космического лифта. Дисс. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук*. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2012 – 103 с.
15. Белецкий В.В., Левин Е.М. *Динамика космических тросовых систем*. – М.: Наука, 1990. – 329 с.
16. Danilin A.N., Grishanina T.V., Shklyarchuk F.N., Buzlaev D.V. *Dynamics of a space vehicle with elastic deploying tether // Comput. & Structures*. – 1999. – Vol.72. – No.1-3. – Pp.141-147.

17. Demczyk B.G., Wang Y.M., Cumings J., Hetman M., Han W., Zettl A., Ritchie R.O. *Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes* // Mater. Sci. Eng.: A. – 2002. – Vol.334. – Pp.173-178.
18. Bakulin V.N., Danilin A.N., Karnet J.N., Nikitin S.M., Feldstein V.A. *Quantum-chemical simulation for production technologies of high-strength Zylon fibers* // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol.446. – 03004.
19. Aravind P.K. *The physics of the space elevator* // Am. J. Phys. – 2007. – Vol.75. – Pp.125-130.
20. Edwards B.C. *The space elevator: concept overview* // Space 2002 and Robotics. – 2002. – Pp.77-83.
21. Smitherman D.V. *Technology development and demonstration concepts for the space elevator* // 55th International Astronautical Congress (Canada, Vancouver). – 2004. – Pp.1-11.
22. Kundu K. *Evaluation of Structural Materials for Space Elevator Applications* // IRJET. – 2022. – Vol.09. – Pp.328-333.
23. Yazici A.M. *An Investigation on The Economic Feasibility of Space Elevator* // J. Aviation and Aerospace studies. – 2020. – Vol.1. – Pp.33-47.
24. Raitt D., Edwards B. *The space elevator: economics and applications* / 55th International Astronautical Congress (Vancouver, Canada). – 2004.
25. Barry K., Alfaro E.P. *Changing the economic paradigm for building a space elevator* // Acta Astronautica. – 2022. – Vol.200. – Pp.586-598.
26. Berthelot M. *Carbon Nanotubes as a Material for a Space Elevator Cable* // da Vinci's Notebook. – 2014. – Vol.6.
27. Pugno N.M. *On the strength of the carbon nanotube-based space elevator cable: from nanomechanics to megamechanics* // J. Phys.: Condens. Matter. – 2006. – Vol.18. – Pp.1971-1990.
28. Prabhakaran R. *Nano composites for Space Applications* // J. Aerospace sciences and technologies. – 2015. – Vol.67. – Pp.1-17.
29. Danilin A.N., Denisov E.A., Onuchin E.S., Feldstein V.A. *Mechanical Model of a Space Elevator. Statics* // Russian Aeronautics. – 2023. – Vol.66. – No.3. – Pp.432-442.
30. Huiyong Ban, Gang Shi, Yongjiu Shi, Yuanqing Wang. *Research Progress on the Mechanical Property of High Strength Structural Steels* // Adv. Mater. Res. – 2011. – Vol.250-253. – Pp.640-648.
31. Sun M., Xiao K., Dong C.F., Li X.G., Zhong P. *Stress Corrosion Cracking of Ultrahigh Strength Martensite Steel Cr9Ni5MoCo14 in 3.5% NaCl Solution* // Aerosp. Sci. Technol. – 2014. – Vol.36. – Pp.125-131.
32. Tian J., Wang W., Babar Shahzad M., Yan W., Shan Y., Jiang Z. *A New Maraging Stainless Steel with Excellent Strength-Toughness-Corrosion Synergy* // Materials. – 2017. – Vol.10. – 1293.
33. Wang L.D., Jiang L.Z., Zhu M., Liu X., Zhou W.M. *Improvement of Toughness of Ultrahigh Strength Steel Aermet 100* // J. Mater. Sci. Technol. – 2005. – Vol.21. – No.5. – Pp.710-714.
34. Bhadeshia H.K.D.H. *Bulk nanocrystalline steel* // Ironmaking and Steelmaking. – 2005. – Vol.32. – Pp.405-410.
35. Quan D., Urdániz J.L., Rouge C., Ivanković A. *The enhancement of adhesively-bonded aerospace-grade composite joints using steel fibres* // Composite Structures. – 2018. – Vol.198. – Pp.11-18.

