



Научная статья

УДК 621.792.4

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188830>

EDN: <https://www.elibrary.ru/UUFNCX>

Метод снижения массы ферменных конструкций космического аппарата

Михаил Сергеевич Руденко^{1✉}, Алексей Васильевич Гирн², Дмитрий Игоревич Быстров³,
Дмитрий Игоревич Орешкин⁴

^{1, 2} Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева,
Красноярский край, Красноярск, Российская Федерация

^{3, 4} «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева,
Красноярский край, Железнодорожный, Российская Федерация

¹ rudenko_ms@sibsau.ru[✉], ORCID 0000-0002-1074-2548

² girn@sibsau.ru, ORCID 0009-0008-9236-8182

³ bystrowdi@iss-reshetnev.ru

⁴ mr.oreshkin01@yandex.ru, ORCID 0009-0001-7564-2804

Аннотация. Представлен метод снижения массы ферменных конструкций космических аппаратов путем повышения адгезионной прочности клеевых соединений «титан — углепластик» за счет лазерного текстурирования поверхности титановых законцовок. Показано, что слабым звеном соединения является граница «титан — клей» с прочностью 5–12 МПа из-за наличия пассивирующей оксидной пленки рутила. Теоретически обоснован выбор наносекундного лазерного излучения, обеспечивающего одновременно механическое формирование регулярного микрорельефа и химическую активацию поверхности. Экспериментально подтверждено повышение адгезионной прочности до 30 МПа, что позволяет пропорционально сократить длину зоны вклеивания титановой втулки в углепластиковую трубку при сохранении несущей способности. Выполнена количественная оценка массовой эффективности для ферменной конструкции рефлектора космического аппарата с 216 узлами: снижение массы составило 176 г, что составляет 5,1% от массы фермы. Расчетные оценки для других типоразмеров конструкций подтверждают устойчивость эффекта в диапазоне 4,5–5,0%, что свидетельствует о воспроизводимости и практической значимости предложенного технического решения.

Ключевые слова: ферменные конструкции космических аппаратов, клеевые соединения, лазерное текстурирование титана

Для цитирования: Руденко М.С., Гирн А.В., Быстров Д.И., Орешкин Д.И. Метод снижения массы ферменных конструкций космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 140-151. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188830>

Original article

The Spacecraft Truss Structures Mass Reduction Method

Mikhail S. Rudenko^{1✉}, Alexey V. Girn², Dmitry I. Bystrov³, Dmitry I. Oreshkin⁴^{1, 2} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,

Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, Russian Federation

^{3, 4} “Information Satellite Systems” Academician M.F. Reshetnev Company,

Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, Russian Federation

¹ rudenko_ms@sibsau.ru✉, orcid 0000-0002-1074-2548² girn@sibsau.ru, orcid 0009-0008-9236-8182³ bystrowdi@iss-reshetnev.ru⁴ mr.oreshkin01@yandex.ru, ORCID 0009-0001-7564-2804

Abstract

The article presents a method for the spacecraft truss structures mass reducing by the adhesion strength of the bonded joints between the titanium alloy end fittings and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tubes through the titanium surface laser texturing. The truss structures are widely applied in the large deployable spaceborne antennas, reflectors, and telecommunication spacecraft. Typically, such trusses consist of the CFRP tubes with titanium inserts (end fittings) glued to their end faces. It is demonstrated that the interface between the titanium alloy and adhesive compound is the weakest link of the coupling, exhibiting the glued joint adhesive strength of only 5–12 MPa without special surface preparation. This low strength is attributed to the presence of a passive oxide film (predominantly rutile, TiO_2) that is naturally formed on titanium and prevents formation of the strong interatomic and intermolecular bonds with functional groups of the adhesive.

The authors theoretically justify the nanosecond laser radiation selection for surface texturing. Unlike the femtosecond or continuous-wave lasers, the nanosecond mode ensures a combination of two complementary strengthening mechanisms: (1) mechanical anchoring due to the regular microrelief formation (microgrooves, craters, and re-solidified ridges), and (2) chemical activation of the surface resulting from thermochemical modification of the oxide layer. During nanosecond laser treatment, the original passive rutile film is removed, and rapid melting, ablation, and recrystallization in an oxygen-containing atmosphere lead to the formation of a new oxide layer enriched with chemically active anatase, which improves wettability and adhesion.

Experimental verification was performed on the samples simulating the CFRP tube with titanium end fitting joint bonded with a three-component epoxy adhesive (VK-9). For the titanium end fittings processed by a spiral texture at a pitch of 125 μm , the shear adhesive strength reached 30.42 MPa, which is approximately 50 % higher than that achieved by conventional mechanical turning. This significant increase in adhesive strength allows proportionally reduce the required bond line length while maintaining the same load-bearing capacity.

A quantitative mass efficiency assessment was performed for a reflector truss structure containing 216 identical joints. The required bond length after laser texturing was reduced from 15 mm to 6.85 mm, saving 8.15 mm per joint. Given the mass per unit length of the titanium insert of approximately 0.1 g/mm, the mass saving per joint was 0.815 g, resulting in a total mass saving of 176 g for the entire truss. This corresponds to a relative mass reduction of 5.1 % compared to the original truss mass. Computational estimates for the other typical sizes of space truss structures confirm that relative mass saving remains stable within the range from 4.5 to 5.0 %, demonstrating the reproducibility and practical significance of the proposed technical solution.

Thus, nanosecond laser texturing of titanium surfaces is an effective, industrially feasible method for enhancing adhesive bonding in hybrid metal-composite joints, enabling measurable mass reduction in lightweight space structures without compromising mechanical performance.

