

УДК 620.1:669.295

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403

Для цитирования: Влияние лазерного текстурирования поверхности титанового сплава на адгезионную прочность клеевых соединений / М. С. Руденко, А. В. Гирн, А. Е. Михеев, Д. И. Орешкин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 3. С. 391–403. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403.

For citation: Rudenko M. S., Girn A. V., Mikheev A. E., Oreshkin D. I. [The effect of laser texturing of the surface of a titanium alloy on the adhesive strength of adhesive joints]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 3, P. 391–403. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403.

Влияние лазерного текстурирования поверхности титанового сплава на адгезионную прочность клеевых соединений

М. С. Руденко*, А. В. Гирн, А. Е. Михеев, Д. И. Орешкин

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

В работе рассмотрены вопросы, связанные с влиянием лазерного текстурирования поверхности титанового сплава на характеристики клеевого соединения «титан – углепластик». Иттербиевым импульсным волоконным лазером на поверхности титанового сплава были созданы текстуры с линейной структурой (0° – 0° и 90° – 90°) и сетчатой структурой (0° – 90° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$). Были определены значения шероховатости поверхности в двух перпендикулярных направлениях и сделаны микрошлифы, по которым можно охарактеризовать морфологию поверхности титанового сплава. Для определения адгезионной прочности соединения, между собой склеивались образцы с одинаковой текстурой поверхности. Образцы склеивались по ОСТ 1-90281–86. Склеивание проводилось в течение 24 ч после лазерной обработки поверхности. Перед склеиванием обработанная поверхность очищалась изопропиловым спиртом. Площадь клеевого соединения $S = 300 \text{ мм}^2$. В качестве адгезива использовался трехкомпонентный клей ВК-9 на основе эпоксидной и полиамидной смолы. Лазерная обработка поверхности титановых сплавов увеличивает прочность клеевого соединения более чем на 70 % относительно необработанной поверхности. Это может свидетельствовать о том, что главными механизмами повышения прочности клеевого соединения являются увеличение площади контакта поверхности и адгезива, а также химическая модификация, которая активирует поверхность. Текстура обработки в меньшей степени влияет на адгезионную прочность при условии одинаковой удельной поверхностной энергии лазерной обработки. При лазерной обработке стоит уделять большое внимание выбору текстуры поверхности, потому что определенные текстуры могут дать прирост прочности на 20–30 %. Если тип нагрузки в элементах ферменных конструкций известен, то лучше использовать линейные текстуры, направленные перпендикулярно направлению нагрузки (для сдвига – текстура 0° – 0° ; для кручения – текстура 90° – 90°). При смешанных нагрузках лучше использовать сетчатые структуры $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, которые сопротивляются нагрузкам в двух направлениях.

Ключевые слова: лазерное текстурирование, повышение прочности клеевого соединения, титановые сплавы.

The effect of laser texturing of the surface of a titanium alloy on the adhesive strength of adhesive joints

M. S. Rudenko*, A. V. Girn, A. E. Mikheev, D. I. Oreshkin

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

The paper examines issues related to the influence of laser texturing of the surface of a titanium alloy on the characteristics of the titanium-carbon fiber adhesive joint. Using an ytterbium pulsed fiber laser, textures with a linear structure (0° – 0° and 90° – 90°) and a mesh structure (0° – 90° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$) were created on the surface of a titanium alloy. The surface roughness values in two perpendicular directions were determined, and microsections were made, which can be used to characterize the surface morphology of the titanium alloy. To determine the adhesive strength of the joint, samples with the same surface texture were glued together. The samples were glued together according to OST 1-90281–86. Bonding was carried out within 24 hours after laser surface treatment. Before gluing, the treated surface was cleaned with isopropyl alcohol. Adhesive joint area $S = 300 \text{ mm}^2$. Three-component adhesive VK-9 based on epoxy and polyamide resin was used as an adhesive. Laser surface treatment of titanium alloys increases the strength of the adhesive joint by more than 70 % relative to the untreated surface. This may indicate that the main mechanisms for increasing the strength of an adhesive joint are an increase in the contact area between the surface and the adhesive, and chemical modification that activates the surface. The processing texture has a lesser effect on the adhesive strength, provided that the specific surface energy of the laser processing is the same. When laser processing, you should pay great attention to the choice of surface texture, because certain textures can give an increase in strength by 20–30 %. If the type of load in the truss load elements is known, then it is better to use linear textures directed perpendicular to the direction of the load (for shear – texture 0° – 0° ; for torsion – texture 90° – 90°). For mixed loads, it is better to use mesh structures $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, which resist loads in two directions.

Keywords: laser texturing, increasing the strength of the adhesive joint, titanium alloys.

Введение

В современных космических аппаратах (КА) широко применяются ферменные конструкции, которые обеспечивают высокую прочность и жесткость изделия при минимальной массе. Одной из ключевых задач при разработке таких конструкций является достижение оптимальных механических характеристик и геометрической точности изделий для обеспечения безопасного и эффективного функционирования КА. Для решения этой задачи в области производства КА активно развиваются новые технологии и разрабатываются материалы, предназначенные для создания ферменных конструкций с улучшенными характеристиками [1–3].

Например, в космической обсерватории «Миллиметрон» конструкция фермы главного зеркала состоит из набора углепластиковых стержней, соединяющихся в узловых элементах (фитингах), выполненных из титанового сплава ВТ6 [4]. Схема конструкции представлена на рис. 1. Изготовление узловых элементов 3 производят технологией селективного лазерного плавления (SLM – Selective Laser Melting), затем в эти узлы крепятся углепластиковые стержни 1 с клееными в них титановыми законцовками 2.

Наибольшая проблема, возникающая при изготовлении этого узла, связана с обеспечением надежного соединения при склеивании углепластиковой штанги с титановой законцовкой. Это является общей проблемой для конструкций, в которых необходимо выполнить соединение «композит – металл» [5; 6].