36. McBride A.K., Turek S.L., Zaghi A.E., Burke K.A. *Mechanical Behavior of Hybrid Glass/Steel Fiber Reinforced Epoxy Composites* // *Polymers*. – 2017. – Vol.9. – 151.
37. Watson K.A., Connell J.W. *Polymer and carbon nanotube composites for space applications* / In book: *Carbon Nanotechnology*. – Elsevier, 2006. – Chapter 19. – Pp.677-698.
38. Wright D.H., Bartoszek L., Burke A.J., Dotson D., El Chab H., Knapman J., Lades M., Nixon A., Phister P.W., Robinson P. *The Climber-Tether Interface of the Space Elevator* // *International Space Elevator Consortium Spring*. – 2023. ISEC Study Report #2023-1 Preprint.
39. Bhat A., Budholiya S., Raj S.A., Sultan M.T.H., Hui D., Md Shah A.U., Safri S.N.A. *Review on nanocomposites based on aerospace applications* // *Nanotechnology Reviews*. – 2021. – Vol.10. – Pp.237-253.
40. Moe M., Rossi M. *Prediction of Young's modulus of single wall carbon nanotubes by molecular-mechanics based finite element modeling* // *Comp. Sci.* – 2006. – Vol.66. – No.11-12. – Pp.1597-1605.
41. Edwards B.C. *Design and Deployment of a Space Elevator* // *Acta Astron.* – 2000. – Vol.47. – No.10. – Pp.735-744.
42. Rashko M.N., Hamad S.M., Barzinjy A.A., Hamad A.H. *Mechanical Properties of Carbon Nanotubes (CNTs): A Review* // *Eurasian Journal of Science & Engineering*. – 2022. – Vol.8. – No.2. – Pp.54-68.
43. Pitroda J., Jethwa B., Dave S.K. *A Critical Review on Carbon Nanotubes* // *Int. J. Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*. – 2016. – Vol.2. – No.5. – Pp.36-42.
44. Pugno N.M. *Towards the Artsutanov's dream of the space elevator: The ultimate design of a 35 GPa strong tether thanks to graphene* // *Acta Astron.* – 2013. – Vol.82. – No.2. – Pp.221-224.
45. Okubo S., Hikata T., Fujimori T., Tanioka D., Yamashita D., Onoki T. *Ultra-High Strength Carbon Nanotube Yarn Made by New Growth Method* // *Industrial Materials SUMITOMO ELECTRIC TECHNICAL REVIEW*. – 2021. – Pp.58-64.
46. Ramachandran K., Boopalan V., Bear J.C., Subramani R. *Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review* // *J. Mater. Sci.* – 2022. – Vol.57. – Pp.3923-3953.
47. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. *Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications* // *Composites Part C: Open Access*. – 2024. – Vol.13. – 100434.
48. Kausar A., Rafque I., Muhammad B. *Review of applications of polymer/carbon nanotubes and epoxy/CNT composites* // *Polym. Plast. Technol. Eng.* – 2016. – Vol.55. – No.11. – Pp.1167-1191.
49. Schnorr J.M., Swager T.M. *Emerging applications of carbon nanotubes* // *Chem. Mater.* – 2010. – Vol.23. – No.3. – Pp.646-657.
50. Al-Furjan M.S.H., Shan L., Shen X., Zarei M.S., Hajmohammad M.H., Kolahchi R., *A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites* // *J. Mater. Res. Technol.* – 2022. – Vol.19. – Pp.2930-2959.
51. Priyanka P., Dixit A., Mali H.S. *High strength Kevlar fiber reinforced advanced textile composites* // *Iran. Polym. J.* – 2019. – Vol.28. – Pp.621-638.