Keywords: spacecraft trusses, adhesive joint, laser titanium texturing

For citation: Rudenko M.S., Girn A.V., Bystrov D.I., Oreshkin D.I. The Spacecraft Truss Structures Mass Reduction Method. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):140-151. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188830>

List of Figures

Fig. 1. The spacecraft truss structures: *a* – deployable parabolic antenna load-bearing structure [1];
b – deployment of the two-ring deployable truss structure for the ultra-large space mesh antennas [2];
c – ultra-lightweight spacecraft truss structure [4]

- Fig. 2. Spacecraft spatial truss structure and its key elements: *a* – assembled truss with reflector;
b – the rod to fitting attachment assemblage (1 – screw; 2 – titanium tip; 3 – sleeve; 4 – pin; 5 – fitting;
 6 – carbon fiber rod; 7 – set of washers); *c* – a spacecraft spatial truss structure
- Fig. 3. Strength characteristics distribution in a carbon–titanium adhesive joint
- Fig. 4. Lasers application for various types of material processing: I – thin films evaporation; II – films scribing, evaporation; III – holes drilling, perforation; IV – spot welding, heat treatment;
 V – deep penetration, gas laser cutting, heat treatment [9]
- Fig. 5. Mechanism for forming and morphology of laser-induced structures:
a – schematic representation of the crater formation during nanosecond and femtosecond exposure;
b – crater view (ns-pulse); *c* – crater view (fs-pulse) [10]; *d* – cross-section profile of the linear texture after nanosecond laser processing
- Fig. 6. Schematic representation of the processes sequence during laser texturing: I – the initial surface condition;
 II – the stage of local heating and melting; III – the stage of ablation, plasma plume forming, and melt hydrodynamic displacement; IV – the stage of cooling and crystallization with the crater forming
- Fig. 7. The groove depth forming during multi-pass laser processing:
a – layer-by-layer deepening scheme (I – first pass, II – second pass, III – subsequent passes);
b – cross-section profile of the groove after one, two, and three passes of the laser beam
- Fig. 8. Reflector load-bearing truss structure: *a* – the truss nodes numbering scheme;
b – computational results at the assembled reflector loading along *Y*-axis

Введение

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли, дальней космической связи, радиоастрономии, а также создание современных телекоммуникационных космических аппаратов (КА) стимулирует переход к использованию крупногабаритных развертываемых антенных систем с апертурой в десятки и сотни метров [1, 2]. Несущая конструкция таких антенн должна одновременно обеспечивать высокую жесткость, минимальную массу и способность к компактной укладке под обтекатель ракеты-носителя [2, 3]. Пространственные ферменные конструкции являются одним из наиболее эффективных решений данной задачи, позволяя сочетать рекордно низкую массу с высоким коэффициентом трансформации при развертывании [1, 19]. Параллельно задача снижения массы распространяется на силовые элементы корпуса и служебных систем КА. Примеры развертываемых и стационарных силовых ферменных конструкций космического назначения, иллюстрирующих многообразие их конструктивных исполнений и областей применения, приведены на рис. 1. Как показывает практика создания полномасштабных прототипов несущих ферм, применение композиционных материалов позволяет уменьшить вес конструкции до 75% по сравнению с металлическими аналогами [4, 18]. Однако ограничением, сдерживающим достижение предельных весовых характеристик, становится не прочность самих стержней, а несущая способность и надежность узлов соединения, являющихся концентраторами напряжений и потенциальными местами разрушения [4, 20].

Ферменная конструкция представляет собой пространственную стержневую систему, элементы

которой работают преимущественно на растяжение и сжатие и соединяются в узлах, приближенных к шарнирным (рис. 2, *a* и *b*). Данная схема позволяет реализовать эффективную передачу нагрузок при минимальной массе конструкции. В жестких фермах КА стержневые элементы выполняются из углепластиковых труб, в торцевые части которых вклеиваются титановые законцовки. Законцовки, в свою очередь, посредством резьбовых соединений фиксируются на узловом фитинге (рис. 2, *b*).

Снижение массы ферменной конструкции является одной из задач при проектировании КА, поскольку ее решение непосредственно определяет допустимую массу полезной нагрузки и достижимые параметры орбиты выведения. Проблема минимизации массы таких конструкций традиционно решается в рамках трех подходов. Первый подход базируется на методах структурной оптимизации и включает топологический синтез силовой схемы фермы, параметрическую оптимизацию геометрии поперечных сечений несущих элементов и адаптивное перераспределение материала в соответствии с эпюрами внутренних усилий.

Так, авторами работы [15] разработан алгоритм, позволяющий одновременно оптимизировать топологию и размеры поперечных сечений стержней фермы с учетом статических и динамических ограничений, что обеспечивает снижение массы конструкции при сохранении требуемого уровня жесткости. В работе [16] рассматривается оптимизация телескопической штанги космических аппаратов на основе модели запирающих механизмов, что позволило повысить жесткость конструкции при одновременном уменьшении ее массы.

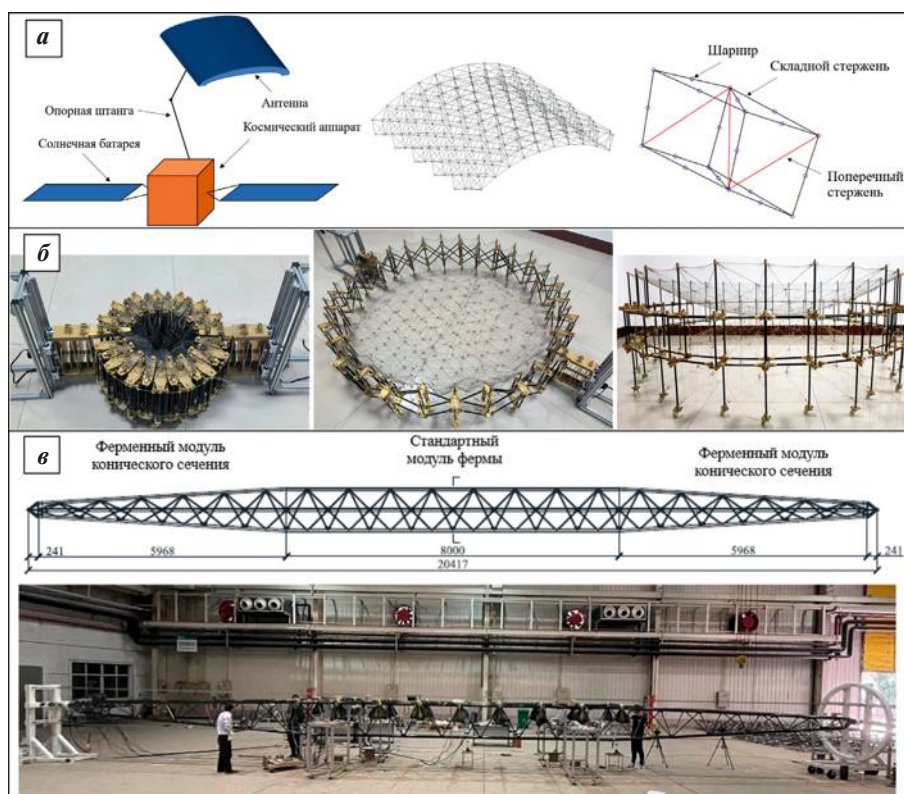


Рис. 1. Ферменные конструкции КА:

- a* – силовая конструкция параболической развертываемой антенны [1];
- б* – раскрытие двухкольцевой развертываемой ферменной конструкции для сверхбольших космических сетчатых антенн [2];
- в* – сверхлегкая несущая ферменная конструкция КА [4]

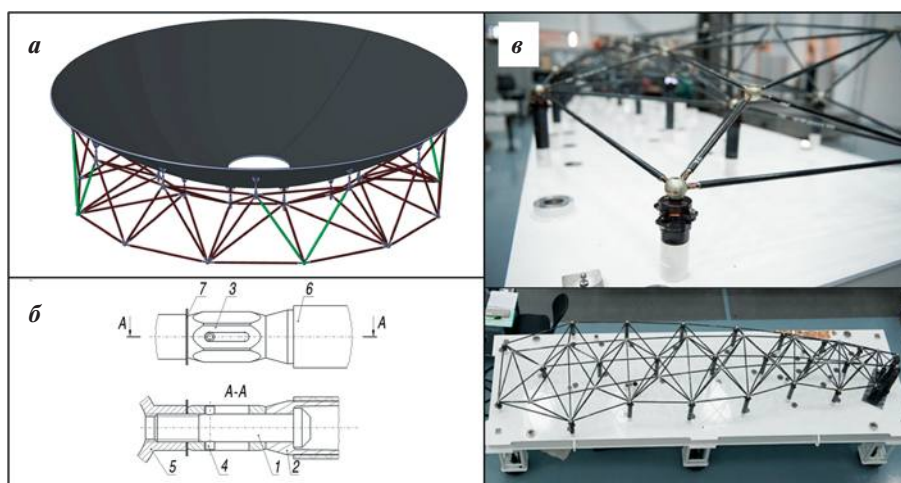


Рис. 2. Пространственная ферменная конструкция КА и ее узловые элементы:

- a* – ферма с рефлектором в сборе; *б* – узел крепления стержня к фитингу (1 – винт; 2 – титановая законцовка; 3 – втулка; 4 – штифт; 5 – фитинг; 6 – углепластиковый стержень; 7 – пакет шайб);
- в* – пространственная ферменная конструкция КА

Второй подход связан с расширением номенклатуры применяемых материалов и предполагает внедрение композитов с повышенными удельными характеристиками жесткости и прочности, а также легких сплавов с улучшенными механическими свойствами для узловых деталей.

Например, в работе [17] исследуется возможность применения углепластика, изготовленного методом бесцентровой намотки, что позволяет создавать длиннопролетные ферменные конструкции с высокой удельной жесткостью для крупногабаритных космических систем. В работе [4] представлена разработка сверхлегкой ферменной конструкции из углерод-армированного полимера и приведены результаты экспериментальных испытаний на сжатие-изгиб, подтвердившие ее высокую несущую способность при минимальной массе.

Третий подход заключается в совершенствовании технологий выполнения неразъемных соединений. Следует отметить, что снижение массы за счет структурной оптимизации и применения новых материалов сопряжено с кратным ростом трудоемкости проектирования и стоимости изготовления. В то же время существует потенциал в совершенствовании технологии создания неразъемных соединений, что определяет актуальность развития третьего направления.

В настоящее время клеевое соединение титановой законцовки с углепластиковой трубой рассматривается как многоуровневая система, последовательно включающая углепластик, клеевую прослойку и титановый сплав. Каждый из компонентов данной системы характеризуется собственным пределом прочности, а ее разрушение может реализовываться по одному из двух механизмов: когезионному либо адгезионному (рис. 3). Анализ характерных значений прочности элементов рассматриваемой системы показывает выраженную неоднородность распределения механических характеристик: предел прочности углепластика вдоль волокон достигает 1500–2000 МПа, титанового сплава — 300–900 МПа, а клея — 25–40 МПа. Без специальной подготовки поверхности адгезионная прочность на границе «титан — клей» составляет

5–12 МПа, что делает ее наиболее слабым звеном системы [5]. Виной всему титан, который относится к группе трудносклеиваемых материалов, так как на его поверхности в естественных условиях всегда присутствует тонкая пассивирующая оксидная пленка, сформированная преимущественно низкоэнергетическим рутилом (TiO_2) и препятствующая образованию прочных межатомных и межмолекулярных связей с функциональными группами клеевой композиции.

Это приводит к тому, что для обеспечения максимальной прочности клеевого соединения необходимо увеличивать площадь склеивания поверхностей деталей, что требует увеличения геометрических размеров зоны соединения и, как следствие, массы узла. Минимальную длину соединения можно определить из положений механики разрушения слоистых материалов и клеевых соединений. Более эффективным путем снижения массы является не наращивание геометрических параметров соединения, а улучшение качества подготовки поверхности титана, что позволит значительно приблизить фактическую площадь контакта к теоретической и повысить адгезионную прочность на границе раздела «титан — клей».

Анализ показывает, что методы повышения адгезионных свойств титановых сплавов реализуются посредством двух групп технологических подходов:

- Первая группа включает методы механической обработки поверхности, в частности абразивное шлифование и пескоструйную очистку, действие которых направлено преимущественно на развитие микрорельефа и увеличение эффективной площади контакта материала с адгезивом [5, 6].
- Вторая группа объединяет методы химико-физической модификации поверхностного слоя, к числу которых относятся кислотное травление, микродуговое оксидирование и плазменная обработка; указанные способы ориентированы на изменение химического состава и энергетических характеристик поверхности, способствующее улучшению ее смачиваемости.