Титановые сплавы, из которых изготовлены законцовки, относятся к трудносклеиваемым материалам, в связи с присутствием на их поверхности аморфной оксидной пленки, которая

не позволяет адгезиву образовать прочную связь с поверхностью титана. Вследствие этого, для увеличения прочности клеевого соединения, поверхность титанового сплава необходимо подвергать предварительной обработке перед склеиванием [7]. Традиционными методами увеличения прочности клеевого соединения «углепластик – титан» являются предварительная механическая или электрохимическая обработка поверхности титанового сплава [8; 9] или комбинированный метод механической и химической обработки [10]. Механическая обработка (шлифование, точение, фрезерование) увеличивает площадь контакта между поверхностью металла и адгезива, а химическая обработка преобразует аморфную оксидную пленку в кристаллический оксидный слой с высокой валентностью, который обеспечивает лучшее сцепление с адгезивом.

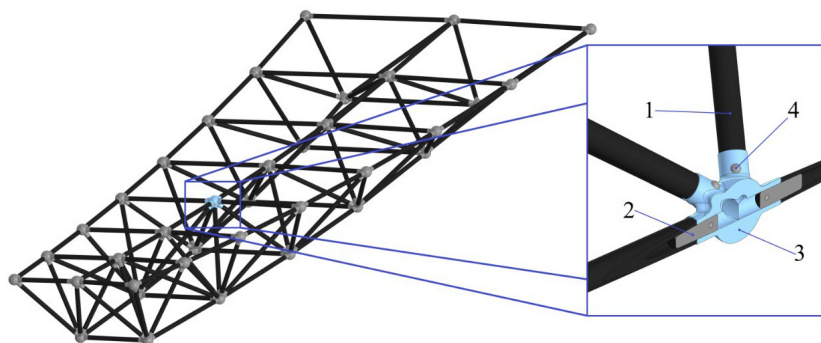


Рис. 1. Ферменная конструкция КА:

1 – углепластиковый стержень; 2 – титановая законцовка, вклеенная в стержень;
3 – узловой элемент, изготовленный технологией SLM; 4 – фиксатор законцовки в узловом элементе

Fig. 1. Truss structure of the spacecraft:

1 – carbon fiber rod; 2 – titanium tip glued into the rod; 3 – nodal element manufactured by SLM technology; 4 – end clamp in the nodal element

Кроме того, развиваются альтернативные методы подготовки поверхности, такие как обработка концентрированными источниками энергии (плазменные потоки, электронный луч, излучение лазера), нанесение покрытий (в том числе электрохимических, газотермических и др.), ультразвуковая обработка поверхности [7].

С развитием современной техники, лазер всё чаще используется в обработке поверхности в машиностроении наряду с другими высококонцентрированными источниками энергии, в том числе для сварки, резки, создания функциональных поверхностных структур (ФПС) [11].

В промышленном производстве лазерная обработка является более экономичным и экологическим процессом по сравнению с механической и электрохимической обработкой. Кроме того, лазерная обработка отличается простотой реализации при автоматизации процесса [12; 13]. Однако технологические режимы лазерной подготовки и факторы, влияющие на качество клеевого соединения, в настоящее время изучены недостаточно, что препятствует её широкому внедрению в производство. Увеличение прочности клеевого соединения за счет лазерной обработки поверхности металла является совокупностью нескольких факторов, таких как увеличение площади контакта между поверхностью и адгезивом, изменение химического состава поверхности, а также создание сложного рельефа поверхности, состоящего из канавок и микрополостей, в которые попадает клей и создает эффект механического «запирания». Таким образом, исследование влияния лазерной обработки на формирование ФПС и определение режимов обработки поверхности перед склеиванием является целью данной работы.

Можно выделить следующие основные параметры лазерной обработки, которые влияют на адгезионные свойства поверхности металла: мощность лазера, скорость и частота обработки, текстура обработки.

Текстура поверхности – это локальное отклонение поверхности от идеально ровной плоскости. Мера текстуры поверхности, как правило, определяется с точки зрения ее шероховатости,

волнистости и формы. Лазерной обработкой возможно создавать такие элементы текстуры, как микроканавки, микроотверстия, микростолбы, пористые и иерархические структуры, поверхностную рябь [11]. Различные комбинации этих элементов создают безграничное число поверхностных текстур, которые можно создать лазерной обработкой.

В понятие «текстура обработки» входят следующие параметры: шаг между линиями траектории движения лазера, угол между этими линиями, количество проходов лазера по одной линии, коэффициент перекрытия. Совокупность всех параметров лазерной обработки влияет на поверхностную плотность энергии лазера E_p , которая и определяет макро- и микроструктуру поверхности, ее химический и фазовый состав, смачиваемость поверхности и др.

В работе [14] нами было исследовано влияние лазерной обработки поверхности титанового сплава на прочностные свойства клеевого соединения при сдвиге. Были выявлены режимы обработки для наиболее характерного типа текстуры – однонаправленной, поперек к направлению сдвига.

В зависимости от программы лазерной обработки металла можно создавать множество различных текстур поверхности, которые будут влиять на прочность клеевого соединения. Коэффициент перекрытия лазерного пятна на поверхности является важным критерием лазерной обработки, от которой зависит текстура поверхности. Коэффициенты перекрытия в двух перпендикулярных направлениях могут отличаться друг друга. Если вдоль траектории обработки коэффициент перекрытия (при постоянной площади лазерного пятна) зависит от скорости и частоты лазера, то между линиями траектории коэффициент зависит только от шага между ними [15].

Основными нагрузками, возникающими в силовых элементах ферменных конструкций, включающих соединения трубчатых стержней и законцовок, являются нагрузки на сдвиг и кручение (рис. 2, а). Касательные напряжения при сдвиге, направлены вдоль оси стержня, а при кручении по касательной к его радиусу. Микроканавки на поверхности цилиндрической законцовки могут способствовать увеличению максимальной нагрузки при разрушении. От направления текстуры поверхности будет зависеть, каким видам нагрузки соединение будет препятствовать в большей степени. Угол обработки $\alpha = 0^\circ$ должен способствовать увеличению прочности на сдвиг, угол обработки $\alpha = 90^\circ$ должен способствует увеличению прочности при кручении, а промежуточные направления обработки $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ должны увеличивать прочность при смешанной нагрузке (рис. 2, б).