52. Said M.A., Dingwall B., Gupta A., Seyam A.M., Mock G., Theyson T. *Investigation of ultra violet (UV) resistance for high strength fibers* // Adv. Space Res. – 2006. – Vol.37. – Pp.2052-2058.
53. Finckenor M.M. *Comparison of High-Performance Fiber Materials Properties in Simulated and Actual Space Environments* // NASA/TM-2017-219634. – 2017. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170006996/downloads/20170006996.pdf>
54. Seay C.W., Mulcahy K.A., Hall M.S., Clements J.A., Pretko J., Christiansen E.L., Davis B.A., Cowardin H. *The Next Generation of Kevlar® Fiber for Improved Micrometeoroid and Orbital Debris Protection* // Second International Orbital Debris Conference. – 2023. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230014548/downloads/NextGenerationKevlar_DuPontNASA_IOC2_6013_Full.pdf
55. Jie Ma, Qiang Wei, Hongbo Fan, Zhengpan Qi, Ning Hu. *Mechanical Properties Evolution and Damage Mechanism of Kevlar Fiber under Ozone Exposure in Near-Space Simulation* // Coatings. – 2022. – Vol.12. – 584.
56. Kaiwen Shi, Yuekai Yan, Hui Mei, Chao Chen, Laifei Cheng. *3D printing Kevlar fiber layer distributions and fiber orientations into nylon composites to achieve designable mechanical strength* // Addit. Manuf. – 2021. – Vol.39. – 101882.
57. Fette R.B., Sovinski M.F. *Vectran Fiber Time-Dependent Behavior and Additional Static Loading Properties* // NASA/TM-2004-212773. – 2004. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050040773/downloads/20050040773.pdf>.
58. Langston S.L., Jones T.C. *Investigation of High Variability in the Creep Behavior of Vectran Yarn* // NASA/TM-20210014024. – 2021. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210014024/downloads/NASA-TM-20210014024.pdf>
59. Beers D.E., Ramirez J.E. *Vectran High-performance Fibre* // The Journal of The Textile Institute. – 1990. – Vol.81. – No.4. – Pp.561-574.
60. limeneh D.Y., Yilma K.T. *Article Review on Vectran-Super Fiber from Thermotropic Crystals of Rigid-Rod Polymer* // Journal of Engineering. – 2021. – Vol.2021, 6646148.
61. Tanaka M., Moritaka Y., Akahoshi Y., Nakamura R., Yamori A., Sasaki S. *Development of a lightweight space debris shield using high strength fibers* // International Journal of Impact Engineering. – 2001. – Vol.26. – Pp.761-772.
62. Yuxi Liu, Yuyan Liu, Huifeng Tan, Changguo Wang, Huige Wei, Zhanhu Guo. *Structural evolution and degradation mechanism of Vectran fibers upon exposure to UV-radiation* // Polym. Degrad. Stab. – 2013. – Vol.98. – Pp.1744-1753.
63. de Lima E.G. *Space Engineering Design Concept for Installing a Spatial Heavy Crane to Ascend and Descend Payloads* // Advances in Astronautics Science and Technology. – 2022. – Vol.5. – Pp.183-193. DOI: 10.1007/s42423-022-00107-7.
64. Han Gi Chae, Kumar S. *Rigid-Rod Polymeric Fibers* // J. Appl. Polym. Sci. – 2006. – Vol.100. – Pp.791-802.
65. Shuang Wang, Zelin Wu, Shan Jiang, Guangda Wang, Rundong Huang, Tao Peng. *Development of Zylon-Kevlar-Zylon Hybrid Fiber Reinforcement Technology for 100 T Pulsed Magnet at the WHMFC* // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2020. – Vol.30. – No.4. – 4301204.
66. Zangana S., Epaarachchi J., Ferdous W., Leng J. *A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon fibres – Investigation under low-velocity impact* // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – Vol.137. – 103430.