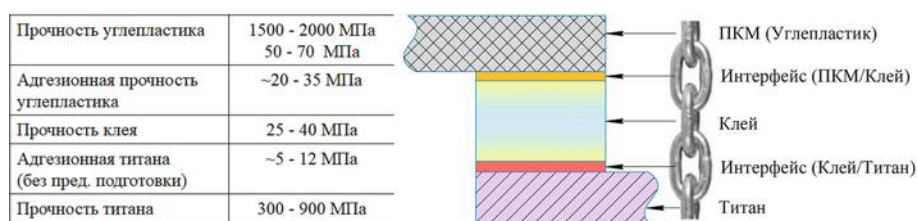


Рис. 3. Схема распределения прочностных характеристик в клеевом соединении «углепластик — титан»

Вместе с тем ни один из перечисленных подходов не позволяет достичь комплексного решения задачи формирования высокопрочных адгезионных соединений, поскольку каждый из них реализует лишь один из механизмов повышения адгезии — механический или химический. Цель настоящего исследования заключается в разработке метода комплексного повышения адгезионной прочности, основанного на лазерном микротекстурировании поверхности титановых сплавов и лишенного функциональной ограниченности традиционных подходов. Применение данного метода позволяет одновременно реализовать механический и химический механизмы повышения адгезии, что ведет к возможности сокращения площади клеевого шва до минимально возможной длины склеивания и, как следствие, к снижению массы конструкции. Для определения практической значимости предлагаемого решения требуется количественная оценка достигаемого снижения массы.

Настоящая работа посвящена исследованию предварительной подготовки титановых сплавов с целью повышения адгезионной прочности, в то время как вопросы механики разрушения клеевого соединения в данной работе не рассматриваются. При изменении конструктивных параметров соединения необходим анализ прочности углепластика. Матрица композиционного материала на основе цианатэфирной смолы имеет предел прочности более 50 МПа, что превышает адгезионную прочность на границе «титан — клей», — следовательно, разрушение матрицы не определяет несущую способность соединения. Для оценки границы раздела «волокно — матрица» использован критерий эффективной длины волокна: для углепластиков она составляет 0,5–2 мм. Стержни фермы изготовлены методом намотки непрерывного волокна, поэтому фактическая длина волокна в зоне вклейки заведомо превышает длину зоны склеивания. Даже в случае, если не учитывать увеличение длины волокна за счет угла намотки и принять длину волокна равной длине вклейки, расчетная длина склеивания остается кратно больше эффективной. Это исключает возможность вытягивания волокна из матрицы и гарантирует прочность границы раздела фаз композита.

Механизм лазерного микротекстурирования

В основе метода лазерного микротекстурирования лежит направленное изменение рельефа и морфологии поверхности посредством локального воздействия лазерного излучения с высокой плотностью энергии. Физическую сущность процесса составляют плавление, испарение и абляция материала в зоне облучения, что позволяет формировать

заданные микро- и наноструктуры без применения контактного инструмента или покрытий [7]. Варьирование параметров лазерного воздействия позволяет получать широкий спектр поверхностных морфологий: лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (LIPSS), микроканалы, микроотверстия, микровыступы (микропиллары), а также пористые и иерархически организованные структуры [8].

На основании результатов предшествующих исследований [12–14], в которых экспериментально подтверждена эффективность повышения прочности клеевых соединений с лазерно-текстурированными поверхностями, в настоящей работе систематизирован механизм формирования поверхностной текстуры. Установлено, что реализация данного механизма требует обоснованного выбора типа лазерного источника, поскольку различные классы лазеров, различающиеся по совокупности физических параметров, прежде всего по длине волны и длительности импульса, инициируют различные механизмы взаимодействия излучения с материалом, что приводит к формированию морфологически неэквивалентных структур.

Классификация лазерных источников демонстрирует широту спектра доступных технологических решений, однако окончательный выбор конкретного типа лазера для задачи текстурирования поверхности определяется требуемыми механизмами взаимодействия излучения с обрабатываемым материалом. Инструментом такого выбора служит диаграмма [9], отражающая взаимосвязь плотности мощности лазерного излучения и длительности импульса, на которой выделены характерные области различных физических процессов при лазерной обработке (рис. 4). При возрастании длительности импульса в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-2} с наблюдается последовательная смена преобладающих механизмов взаимодействия: от испарения тонких пленок и скрайбирования (области I, II) через плавление с выбросом материала (область III) к глубокому проплавлению и термообработке (области IV, V). Каждый из указанных диапазонов характеризуется сочетанием энергетических и временных параметров воздействия, что в совокупности определяет технологические возможности соответствующего режима обработки.

Применительно к задаче лазерного текстурирования поверхности титана с целью повышения прочности клеевого соединения критическим требованием является формирование микрорельефа в виде канавок, обладающих достаточной глубиной и контролируемой морфологией стенок. Анализ диаграммы (рис. 4) показывает, что оптимальное сочетание плотности мощности и длительности

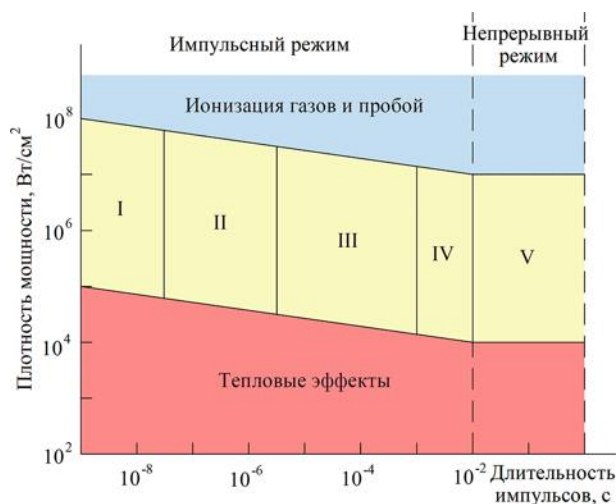


Рис. 4. Применение лазеров для различных видов обработки материала:

- I – испарение тонких пленок;
- II – скрайбирование, испарение пленок;
- III – сверление отверстий, перфорация;
- IV – точечная сварка, термообработка;
- V – глубокое проплавление, газолазерная резка, термообработка [9]

импульса, обеспечивающее реализацию механизмов плавления и гидродинамического вытеснения расплава без формирования избыточной зоны термического влияния, локализуется в переходной области между режимами II и III. Указанному диапазону соответствуют длительности импульса порядка 10^{-6} – 10^{-5} с, характерные для наносекундных лазерных систем. Длительность импульса таких лазеров варьируется от единиц до сотен наносекунд,

а достигаемая плотность мощности оказывается достаточной для абляции металлических материалов.