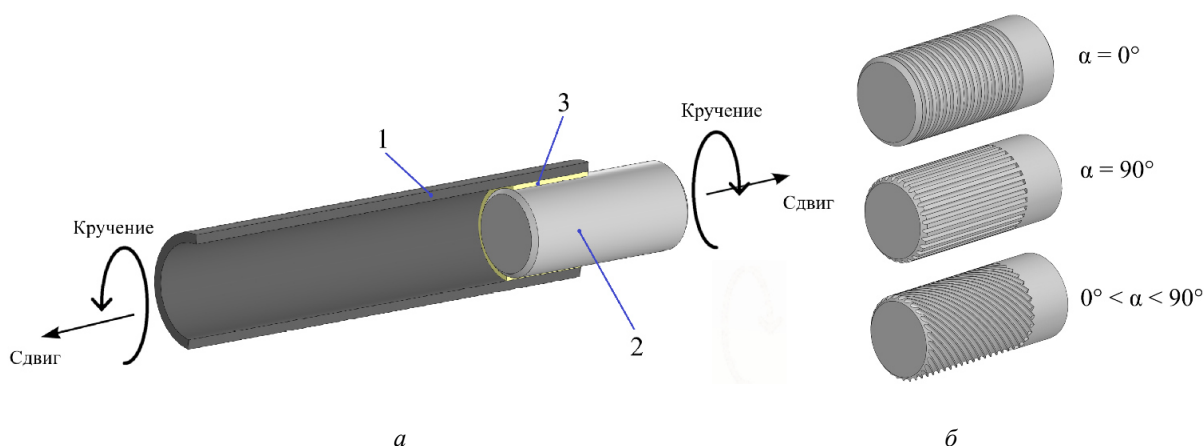


Рис. 2. Схема клеевого соединения цилиндрических деталей:
а – элемент трубчатого клеевого соединения с приведёнными нагрузками, где 1 – углепластиковый стержень, 2 – металлическая законцовка, 3 – клей;
б – направление микроканавок на металлических цилиндрических законцовках

Fig. 2. Scheme of adhesive connection of cylindrical parts:
а – element of a tubular adhesive joint with reduced loads, where 1 – carbon fiber rod, 2 – metal ending, 3 – glue; б – direction of microgrooves on metal cylindrical ends

Основной задачей данного исследования является экспериментальное определение характеристик клеевого соединения образцов из титановых сплавов ОТ-4 с различными текстурами, полученными лазерной обработкой, и определение текстуры обработки цилиндрических законцовок в элементах КА.

Поскольку испытания цилиндрических деталей связано с необходимостью использования дополнительной оснастки и сложностью выполнения клеевого соединения образцов, в работе было принято ввести некоторое модельное упрощение, которое состоит в том, что поверхность цилиндра как бы «разворачивается» в плоскость (рис. 3) и при этом плоские образцы можно испытывать по ГОСТ 92-0949–74 (рис. 4). Текстуры характеризуются следующими параметрами: α_1 – угол наклона первой обработки лазера, α_2 – угол наклона второй обработки лазера, δ – шаг между канавками.

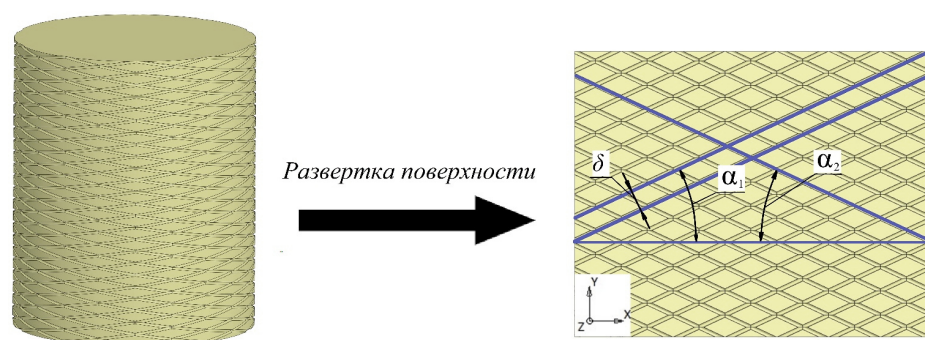


Рис. 3. Развертка поверхности цилиндра (титановой заглушки) с канавками от лазерной обработки на плоскость

Fig. 3. Unfolding the surface of a cylinder (titanium plug) with grooves from laser processing onto a plane

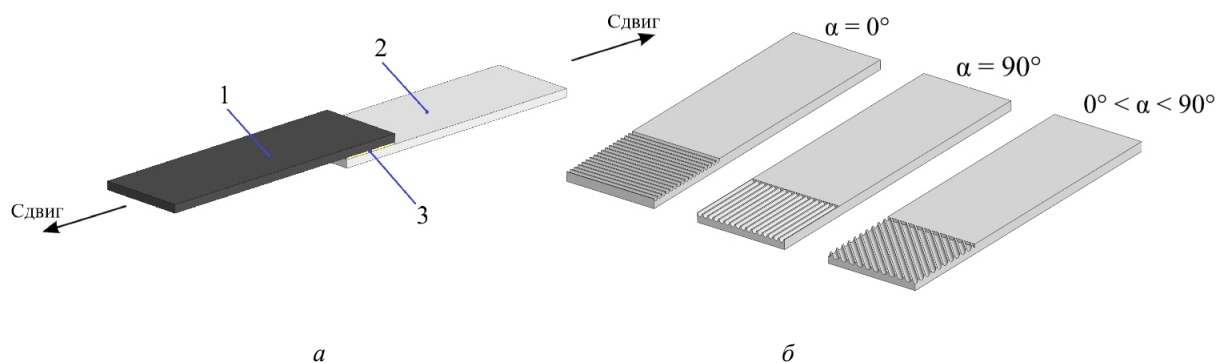


Рис. 4. Схема клеевого соединения плоских деталей:

a – образец для испытания текстуры поверхности на адгезионную прочность, где 1 – пластина из ПКМ, 2 – титановая пластина с лазерным текстурированием, 3 – адгезив;
б – схематическое изображение текстур на поверхности титана от угла лазерной обработки

Fig. 4. Scheme of adhesive connection of flat parts:

a – sample for testing surface texture for adhesive strength, where 1 – PCM plate, 2 – titanium plate with laser texturing, 3 – adhesive; *b* – schematic representation of textures on the surface of titanium from the angle of laser processing

В данном исследовании, в качестве текстур выбраны линейные (однонаправленные) и сетчатые (двунаправленные) структуры, в которых траектории обработки пересекаются между собой под разными углами (0° , 30° , 45° , 60° и 90°).