67. Padhan M., Marathe U., Bijwe J. *Developing Superperforming Composites by Harnessing Fiber Orientation and Processing Technology* // ACS Omega. – 2024. – Vol.9. – Pp.34281-34291.
68. Fei Chen, Xinwen Peng, Tingting Li, Shuiliang Chen, Xiang-Fa Wu, Darrell H. Reneker, Haoqing Hou. *Mechanical characterization of single high-strength electrospun polyimide nanofibers* // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol.41. – 025308.
69. Qing-Hua Zhang, Mian Dai, Meng-Xian Ding, Da-Jun Chen, Lian-Xun Gao. *Mechanical properties of BPDA-ODA polyimide fibers* // Eur. Polym. J. – 2004. – Vol.40. – Pp.2487-2493.
70. Xiangyang Liua, Guanqun Gaoa, Liang Donga, Guangdou Yea and Yi Gu. *Correlation between hydrogen-bonding interaction and mechanical properties of polyimide fibers* // Polym. Adv. Technol. – 2009. – Vol.20. – Pp.362-366.
71. Weiser E.S., Johnson T.F., Clair T.L.St., Echigo Y., Kaneshiro H., Grimsley B.W. *Polyimide foams for aerospace vehicles* // High Perform. Polym. – 2000. – Vol.12. – Pp.1-12.
72. Patera R.H., Curto P.A. *Advanced materials for space applications* // Acta Astronaut. – 2007. – Vol.61. – Pp.1121-1129.
73. Jun Chen, Nengwen Ding, Zhifeng Li, Wei Wang. *Organic polymer materials in the space environment* // Progress in Aerospace Sciences. – 2016. – Vol.83. – Pp.37-56.
74. Mengying Zhang, Hongqing Niu, Dezhen Wu. *Polyimide Fibers with High Strength and High Modulus: Preparation, Structures, Properties, and Applications* // Macromol. Rapid. Commun. – 2018. – Vol.39. – 1800141.
75. Jie Dong, Chaoqing Yin, Xin Zhao, Yingzhi Li, Qinghua Zhang. *High strength polyimide fibers with functionalized graphene* // Polymer. – 2013. – Vol.54. – Pp.6415-6424.
76. Jianfei Xie, Danwei Xin, Hongyan Cao, Cuntao Wang, Yi Zhao, Lan Yao, Feng Ji, Yiping Qiu. *Improving carbon fiber adhesion to polyimide with atmospheric pressure plasma treatment* // Surf. Coat. Technol. – 2011. – Vol.206. – Pp.191-201.
77. Wenli Ye, Guoqiang Lin, Wenzheng Wu, Peng Geng, Xue Hu, Zhiwei Gao, Ji Zhao. *Separated 3D printing of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide* // Composites Part A. – 2019. – Vol.121. – Pp.457-466.
78. Miyauchi M., Ishida Y., Ogasawara T., Yokota R. *Highly soluble phenylethynyl-terminated imide oligomers based on KAPTON-type backbone structures for carbon fiber-reinforced composites with high heat resistance* // Polym. J. – 2013. – Vol.45. – Pp.594-600.
79. Vallabh R., Li A., Bradford P.D., Kim D., Seyam A.-F.M. *Ultra-lightweight fiber-reinforced envelope material for high-altitude airship* // The Journal of the Textile Institute. – 2022. – Vol.113. – Iss.9. – Pp.1799-1805
80. Plis E.A., Engelhart D.P., Cooper R., Johnston W.R., Ferguson D., Homann R., *Review of Radiation-Induced Effects in Polyimide* // Appl. Sci. – 2019. – Vol.9. – 1999.
81. Avci H., Hassanin A., Hamouda T., Kiliç A. *High performance fibers: a review on current state of art and future challenges* // Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University. – 2019. – Vol.27. – No.2. – Pp.130-155.
82. Blala H., Lang L., Khan S., Lei Li, Sijia S., Guelailia A., Slimane S. A., Alexandrov S. *Forming challenges of small and complex fiber metal laminate parts in*

aerospace applications - a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol.126. – Pp.2509-2543.

83. Etri H.E., Korkmaz M.E., Gupta M.K., Gunay M., Xu J. *A state of the art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2022. – Vol.123. – Pp.2965-2991.
84. Costa R.D.F.S., Sales-Contini R.C.M., Silva F.J.G., Sebbe N., Jesus A.M.P. *A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing // Metals.* – 2023. – Vol.13. – 638.