Различия в механизмах взаимодействия лазерного излучения с материалом, обусловленные длительностью импульса, определяют морфологические особенности формируемых структур и их функциональные свойства. Воздействие наносекундных лазерных импульсов (рис. 5, а, б, г) сопровождается плавлением и частичным испарением материала, вытеснением расплава к периферии зоны облучения с формированием рекристаллизованных валиков и выраженной зоны термического влияния. При использовании фемтосекундных импульсов (рис. 5, а и в) ультракороткая длительность воздействия обеспечивает сверхбыструю абляцию с пренебрежимо малой тепловой диффузией в объем материала, что практически исключает образование жидкой фазы и позволяет формировать микроструктуры с четкими границами и высоким пространственным разрешением.

Отличие между рассматриваемыми режимами заключается в характере изменений поверхностного слоя. Наносекундная обработка способствует образованию переплавленного оксидного слоя на поверхности титана, который обеспечивает повышение адгезионной прочности за счет двух факторов: увеличение физической шероховатости способствует механическому зацеплению клеевого состава, а наличие активных оксидных групп – химической активации поверхности. Фемтосекундная обработка, напротив, не приводит к формированию выраженного оксидного слоя из-за пренебрежимо малой тепловой диффузии и ограниченных процес-

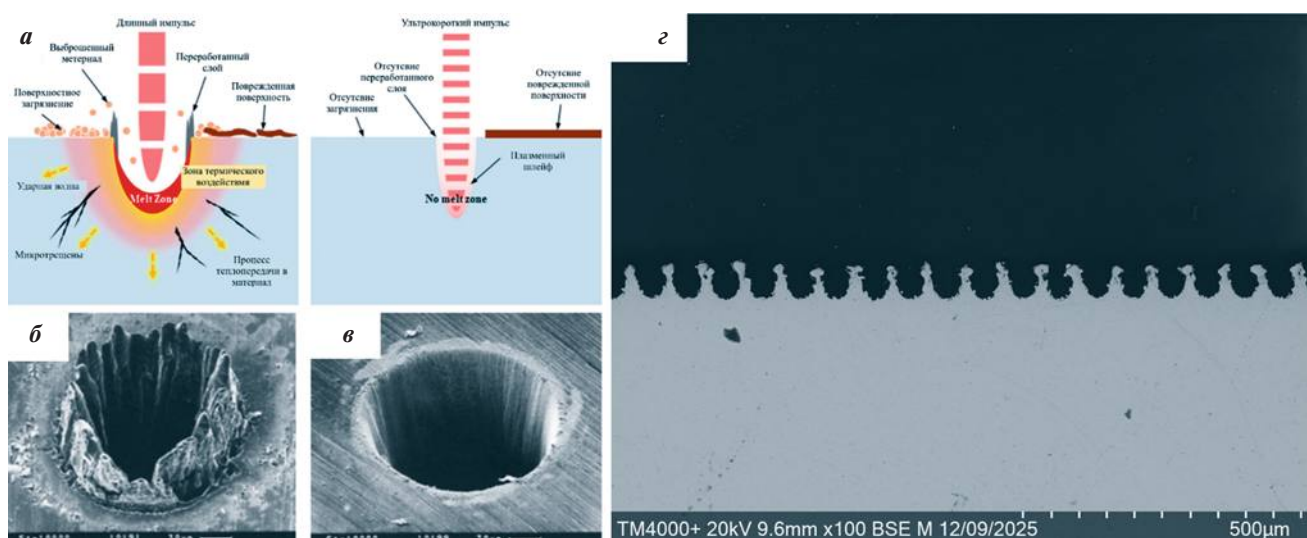


Рис. 5. Механизм формирования и морфология лазерно-индуцированных структур:

- а – схематическое представление образования кратера при наносекундном и фемтосекундном воздействии;
- б – вид кратера (нс-импульс); в – вид кратера (фс-импульс) [10];
- г – поперечный профиль линейной текстуры после наносекундной лазерной обработки

сов окисления, что может ограничивать эффективность адгезионного взаимодействия.

Подход к повышению адгезионной прочности соединений на основе титановых сплавов заключается в целенаправленном формировании на поверхности материала развитой микроструктуры методами лазерной обработки. В зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик соединения, морфология текстуры варьируется в широком пределе, охватывая линейные структуры (системы однонаправленных канавок), сетчатые структуры (регулярные массивы перекрестных канавок), дискретные элементы типа микроотверстий, хаотические структуры, а также комбинированные иерархические структуры, сочетающие элементы перечисленных типов.

На рис. 6 схематически представлен процесс формирования единичной канавки (микроратера) под воздействием наносекундного лазерного импульса. Начальная стадия взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металла характеризуется локальным нагревом материала в пределах зоны облучения (зона II на рис. 6). Специфика наносекундного режима, а именно сочетание высокой пиковой мощности с малой длительностью импульса, обуславливает особенность теплового баланса: подводимая энергия не успевает диссипировать посредством теплопроводности в глубинные слои материала за время действия импульса, что приводит к ее концентрации в тонком приповерхностном слое.

В результате концентрации энергии в приповерхностном слое инициируются процессы плавления с последующим испарением материала, сопровождающиеся формированием плазменного факела (область III на рис. 6). Совместное действие двух факторов давления, генерируемого плазменным шлейфом, и термокапиллярных потоков, возникающих вследствие градиентов поверхностного

натяжения в объеме расплава, инициирует радиальное вытеснение жидкой фазы из центральной части зоны облучения к ее периферии. Определенная доля расплавленного материала при этом может выбрасываться за пределы обрабатываемой поверхности в форме капельной фазы. По завершении лазерного импульса происходит стадия быстрого охлаждения и кристаллизации остаточного расплава, результатом которой является формирование на поверхности характерного кратера, оконтуренного валиками затвердевшего материала.