Для корректного сравнения результатов прочности клеевого соединения с различными текстурами, поверхностная плотность энергии лазера E_p должна быть постоянной на всех выбранных текстурах. Для образования сетчатых структур необходимо приложить энергии лазера в два раза больше, чем у линейных структур, поэтому для выравнивания этого показателя линейную структуру необходимо обработать дважды.

Эксперимент

Определение влияния угла обработки на прочность клеевого соединения проведено по следующей схеме:

- создание различных текстур на поверхности образцов из титанового сплава лазерной обработкой;
- исследование микрорельефа и шероховатости поверхности обработанных образцов;
- склеивание образцов с одинаковой текстурой для испытания на сдвиг;
- проведение испытания склеенных образцов на сдвиг;
- анализ полученных результатов.


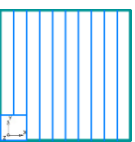
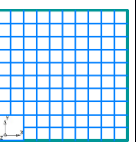
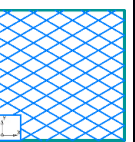
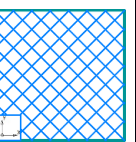
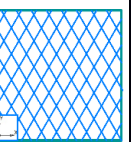
В качестве образцов использовались пластины из титанового сплава ОТ-4, который широко применяется в конструкциях КА. Размер образцов составлял $70 \times 20 \times 2$ мм. Зона лазерной обработки 20×20 мм с одной из сторон пластины.

Обработка поверхности образцов проводилась иттербиевым импульсным волоконным лазером (IPG, YLPM-1-4×200-20-20) при комнатной температуре в стандартной атмосфере. Параметры лазерной обработки соответствуют режиму № 1 из работы [14] (табл. 1), так как этот режим используется для создания структурированных микроканалов глубиной 40 и 60 мкм при однократной и двукратной обработках соответственно [16].

Схемы текстур представлены в табл. 1, где α_1 – угол наклона первого прохода лазера, α_2 – угол наклона второго прохода лазера. Шаг между канавками в каждой текстуре $\delta = 66,7$ мкм.

Таблица 1

Режимы лазерного текстурирования

№	1	2	3	4	5	6
Схема текстуры						
α_1	0°	90°	0°	30°	45°	60°
α_2	0°	90°	90°	–30°	–45°	–60°
Мощность лазера, Вт	10					
Скорость обработки, мм/с	200					
Количество полос на 1 мм, мм ^{–1}	15					
Длина волны лазера, мкм	1,064					
Частота следования импульса, кГц	40					
Ширина импульса, нс	200					
Энергия в импульсе, мДж	1					

Для обеспечения статической надежности исследования испытания проводились на трех образцах с каждой выбранной текстурой.

Образцы склеивались по ОСТ 1-90281–86. Склеивание проводилось в течение 24 ч после лазерной обработки поверхности. Перед склеиванием обработанная поверхность очищалась изопропиловым спиртом. Площадь клеевого соединения $S = 300$ мм². В качестве адгезива исполь-

зовался трехкомпонентный клей ВК-9 на основе эпоксидной и полиамидной смолы. Испытания на сдвиг проводились через 7 дней после склеивания для полной полимеризации клея на воздухе при комнатной температуре.

Для определения адгезионной прочности соединения между собой склеивались образцы с одинаковой текстурой поверхности. Склеивание титана с углепластиком не дает возможности определить адгезионную прочность клеевого соединения, поскольку в таком случае происходит когезионное разрушение по углепластику.

Определения прочности клеевого соединения на сдвиг (англ. Single-Lap Shear Test) проводили на универсальной разрывной машине (Eurotest T-50, S.A.E.IBERTEST, Испания) со скоростью 5 мм/мин.

Для анализа микрорельефа обработанных поверхностей использовали оптический металлографический микроскоп (Neophot-32, Carl Zeiss, Германия).

Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай) в двух перпендикулярных направлениях X и Y (табл. 2).

Результаты и обсуждения

На рис. 5 показаны значения шероховатости поверхности титанового сплава после лазерной обработки в двух перпендикулярных направлениях.

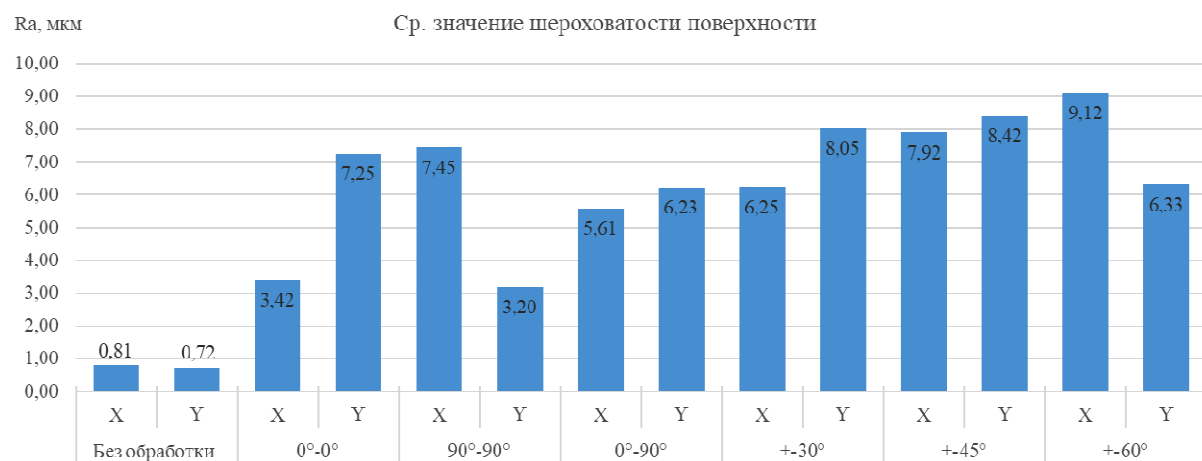


Рис. 5. Значение шероховатости поверхности титана в зависимости от текстуры лазерной обработки в двух перпендикулярных направлениях