REFERENCES

1. Tsiolkovsky K.E. *Grezy o Zemle i nebe [Dreams of Earth and Sky]*. Moskva, Izdatel'stvo AN SSSR, 1959, 96 p.
2. Artsutanov Yu.N. *V kosmos bez raket: novaya ideya kosmicheskogo starta [To Space Without Rockets: A New Idea for Space Launch]*. Znanie – sila, 1969, No 7, Pp.25.
3. Beletskiy V.V., Ivanov M.B., Otstavnov E.I. *Model'naya zadacha o kosmicheskom lifte [Model problem of the space elevator]*. Kosmicheskie issledovaniya, 2005, Vol.43, No.3, Pp.157-160.
4. Polyakov G.G. *Obobshhennye zadachi o kosmicheskom lifte [Generalized space elevator problems]*. Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela, 1972, No.6, Pp.54-59.
5. Shoshunov N.L. *Kosmicheskij lift: nadezhdy i problemy [Space Elevator: Hopes and Problems]*. Polet, 2006, No.3, Pp.53-60.
6. Okino T., Yamagiwa Y., Arita S., Ishikawa Y., Otsuka K. *Three-dimensional analysis of a counterweight type space elevator*. Acta Astronaut., 2021, Vol.185, Pp.132-139.
7. Smitherman D.V. *Space elevators: an advanced earth-space infrastructure for the new millennium*. NASA/CP-2000-210429, 2010.
<http://www.spaceelevator.com/docs/elevator.pdf>.
8. Miao M. *Yarn spun from carbon nanotube forests: Production, structure, properties and applications*. Particuology, 2013, Vol.11, Pp.378-393.
9. Edwards B.C. *The Space Elevator*. Houston TX, BC Edwards, 2003, 280 p.
10. Perek L. *Space Elevator: Stability // Acta Astronaut*, 2008, Vol.62, No.8-9, Pp.514-520.
11. Artukovic R. *The Space Elevator*. Physical Principles. www.zadar.net/space-elevator.
12. Contant-Jorgenson C., La'la P., Schrogl K.-U. *The IAA cosmic study on space traffic management*. Space Policy, 2006, Vol.22, Pp.283-288.
13. Sadov Yu.A., Nuralieva A.B. *O kontseptsii nagruzhennogo sektsionirovannogo kosmicheskogo lifta [On the concept of a loaded sectioned space elevator]*. Moskva, Preprint IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2011, 24 p.
14. Nuralieva A.B. *O dinamike troska kosmicheskogo lifta. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk [On the dynamics of the space elevator cable. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences]*. IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2012, 103 p.
15. Beletskiy V.V., Levin E.M. *Dinamika kosmicheskikh trosovykh sistem [Dynamics of space tether systems]*. Moskva, Nauka, 1990, 329 p.

16. Danilin A.N., Grishanina T.V., Shklyarchuk F.N., Buzlaev D.V. *Dynamics of a space vehicle with elastic deploying tether*. Comput. & Structures, 1999, Vol.72, No.1-3, Pp.141-147.
17. Demczyk B.G., Wang Y.M., Cumings J., Hetman M., Han W., Zettl A., Ritchie R.O. *Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes*. Mater. Sci. Eng.: A, 2002, Vol.334, Pp.173-178.
18. Bakulin V.N., Danilin A.N., Karnet J.N., Nikitin S.M., Feldstein V.A. *Quantum-chemical simulation for production technologies of high-strength Zylon fibers*. E3S Web of Conferences, 2023, Vol.446, 03004.
19. Aravind P.K. *The physics of the space elevator*. Am. J. Phys., 2007, Vol.75, Pp.125-130.
20. Edwards B.C. *The space elevator: concept overview*. Space 2002 and Robotics, 2002, Pp.77-83.
21. Smitherman D.V. *Technology development and demonstration concepts for the space elevator*. 55th International Astronautical Congress (Canada, Vancouver), 2004, Pp.1-11.
22. Kundu K. *Evaluation of Structural Materials for Space Elevator Applications*. IRJET, 2022, Vol.09, Pp.328-333.
23. Yazici A.M. *An Investigation on The Economic Feasibility of Space Elevator*. J. Aviation and Aerospace studies, 2020, Vol.1, Pp.33-47.
24. Raitt D., Edwards B. *The space elevator: economics and applications*. 55th International Astronautical Congress (Vancouver, Canada), 2004.
25. Barry K., Alfaro E.P. *Changing the economic paradigm for building a space elevator*. Acta Astronautica, 2022, Vol.200, Pp.586-598.
26. Berthelot M. *Carbon Nanotubes as a Material for a Space Elevator Cable*. da Vinci's Notebook (Canada), 2014, Vol.6.
27. Pugno N.M. *On the strength of the carbon nanotube-based space elevator cable: from nanomechanics to megamechanics*. J. Phys.: Condens. Matter., 2006, Vol.18, Pp.1971-1990.
28. Prabhakaran R. *Nano composites for Space Applications*. J. Aerospace sciences and technologies, 2015, Vol.67, Pp.1-17.
29. Danilin A.N., Denisov E.A., Onuchin E.S., Feldstein V.A. *Mechanical Model of a Space Elevator. Statics*. Russian Aeronautics, 2023, Vol.66, No.3, Pp.432-442.
30. Huiyong Ban, Gang Shi, Yongjiu Shi, Yuanqing Wang. *Research Progress on the Mechanical Property of High Strength Structural Steels*. Adv. Mater. Res., 2011, Vol.250-253, Pp.640-648.
31. Sun M., Xiao K., Dong C.F., Li X.G., Zhong P. *Stress Corrosion Cracking of Ultrahigh Strength Martensite Steel Cr9Ni5MoCo14 in 3.5% NaCl Solution*. Aerosp. Sci. Technol., 2014, Vol.36, Pp.125-131.
32. Tian J., Wang W., Babar Shahzad M., Yan W., Shan Y., Jiang Z. *A New Maraging Stainless Steel with Excellent Strength-Toughness-Corrosion Synergy*. Materials, 2017, Vol.10, 1293.
33. Wang L.D., Jiang L.Z., Zhu M., Liu X., Zhou W.M. *Improvement of Toughness of Ultrahigh Strength Steel Aermet 100*. J. Mater. Sci. Technol., 2005, Vol.21, No.5, Pp.710-714.
34. Bhadeshia H.K.D.H. *Bulk nanocrystalline steel*. Ironmaking and Steelmaking, 2005, Vol.32, Pp.405-410.