В процессе лазерного воздействия также протекают изменения химического состояния поверхности. Под действием высокоинтенсивного излучения происходит удаление исходной пассивирующей оксидной пленки рутила, присутствующей на поверхности титана в естественном состоянии. Высокая скорость нагрева, реализуемая в наносекундном режиме, и последующая быстрая кристаллизация расплава создают условия для активного взаимодействия материала с кислородом атмосферы. Результатом данного взаимодействия является формирование на модифицированной поверхности нового оксидного слоя (анатаза), который характеризуется повышенной концентрацией активных центров и, как следствие, более высокой химической активностью по сравнению с исходной пассивирующей пленкой.

Таким образом, совокупность ключевых технологических параметров, определяющих возможность целенаправленного формирования заданной текстуры поверхности, включает среднюю мощность лазерного излучения $P_{\text{ср}}$, скорость сканирования V , частоту следования импульсов f и программу траектории движения луча, задающую коэффициент перекрытия лазерных пятен. Дополнительным фактором управления морфологией структуры служит количество проходов лазерного луча M по одной линии траектории (рис. 7), варьирование

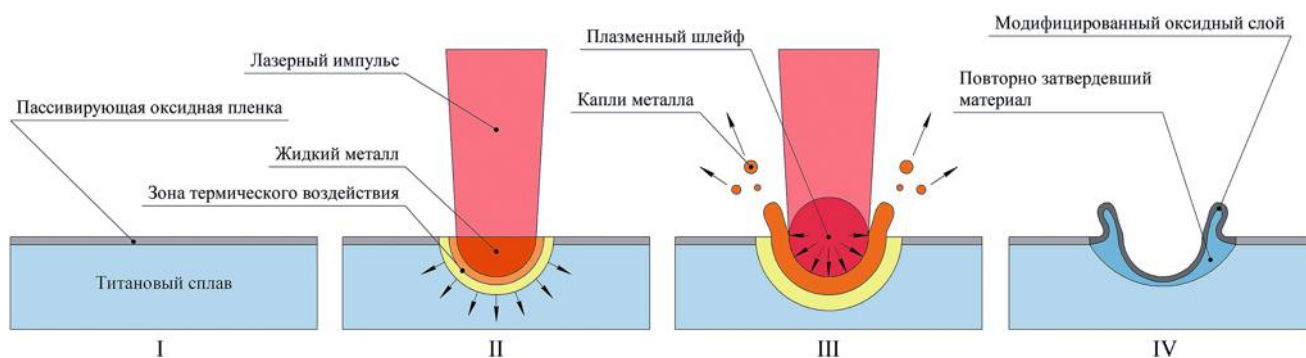


Рис. 6. Схематическое представление последовательности процессов при лазерном текстурировании:

- I — исходное состояние поверхности; II — стадия локального нагрева и плавления;
- III — стадия абляции, формирования плазменного шлейфа и гидродинамического вытеснения расплава;
- IV — стадия охлаждения и кристаллизации с образованием кратера

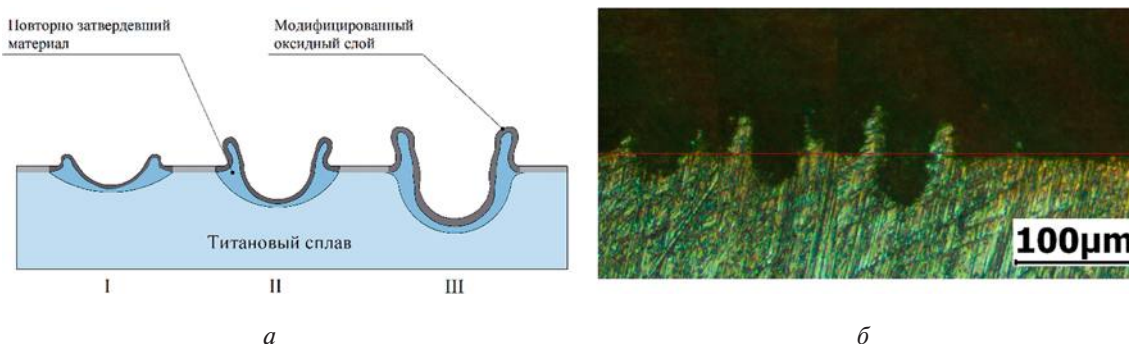


Рис. 7. Формирование глубины канавки при многопроходной лазерной обработке:
 а — схема послойного углубления (I — первый проход, II — второй проход, III — последующие проходы);
 б — поперечный профиль канавки после одного, двух и трех проходов лазерного луча

которого обеспечивает эффективный контроль геометрических характеристик формируемой канавки, прежде всего ее глубины и ширины.

В работе [12] предложена методика лазерного текстурирования тел вращения применительно к титановым законцовкам, включающая разработанный универсальный алгоритм управления обработкой, который обеспечивает точное формирование сетчатой и спиральной текстуры с заданными параметрами: шагом между канавками, углом наклона и длиной обрабатываемой зоны.

Экспериментальная верификация методики проведена на образцах, моделирующих клеевое соединение «углепластиковая труба — титановая законцовка», склеенных трехкомпонентным эпоксидным клеем ВК-9. Для титановых законцовок, обработанных по предложенной методике, получены следующие результаты: при спиральной текстуре с шагом 250 мкм прочность клеевого соединения на сдвиг составила 23,36 МПа, а при уменьшении шага до 125 мкм достигнуто значение 30,42 МПа, что приблизительно на 50% превышает прочность соединений с поверхностью, подготовленной механическим точением.

Оценка снижения массы ферменной конструкции

Количественная оценка массовой эффективности, достигаемой за счет применения лазерного текстурирования, выполнена применительно к силовой ферменной конструкции рефлектора КА на рис. 2,а. Согласно конструкторской документации, масса отражателя с узлами крепления составляет 4,95 кг, масса собственно фермы — 3,4 кг. Конструкция образована 108 углепластиковыми стержнями, в каждый из которых с двух торцов вклеены титановые законцовки; общее количество последних составляет 216 единиц.