Fig.5. The value of titanium surface roughness depending on the texture of laser processing in two perpendicular directions

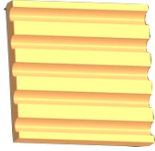
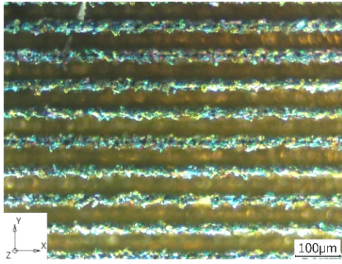
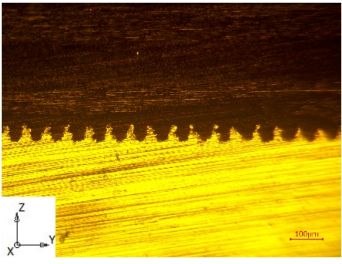

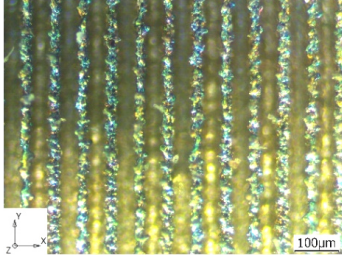
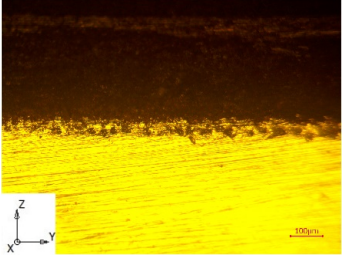
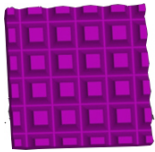
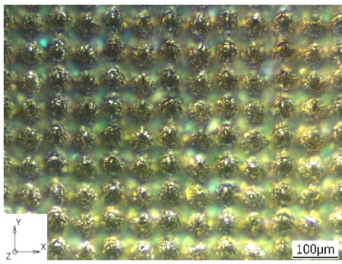
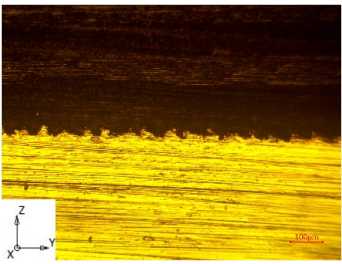
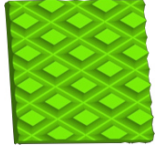
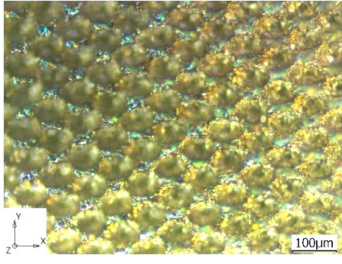
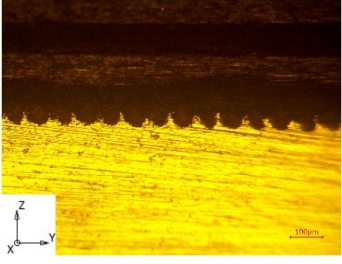

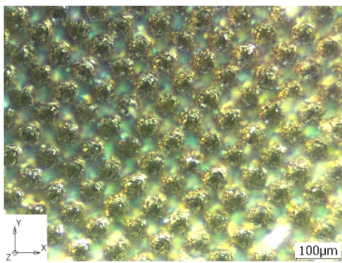
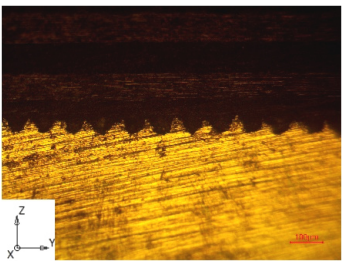
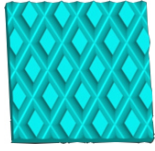
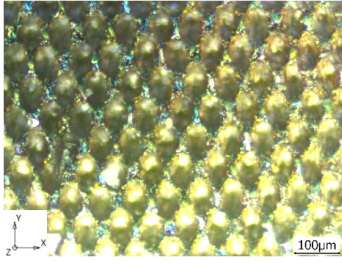
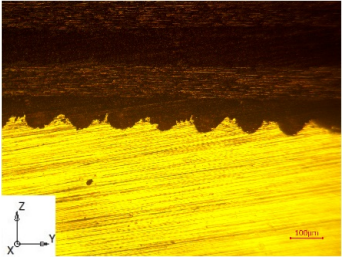
В табл. 2 представлена морфология структуры поверхности, согласно текстуре лазерной обработки.

На рис. 6 представлены результаты средних значений прочности на сдвиг клеевых соединений с разными текстурами поверхности. Характер разрушения для всех образцов – когезионный по клею.

Измерение показало, что у линейных текстур (0°-0° и 90°-90°) значение шероховатости значительно отличается в зависимости от направления. У сетчатых текстур значение шероховатости зависит от направления обработки не так значительно, как у линейных. Текстуры 0°-0° и 90°-90°, а также ±30° и ±60°, являются идентичными текстурами, развернутыми относительно друг друга на 90°. Текстуры 0°-90° и ±45° идентичны, но развернуты на 45° относительно друг друга. Значение шероховатости по одному направлению у идентичных текстур соответствует значению шероховатости в перпендикулярном направлении у другой идентичной текстуры, развернутой на 90°. Шероховатость поверхности под действием лазерной обработки увеличивается в 4–12 раз относительно необработанной поверхности.