35. Quan D., Urdániz J.L., Rouge C., Ivanković A. *The enhancement of adhesively-bonded aerospace-grade composite joints using steel fibres*. Composite Structures, 2018, Vol.198, Pp.11-18.
36. McBride A.K., Turek S.L., Zaghi A.E., Burke K.A. *Mechanical Behavior of Hybrid Glass/Steel Fiber Reinforced Epoxy Composites*. Polymers, 2017, Vol.9, 151.
37. Watson K.A., Connell J.W. *Polymer and carbon nanotube composites for space applications*. In book: Carbon Nanotechnology. Elsevier, 2006, Chapter 19, Pp.677-698.
38. Wright D.H., Bartoszek L., Burke A.J., Dotson D., El Chab H., Knapman J., Lades M., Nixon A., Phister P.W., Robinson P. *The Climber-Tether Interface of the Space Elevator*. International Space Elevator Consortium Spring, 2023, ISEC Study Report #2023-1 Preprint.
39. Bhat A., Budholiya S., Raj S.A., Sultan M.T.H., Hui D., Md Shah A.U., Safri S.N.A. *Review on nanocomposites based on aerospace applications*. Nanotechnology Reviews, 2021, Vol.10, Pp.237-253.
40. Moe M., Rossi M. *Prediction of Young's modulus of single wall carbon nanotubes by molecular-mechanics based finite element modeling*. Comp. Sci., 2006, Vol.66, No.11-12, Pp.1597-1605.
41. Edwards B.C. *Design and Deployment of a Space Elevator*. Acta Astron., 2000, Vol.47, No.10, Pp.735-744.
42. Rashko M.N., Hamad S.M., Barzinjy A.A., Hamad A.H. *Mechanical Properties of Carbon Nanotubes (CNTs): A Review*. Eurasian Journal of Science & Engineering, 2022, Vol.8, No.2, Pp.54-68.
43. Pitroda J., Jethwa B., Dave S.K. *A Critical Review on Carbon Nanotubes*. Int. J. Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE), 2016, Vol.2, No.5, Pp.36-42.
44. Pugno N.M. *Towards the Artsutanov's dream of the space elevator: The ultimate design of a 35 GPa strong tether thanks to graphene*. Acta Astron., 2013, Vol.82, No.2, Pp.221-224.
45. Okubo S., Hikata T., Fujimori T., Tanioka D., Yamashita D., Onoki T. *Ultra-High Strength Carbon Nanotube Yarn Made by New Growth Method*. Industrial Materials SUMITOMO ELECTRIC TECHNICAL REVIEW, 2021, Pp.58-64. https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/2021-10/download_documents/E93-11.pdf.
46. Ramachandran K., Boopalan V., Bear J.C., Subramani R. *Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review*. J. Mater. Sci., 2022, Vol.57, Pp.3923-3953.
47. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. *Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications*. Composites Part C: Open Access, 2024, Vol.13, 100434.
48. Kausar A., Rafque I., Muhammad B. *Review of applications of polymer/carbon nanotubes and epoxy/CNT composites*. Polym. Plast. Technol. Eng., 2016, Vol.55, No.11, Pp.1167-1191.
49. Schnorr J.M., Swager T.M., *Emerging applications of carbon nanotubes*. Chem. Mater, 2010, Vol.23, No.3, Pp.646-657.
50. Al-Furjan M.S.H., Shan L., Shen X., Zarei M.S., Hajmohammad M.H., Kolahchi R., *A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and*