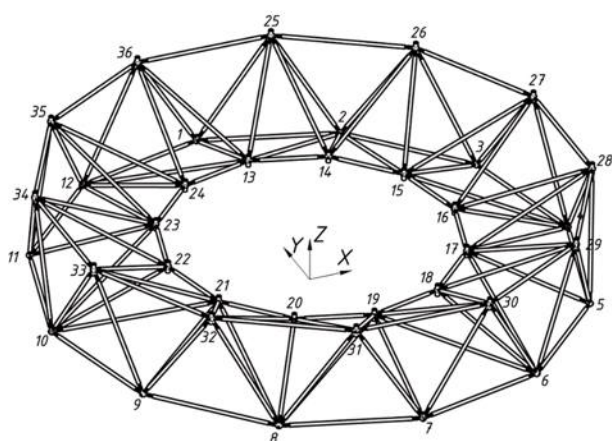
Для определения исходных данных прочностного расчета необходимо оценить уровень внешних силовых воздействий, передаваемых на силовую

конструкцию со стороны рефлектора. В соответствии с техническими требованиями на антенну задана квазистатическая нагрузка величиной 15g ($147,2 \text{ м/с}^2$), действующая по всем трем осям, поскольку плоскость установки аппарата на момент расчета не определена. Численное моделирование нагружения вдоль каждой из координатных осей выполнено в программном комплексе Femar в предположении, что ферма представляет собой идеализированную стержневую конструкцию, т.е. изгибающие моменты в стержнях отсутствуют. Схема нумерации узлов фермы приведена на рис. 8,а. По результатам расчета (рис. 8,б) максимальное продольное усилие в стержнях составило 320 Н как на растяжение, так и на сжатие; для каждого варианта исполнения фитинга определен наиболее нагруженный случай. Силовая конструкция проектируется с двукратным запасом прочности.

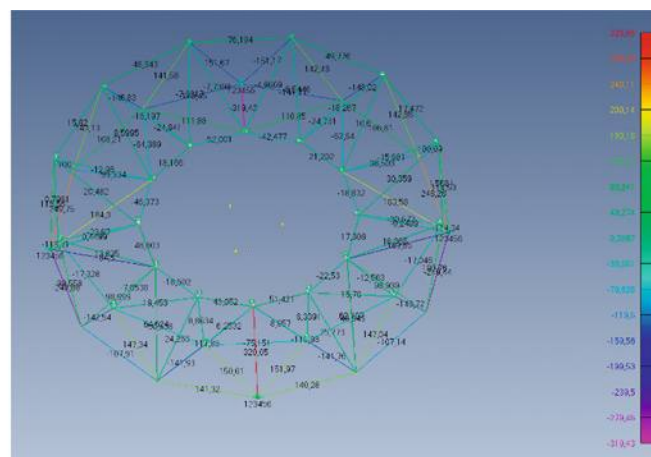
Конструктивно узел соединения представляет собой титановую втулку диаметром 9,6 мм с толщиной стенки 0,8 мм; длина зоны вклеивания втулки в углепластиковую трубку составляет 15 мм. Расчет всей ферменной конструкции ведется по наиболее нагруженному стержню.

Снижение массы фермы достигается сокращением длины зоны вклеивания титановой втулки при условии сохранения требуемого усилия вырыва соединения. В настоящее время нормативный уровень прочности клеевого шва для соединения с титановым сплавом ВТ14, подготовленного методом механического рифления с последующим травлением в кислотных средах, составляет не менее 13,7 МПа. Вместе с тем, согласно экспериментальным данным работы [12], применение лазерного текстурирования поверхности титана спиральной текстурой обеспечивает достижение адгезионной прочности на уровне 25–30 МПа, что существенно превышает действующие нормативные требования.

Условие равнопрочности соединения при фиксированной разрушающей нагрузке F предполагает,



а



б

Рис. 8. Силовая ферменная конструкция рефлектора: а — схема нумерации узлов фермы; б — результат расчета при нагружении по Y рефлектора в сборе

что площадь поверхности склеивания может быть уменьшена обратно пропорционально достигнутому повышению прочности:

$$F = \tau_0 \cdot S_0 = \tau_1 \cdot S_1,$$

где τ_0 , τ_1 — адгезионная прочность клеевого соединения при исходной технологии подготовки поверхности и после лазерного текстурирования; S_0 , S_1 — исходная площадь склеивания и после уменьшения длины зоны вклеивания.

Поскольку площадь контакта $S = \pi dL$, при неизменном диаметре d справедливо соотношение

$$\tau_0 \cdot L_0 = \tau_1 \cdot L_1,$$

откуда требуемая длина клеевого шва после лазерного текстурирования L_1 определяется как

$$L_1 = L_0 \cdot \frac{\tau_0}{\tau_1} = 15 \cdot \frac{13,7}{30} = 6,85 \text{ мм.}$$

Сокращение длины зоны вклеивания на одном соединении составляет $\Delta L = L_0 - L_1 = 8,15$ мм. При погонной массе титановой втулки данного типоразмера, отнесенной к единице длины зоны вклеивания ($K \approx 0,1$ г/мм), снижение массы Δm с одного узла равно:

$$\Delta m = \Delta L \cdot K = 8,15 \cdot 0,1 = 0,815 \text{ г.}$$

В масштабах ферменной конструкции, насчитывающей 216 идентичных узлов (N), суммарное снижение массы ΔM составит:

$$\Delta M = \Delta m \cdot n = 0,815 \cdot 216 = 176,04 \text{ г.}$$

Достигнутое относительное снижение массы ферменной конструкции, определяемое как $\Delta M/M_0 = 176/3400 \approx 5,1\%$, является значимым

результатом в проектировании КА, поскольку высвобождаемый массовый ресурс можно направить на пропорциональное увеличение массы полезной нагрузки. Расчетные оценки, выполненные для ряда других типоразмеров ферменных конструкций космического назначения, показали, что относительное снижение массы при использовании лазерного текстурирования титановых законцовок устойчиво находится в диапазоне 4,5–5,0%, что подтверждает воспроизводимость и универсальность предлагаемого технического решения.

Приведенная оценка снижения массы выполнена в первом приближении, исходя из условия равномерного распределения касательных напряжений по площади склеивания, и имеет ориентировочный характер. Окончательное определение минимально допустимой длины зоны вклеивания требует уточнения при проектировании конкретного узла с использованием численных методов и учетом концентрации напряжений на торцах соединения.

Выводы

Лазерное текстурирование поверхности титановых законцовок в наносекундном режиме является эффективным методом повышения адгезионной прочности клеевых соединений, что обеспечивается сочетанным действием трех факторов: увеличения площади физического контакта клеевой композиции с поверхностью металла, механической анкеровки за счет формирования регулярного микрорельефа в виде канавок заданной геометрии и химической активации поверхности вследствие термохимической модификации оксидного слоя.

Достигнутое в экспериментах повышение адгезионной прочности на границе «титан — клей» до

30 МПа позволяет сократить длину зоны вклеивания титановой втулки в углепластиковую трубку при сохранении требуемой несущей способности соединения.

Расчетные оценки для различных типов разъемов ферменных конструкций космического

назначения подтверждают устойчивость достигнутого эффекта: относительное снижение массы конструкции стабильно находится в диапазоне 4,5–5,0%, что свидетельствует о воспроизводимости и практической значимости предлагаемого технического решения.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Zhou S, Yang Z, Zhang K, et al. Rigid-flexible-thermal coupling dynamic modeling and attitude control of large spaceborne deployable parabolic truss antenna. *Advances in Space Research*. 2026;77(4):5364–5381. DOI: 10.1016/j.asr.2025.12.026
2. Liu Z, Liu Y, Yang D, et al. A double-ring deployable truss structure for super-large spaceborne mesh antennas: Dynamic modeling, multi-objective optimization, and experimental validation. *Engineering Structures*. 2025;344:121367. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121367
3. Li S, Zhao Y, Liu E, et al. Design and performance investigation of a novel tetrahedral-based high stiffness truss deployable antenna support mechanism. *Acta Astronautica*. 2026;238 Part B:289–306. DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.10.015
4. Li S, Chen W, Hu J, et al. Structural design and compression-bending test of ultra-lightweight carbon-fiber-reinforced polymer truss structures. *Composite Structures*. 2023;313:116909. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116909
5. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 25–35.
Sibileva SV, Karimova SA. Surface treatment of titanium alloys to provide adhesion properties. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2013(S2):25–35. (In Russ.).
6. Shirasu K, Mizuno T, Hoshikawa T, et al. Experimental and numerical evaluation of the interfacial adhesion properties of additively manufactured carbon-fiber-reinforced thermoplastic/64 titanium hybrids. *Composites Science and Technology*. 2025;271:111338. DOI: 10.1016/j.compscitech.2025.111338
7. Min J, Wan H, Carlson BE, et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020;128:106188. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188
8. Wang H, Deng D, Zhai Z, et al. Laser-processed functional surface structures for multi-functional applications - a review. *Journal of Manufacturing*. 2024;116:247–283. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.02.062
9. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
Grigoryants AG. *Fundamentals of laser processing of materials*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 304 p. (In Russ.).
10. Udaya Kumar G, Suresh S, Sujith Kumar CS, et al. A review on the role of laser textured surfaces on boiling heat transfer. *Applied Thermal Engineering*. 2020;174:115274. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115274
11. Wan H, Min J, Lin J, et al. Effect of laser spot overlap ratio on surface characteristics and adhesive bonding strength of an Al alloy processed by nanosecond pulsed laser. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:555–565, DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.12.055
12. Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е. и др. Метод лазерного текстурирования тел вращения для повышения адгезионной прочности титанового сплава // Инженерный журнал: наука и инновации. 2025. № 11(167).
Rudenko MS, Girn AV, Mikheev AE. The method of laser texturing of bodies of rotation to increase the adhesive strength of titanium alloy. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2025(11):6. (In Russ.).
13. Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е. и др. Влияние лазерного текстурирования поверхности титанового сплава на адгезионную прочность клеевых соединений // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 3. С. 391–403. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403
Rudenko MS, Girn AV, Mikheev AE, et al. The effect of laser texturing of the surface of a titanium alloy on the adhesive strength of adhesive joints. *Siberian Aerospace Journal*. 2024;25(3):391–403. (In Russ.).
14. Гирн А.В., Руденко М.С., Тайгин В.Б. и др. Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 2(40). С. 90–101. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03
Girn AV, Rudenko MS, Taigin VB, et al. The effect of laser surface treatment of titanium samples on the adhesive strength of adhesive joints. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2022;6(2):90–101. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03

15. Savsani VJ, Tejani GG, Patel VK, et al. Modified Meta-Heuristics Using Random Mutation for Truss Topology Optimization with Static and Dynamic Constraints. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2017;4(2):106–130. DOI: 10.1016/J.JCDE.2016.10.002
16. Xu K, Zhuang X, Su Z, et al. A novel stiffness optimization model of space telescopic boom based on locking mechanism. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2024;19(18). DOI: 10.1007/s11465-024-0789-z
17. Mindermann P, Acker D, Wegner R, et al. Long-span fiber composite truss made by coreless filament winding for large-scale satellite structural systems demonstrated on a planetary sunshade concept. *Scientific Reports*. 2024(14):8190. DOI: 10.1038/s41598-024-58513-w
18. Zhang H, Li F, Li D, et al. The impact of joint stiffness on the mechanical properties of FRP truss girder: Experimental and theoretical study. *Structures*. 2025;78:109323. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109323
19. Liu Z, Ding Y, Quan C, et al. Optimization of a novel, bidirectional, double-ring, deployable mesh antenna with a super-large aperture. *Acta Astronautica*. 2024;214:202–215. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.10.031
20. Филина Е.К., Голубев Е.С., Михайловский К.В. и др. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. №. 4. С. 276–284. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-276-284
Filina EK, Mikhailovskiy KV, Arkhipov MY, Golubev ES. Design of the structural arrangement for a space reflector via parametric and topology optimization. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):276–284. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 20.05.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 03.06.2026
Принята к публикации / Accepted 09.07.2026