Таблица 2

Параметры текстур

	α_1	α_2		Вид сверху	Микрошлиф (вид сбоку)
1	0°	0°			
2	90°	90°			
3	0°	90°			
4	30°	-30°			
5	45°	-45°			
6	60°	-60°			

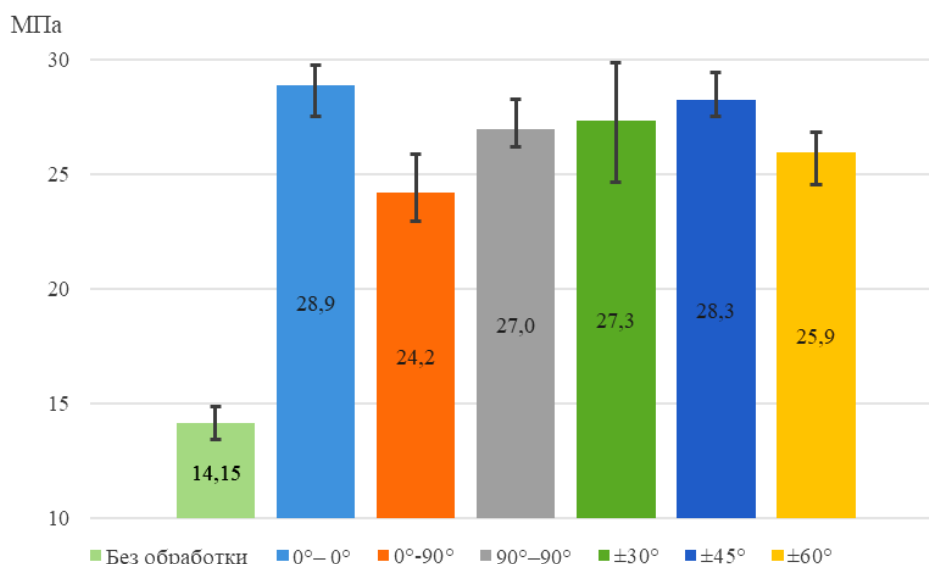


Рис. 6. Прочность клеевого соединения от угла текстурирования поверхности

Fig. 6. The strength of the adhesive bond depends on the surface texturing angle

Металлографический анализ текстур (см. табл. 2), показывает, что параметры текстур соответствуют направлению программной обработки поверхности и заданному шагу между траекториями обработки. Лазерный луч, перемещаясь по поверхности металла, локально его расплавляет, выдавливает из центра к периферии и испаряет, создавая «микроранавку» глубиной до 40 мкм. Повторное воздействие лазера на то же место углубляет канавку. Расплавленный материал, выдавленный из центра канавки, затвердевает и создает гребень между траекториями лазерной обработки. У сетчатых структур первый проход лазерной обработки под углом α_1 создает гребень между траекториями, но второй проход под углом α_2 его разрушает в местах пересечения траекторий.

Результаты испытаний на адгезионную прочность при сдвиге показали, что, независимо от вида текстуры, полученной при обработке поверхности, прочность клеевого соединения увеличилась более чем на 70 %. Это может свидетельствовать о том, что главными механизмами повышения прочности клеевого соединения являются увеличение площади контакта поверхности и адгезива, а также химическая модификация, которая активизирует поверхность. Текстура обработки в меньшей степени влияет на адгезионную прочность при условии одинаковой удельной поверхностной энергии лазерной обработки.

Наилучший результат прочности клеевого соединения на сдвиг $\tau_{cp} = 28,9$ МПа показала текстура 0°–0°. Если сравнивать с прочностью клеевого соединения без обработки «титан – титан» из работы [14], которая составляет 14,15 МПа, то текстура 0°–0° увеличила прочность на 104 %. Прочность клеевого соединения с текстурой 0°–90° показала наименьший результат $\tau_{cp} = 24,2$ МПа относительно других текстур, но прирост относительно необработанной поверхности составляет 71 %. Результаты исследования показали, что можно увеличить прочность клеевого соединения на 20 % только за счёт текстуры поверхности.

Текстура 0°–0° относительно остальных исследуемых текстур в большей степени сопротивляется сдвиговым нагрузкам. Этому способствует линейная структура микроранавок в перпендикулярном направлении сдвига. Гребни канавок, которые образовались под действие давления лазера, являются микроупором для клея, препятствующим движению клея при сдвиговой нагрузке.

У сетчатых структур $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ упором для адгезива является гребень, образованный пересечением лазерных траекторий. У текстуры $\pm 60^\circ$ гребень является самым узким из сетчатых структур. Это объясняет низкое значение прочности.

У текстуры 90° – 90° упор в направлении сдвига отсутствует, но из-за большей площади контакта за счет более глубокой канавки, чем у сетчатых структур, и отсутствия разрушенного гребня она показывает относительно высокие значения прочности.

Текстура 0° – 90° показала наихудший результат среди исследуемых текстур. Гребень, который мог быть упором для клея, был разрушен вторым проходом лазерной обработки.

Определив средний размер канавки по микрошлифу из табл. 2, была смоделирована макроструктура поверхности текстур 0° – 0° и 0° – 90° (рис. 7, а, б) в CAD-системе. При данном моделировании микрорельеф поверхности не учитывался по причине его хаотичности. Модель текстуры 0° – 0° показала, что площадь поверхности увеличивается на 94 % относительно необработанной поверхности. А для текстуры 0° – 90° всего на 16 %. Малым увеличением площади поверхности текстуры 0° – 90° можно объяснить причину невысокого значения прочности клеевого соединения относительно других текстур.

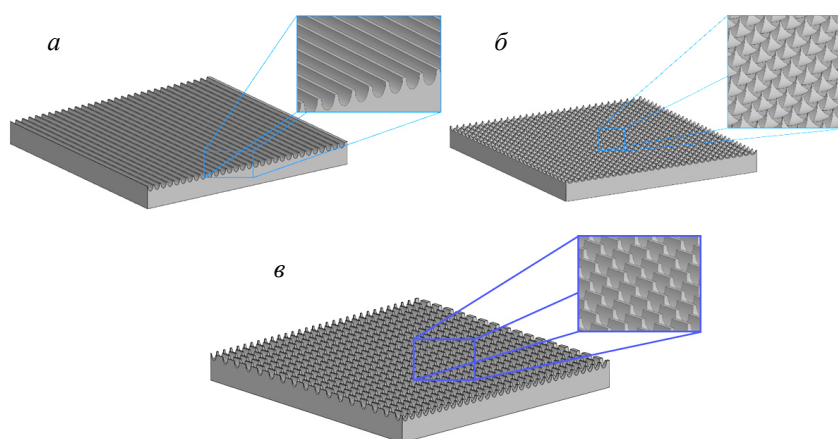


Рис. 7. Модели макроструктуры поверхности с лазерной обработкой:
а – текстура 0° – 0° ; б – текстура 0° – 90° ; в – модернизированная текстура 0° – 90°

Fig. 7. Models of surface macrostructure with laser processing:
а – texture 0° – 0° ; б – texture 0° – 90° ; в – modernized texture 0° – 90°

Чтобы улучшить прочностные характеристики клеевого соединения структуры 0° – 90° , можно предложить углубить микроканавку, которая сформирована поперек направления сдвиговой нагрузки, увеличивая количество проходов лазерного луча по траектории. Шаг для перпендикулярной обработки предлагается увеличить в два раза, тем самым сохранить часть гребня, который способствует увеличению прочности при сдвиге (рис. 7, в). Площадь поверхности у модернизированной текстуры 0° – 90° увеличилась на 72 % относительно необработанной поверхности. Эта модернизированная текстура 0° – 90° потребует более высокой удельной поверхностной энергии, чем у текстур в этом исследовании.

Заключение

Лазерная обработка поверхности титановых сплавов увеличивает прочность клеевого соединения более чем на 70 % относительно необработанной поверхности. При лазерной обработке стоит уделять большое внимание выбору текстуры поверхности, потому что определенные текстуры могут дать прирост прочности на 20–30 %. Если тип нагрузки в элементах ферменных конструкций известен, то лучше использовать линейные текстуры, направленные перпендикулярно направлению нагрузки (для сдвига – текстура 0° – 0° , для кручения – текстура 90° – 90°). При смешанных нагрузках лучше использовать сетчатые структуры $\pm 30^{\circ}$, $\pm 45^{\circ}$, $\pm 60^{\circ}$, которые сопротивляются нагрузкам в двух направлениях.

Библиографические ссылки

1. Structural design and compression-bending test of ultra-lightweight carbon-fiber-reinforced polymer truss structures / S. Li, W. Chen, J. Hu et al. // *Composite Structures*. 2023. Vol. 313. P. 116909. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116909.
2. Scalable self-attaching/assembling robotic cluster (S2A2RC) system enabled by triboelectric sensors for in-orbit spacecraft application / X. Hou, M. Zhu, L. Sun et al. // *Nano Energy*. 2022. Vol. 93. P. 106894. doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106894.
3. Composite anisogrid lattice toroidal shell: Application to a load-carrying rim of the spacecraft reflectarray antenna / E. V. Morozov, A. V. Lopatin, A. V. Shatov et al. // *Composite Structures*. 2024. Vol. 331. P. 117860. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117860.
4. Леоненков А. Д., Оберемок Ю. А. Обоснование применения аддитивных технологий при создании главного зеркала космического телескопа «Миллиметр» // *Решетневские чтения*. 2017. Т. 1. С. 140–141.
5. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review / J. Min, H. Wan, B. E. Carlson et al. // *Optics and Laser Technology*. 2020. Vol. 128. P. 106188. Doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106188.
6. Baburaj E. G., Starikov D., Evans J., Shafeev G. A., Bensaoula A. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007. Vol. 27. P. 268–276.
7. Сибилева С. В., Каримова С. А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // *Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск*. 2013. № 2. С. 25–35.
8. Molitor P., Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2002. Vol. 22. P. 101–107.
9. Smith T. A. Surface treatment for Ti–6Al–4V // *J. Adhes.* 1983. Vol. 15, no. 2. P. 137–150.
10. Удод Л. С., Наговицин В. Н. Подготовка поверхности деталей из титановых сплавов под склеивание с деталями из полимерных композиционных материалов // *Космические аппараты и технологии*. 2022. Т. 6, № 4. С. 263–271. Doi: 10.26732/j.st.2022.4.05.
11. Laser-processed functional surface structures for multi-functional applications-a review / H. Wang, D. Deng, Z. Zhai, Y. Yao. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 116. P. 247–283. doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.062.
12. Yue T. M., Yan L. J., Chan C. P. Stress corrosion cracking behavior of Nd: YAG lasertreated aluminum alloy 7075 // *Materials Science and Technology*. 2005. Vol. 21, No 8. P. 961–966. Doi: 10.1179/174328405X47573.
13. Rechner R., Jansen I., Beyer E. Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2010. Vol. 30 (7). P. 595–601. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.009.
14. Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений / А. В. Гирн, М. С. Руденко, В. Б. Тайгин и др. // *Космические аппараты и технологии*. 2022. Т. 6, № 2. С. 90–99. Doi: 10.26732/j.st.2022.2.03.
15. Effect of laser spot overlap ratio on surface characteristics and adhesive bonding strength of an Al alloy processed by nanosecond pulsed laser / H. Wan, J. Min, J. Lin et al. // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 62. P. 555–565. doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.055.
16. Руденко М. С. Ковалева Т. Д., Гирн А. В. Влияние режимов лазерной обработки на параметры микрорельефа титанового сплава // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых) : материалы Междунар. молодёж. науч. конф. 9–10 ноября 2023 г. КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева. Казань, 2023. С. 409–412.

References

1. 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, Vol. 313, P. 116909. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116909.

2. Hou X., Zhu M., Sun L. et al. Scalable self-attaching/assembling robotic cluster (S2A2RC) system enabled by triboelectric sensors for in-orbit spacecraft application. *Nano Energy*. 2022, Vol. 93, P. 106894. doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106894.
3. Morozov E. V., Lopatin A. V., Shatov A. V. et al. Composite anisogrid lattice toroidal shell: Application to a load-carrying rim of the spacecraft reflectarray antenna. *Composite Structures*. 2024, Vol. 331, P. 117860. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117860.
4. Leonenkov A. D., Oberemok Yu. A. [Justification of the use of additive technologies in the creation of the main mirror of the Millimetron space telescope]. *Reshetnevskie chteniya*. 2017, Vol. 1, P. 140–141 (In Russ.).
5. Min J., Wan H., Carlson B. E., Lin J., Sun C. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020, Vol. 128, P. 106188. Doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106188.
6. Baburaj E. G., Starikov D., Evans J., Shafeev G. A., Bensaoula A. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, Vol. 27, P. 268–276.
7. Sibileva S. V., Karimova S. A. [Surface treatment of titanium alloys to ensure adhesive properties (review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii. Spetsvypusk*. 2013, No. 2, P. 25–35 (In Russ.).
8. Molitor P., Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2002, Vol. 22, P. 101–107.
9. Smith T. A. Surface treatment for Ti–6Al–4V. *J. Adhes.* 1983, Vol. 15, No. 2, P. 137–150.
10. Udod L. S., Nagovitsin V. N. [Preparation of the surface of parts made of titanium alloys for gluing with parts made of polymer composite materials]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2022, Vol. 6, No. 4, P. 263–271 (In Russ.). Doi: 10.26732/j.st.2022.4.05.
11. Wang H., Deng D., Zhai Z., Yao Y. Laser-processed functional surface structures for multifunctional applications-a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, Vol. 116, P. 247–283. doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.062.
12. Yue T. M., Yan L. J., Chan C. P. Stress corrosion cracking behavior of Nd: YAG lasertreated aluminum alloy 7075. *Materials Science and Technology*. 2005, Vol. 21, No. 8, P. 961–966. Doi: 10.1179/174328405X47573.
13. Rechner R., Jansen I., Beyer E. Influence on the strength and aging resistance of aluminium joints by laser pre-treatment and surface modification. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2010, Vol. 30, No. 7, P. 595–601. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.009.
14. Girn A. V., Rudenko M. S., Taygin V. B., Mikheev A. E., Ravodina D. V. [Effect of laser surface treatment of titanium samples on the adhesive strength of adhesive joints]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2022, Vol. 6, No. 2, P. 90–99 (In Russ.). Doi: 10.26732/j.st.2022.2.03.
15. 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, Vol. 62, P. 555–565. doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.055.
16. Rudenko M. S., Kovaleva T. D., Girn A. V. [Influence of laser processing modes on the parameters of the microrelief of a titanium alloy]. *XXVI Tupolevskie chteniya (shkola molodykh uchenykh): Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya* [XXVI Tupolev Readings (School of Young Scientists): Proc. Int. youth. scientific. conf]. Kazan', 2023, P. 409–412 (In Russ.).

© Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е., Орешкин Д. И., 2024

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Орешкин Дмитрий Игоревич – студент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mr.oreshkin01@yandex.ru.

Rudenko Mikhail Sergeevich – Senior Lecturer of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru.

Girn Alexey Vasilievich – Cand. Sc., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.

Mikheev Anatoly Egorovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Oreshkin Dmitry Igorevich – Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mr.oreshkin01@yandex.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Файлы со статьями принимаются по электронной почте vestnik@sibsau.ru.

Электронная копия. Статья набирается в программе Microsoft Office Word 2003 (**расширение имени файла DOC!**)

Объем статьи: 5–20 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 4–5 страниц, обзорная статья – до 20 страниц.

Параметры страницы. Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт Times New Roman 11. Подзаголовки: шрифт Times New Roman 11 bold.

Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

Статья должна содержать предмет, тему, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Страницы не нумеруются.

СТРУКТУРА СТАТЬИ:

1. Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

2. Название статьи: не более 15 слов. Аббревиатуры и сокращения в названии не допускаются.

3. Авторы. Инициалы и фамилия. Количество авторов одной статьи не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

4. Аффiliation автора при публикации: название и адрес организации, а также электронная почта автора-корреспондента. Если авторов несколько, у каждой фамилии и соответствующей организации проставляется цифровой верхний индекс. Если все авторы статьи работают в одной организации, она указывается один раз.

5. Аннотация: минимум 230–250 слов (следует ориентироваться на объем англоязычной аннотации). Структура аннотации: цель исследования, методы, результаты, заключение. Курсивом.

6. Ключевые слова: не более 5–7 слов или словосочетаний. Курсивом.

7. Название статьи на английском языке.

8. Авторы на английском языке.

9. Аффiliation автора на английском языке.

10. Аннотация на английском языке.

11. Ключевые слова (Keywords) на английском языке.

12. Основной текст строится по следующей схеме и содержит обязательные подзаголовки:

– Введение.

– Тематические подзаголовки по основной части текста.

– Заключение.

13. Благодарности (если есть указание на источники финансирования, гранты).

14. Acknowledgements (Благодарности дублируются на английском языке).

15. Библиографические ссылки. Библиографические ссылки должны содержать не менее 15 источников! Библиографические ссылки оформляются на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5–2008. Ссылки на источники расставляются по тексту в квадратных скобках в порядке нумерации по мере цитирования.

16. References. Библиографические ссылки в романском алфавите оформляются по требованиям, представленным на сайте. Используется система транслитерации BGN (translit.net)

17. Сведения об авторах на русском и английском языках. В сведениях указывается Ф.И.О. автора, ученая степень, ученое звание, должность, название организации. Например:

Иванов Иван Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Ivanov Ivan Ivanovich – Dr. Sc, Professor, Head of the Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sen@sibsau.ru.