- Kevlar fiber reinforced polymer composites*. J. Mater. Res. Technol., 2022, Vol.19, Pp.2930-2959.
51. Priyanka P., Dixit A., Mali H.S. *High strength Kevlar fiber reinforced advanced textile composites*. Iran. Polym. J., 2019, Vol.28, Pp.621-638.
 52. Said M.A., Dingwall B., Gupta A., Seyam A.M., Mock G., Theyson T. *Investigation of ultra violet (UV) resistance for high strength fibers*. Adv. Space Res., 2006, Vol.37, Pp.2052-2058.
 53. Finckenor M.M. *Comparison of High-Performance Fiber Materials Properties in Simulated and Actual Space Environments*. NASA/TM-2017-219634, 2017, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170006996/downloads/20170006996.pdf>
 54. Seay C.W., Mulcahy K.A., Hall M.S., Clements J.A., Pretko J., Christiansen E.L., Davis B.A., Cowardin H. *The Next Generation of Kevlar® Fiber for Improved Micrometeoroid and Orbital Debris Protection*. Second International Orbital Debris Conference, 2023, https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20230014548/downloads/NextGenerationKevlar_DuPontNASA_IOC2_6013_Full.pdf.
 55. Jie Ma, Qiang Wei, Hongbo Fan, Zhengpan Qi, Ning Hu. *Mechanical Properties Evolution and Damage Mechanism of Kevlar Fiber under Ozone Exposure in Near-Space Simulation*. Coatings, 2022, Vol.12, 584.
 56. Kaiwen Shi, Yuekai Yan, Hui Mei, Chao Chen, Laifei Cheng. *3D printing Kevlar fiber layer distributions and fiber orientations into nylon composites to achieve designable mechanical strength*. Addit. Manuf., 2021, Vol.39, 101882.
 57. Fette R.B., Sovinski M.F. *Vectran Fiber Time-Dependent Behavior and Additional Static Loading Properties*. NASA/TM-2004-212773, 2004, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050040773/downloads/20050040773.pdf>.
 58. Langston S.L., Jones T.C. *Investigation of High Variability in the Creep Behavior of Vectran Yarn*. NASA/TM-20210014024, 2021, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210014024/downloads/NASA-TM-20210014024.pdf>.
 59. Beers D.E., Ramirez J.E. *Vectran High-performance Fibre*. The Journal of The Textile Institute, 1990, Vol.81, No.4, Pp.561-574.
 60. limeneh D.Y., Yilma K.T. *Article Review on Vectran-Super Fiber from Thermotropic Crystals of Rigid-Rod Polymer*. Journal of Engineering, 2021, Vol.2021, 6646148.
 61. Tanaka M., Moritaka Y., Akahoshi Y., Nakamura R., Yamori A., Sasaki S. *Development of a lightweight space debris shield using high strength fibers*. International Journal of Impact Engineering, 2001, Vol.26, Pp.761-772.
 62. Yuxi Liu, Yuyan Liu, Huifeng Tan, Changguo Wang, Huige Wei, Zhanhu Guo. *Structural evolution and degradation mechanism of Vectran fibers upon exposure to UV-radiation*. Polym. Degrad. Stab., 2013, Vol.98, Pp.1744-1753.
 63. de Lima E.G. *Space Engineering Design Concept for Installing a Spatial Heavy Crane to Ascend and Descend Payloads*. Advances in Astronautics Science and Technology, 2022, Vol.5, Pp.183-193.
 64. Han Gi Chae, Kumar S. *Rigid-Rod Polymeric Fibers*. J. Appl. Polym. Sci., 2006, Vol.100, Pp.791-802.
 65. Shuang Wang, Zelin Wu, Shan Jiang, Guangda Wang, Rundong Huang, Tao Peng. *Development of Zylon-Kevlar-Zylon Hybrid Fiber Reinforcement Technology for 100 T Pulsed Magnet at the WHMFC*. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2020, Vol.30, No.4, 4301204.

66. Zangana S., Epaarachchi J., Ferdous W., Leng J. *A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon fibres – Investigation under low-velocity impact*. International Journal of Impact Engineering, 2020, Vol.137, 103430.
67. Padhan M., Marathe U., Bijwe J. *Developing Superperforming Composites by Harnessing Fiber Orientation and Processing Technology*. ACS Omega, 2024, Vol.9, Pp.34281-34291.
68. Fei Chen, Xinwen Peng, Tingting Li, Shuiliang Chen, Xiang-Fa Wu, Darrell H. Reneker, Haoqing Hou. *Mechanical characterization of single high-strength electrospun polyimide nanofibers*. J. Phys. D: Appl. Phys., 2008, Vol.41, 025308.
69. Qing-Hua Zhang, Mian Dai, Meng-Xian Ding, Da-Jun Chen, Lian-Xun Gao. *Mechanical properties of BPDA-ODA polyimide fibers*. Eur. Polym. J., 2004, Vol.40, Pp.2487-2493.
70. Xiangyang Liua, Guanqun Gaoa, Liang Donga, Guangdou Yea, Yi Gu. *Correlation between hydrogen-bonding interaction and mechanical properties of polyimide fibers*. Polym. Adv. Technol., 2009, Vol.20, Pp.362-366.
71. Weiser E.S., Johnson T.F., Clair T.L.St., Echigo Y., Kaneshiro H., Grimsley B.W. *Polyimide foams for aerospace vehicles*. High Perform. Polym., 2000, Vol.12, Pp.1-12.
72. Patera R.H., Curto P.A. *Advanced materials for space applications*. Acta Astronaut., 2007, Vol.61, Pp.1121-1129.
73. Jun Chen, Nengwen Ding, Zhifeng Li, Wei Wang. *Organic polymer materials in the space environment*. Progress in Aerospace Sciences, 2016, Vol.83, Pp.37-56.
74. Mengying Zhang, Hongqing Niu, Dezhen Wu. *Polyimide Fibers with High Strength and High Modulus: Preparation, Structures, Properties, and Applications*. Macromol. Rapid. Commun., 2018, Vol.39, 1800141.
75. Jie Dong, Chaoqing Yin, Xin Zhao, Yingzhi Li, Qinghua Zhang. *High strength polyimide fibers with functionalized graphene*. Polymer, 2013, Vol.54, Pp.6415-6424.
76. Jianfei Xie, Danwei Xin, Hongyan Cao, Cuntao Wang, Yi Zhao, Lan Yao, Feng Ji, Yiping Qiu. *Improving carbon fiber adhesion to polyimide with atmospheric pressure plasma treatment*. Surf. Coat. Technol., 2011, Vol.206, Pp.191-201.
77. Wenli Ye, Guoqiang Lin, Wenzheng Wu, Peng Geng, Xue Hu, Zhiwei Gao, Ji Zhao. *Separated 3D printing of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic polyimide*. Composites Part A, 2019, Vol.121, Pp.457-466.
78. Miyauchi M., Ishida Y., Ogasawara T., Yokota R. *Highly soluble phenylethynyl-terminated imide oligomers based on KAPTON-type backbone structures for carbon fiber-reinforced composites with high heat resistance*. Polym. J., 2013, Vol.45, Pp.594-600.
79. Vallabh R., Li A., Bradford P.D., Kim D., Seyam A.-F.M. *Ultra-lightweight fiber-reinforced envelope material for high-altitude airship*. The Journal of the Textile Institute, 2021.
80. Plis E.A., Engelhart D.P., Cooper R., Johnston W.R., Ferguson D., Homann R., *Review of Radiation-Induced Effects in Polyimide*. Appl. Sci., 2019, Vol.9, 1999.
81. Avci H., Hassanin A., Hamouda T., Kiliç A. *High performance fibers: a review on current state of art and future challenges*. Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University, 2019, Vol.27, No.2, Pp.130-155.

82. Blala H., Lang L., Khan S., Lei Li, Sijia S., Guelailia A., Slimane S.A., Alexandrov S. *Forming challenges of small and complex fiber metal laminate parts in aerospace applications – a review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, Vol.126, Pp.2509-2543.
83. Etri H.E., Korkmaz M.E., Gupta M.K., Gunay M., Xu J. *A state of the art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, Vol.123, Pp.2965-2991.
84. Costa R.D.F.S., Sales-Contini R.C.M., Silva F.J.G., Sebbe N., Jesus A.M.P. *A Critical Review on Fiber Metal Laminates (FML): From Manufacturing to Sustainable Processing*. Metals, 2023, Vol.13, 638.

Поступила в редакцию 04 ноября 2024 года.

Сведения об авторах:

Келбышева Елена Сергеевна – к.х.н., в.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: kellena80@mail.ru

Данилин Александр Николаевич – д.ф.-м.н., гл.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: andnilin@yandex.ru

Фельдштейн Валерий Адольфович – д.т.н., в.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия