

УДК 620.1:669.295

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-188-194

Для цитирования: Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е., Тайгин В. Б. Лазерная обработка титановых сплавов для увеличения прочности клеевого соединения с углепластиком // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 188–194. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-188-194.

For citation: Rudenko M. S., Girn A. V., Mikheev A. E., Taigin V. B. [Laser processing of titanium alloys to increase the strength of adhesive joint with cfrp]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 188–194. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-188-194.

Лазерная обработка титановых сплавов для увеличения прочности клеевого соединения с углепластиком

М. С. Руденко^{1*}, А. В. Гирн¹, А. Е. Михеев¹, В. Б. Тайгин²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

Титановые сплавы являются трудносклеиваемыми материалами, по причине того, что на их поверхности всегда присутствует тонкая оксидная пленка, препятствующая образованию межатомных и межмолекулярных связей между клеем и подложкой. В силовых конструкциях космических аппаратов (КА) часто используют клеевое соединение титанового сплава с композиционным материалом. Но прочность таких узлов относительно мала по сравнению с механическим соединением. Цель данной работы заключается в увеличении прочности клеевого соединения за счет лазерной обработки рабочей поверхности титанового сплава под склейку. Текстурирование поверхности титанового сплава ОТ-4 проводилось на иттербиевом импульсном волоконном лазере на 4 режимах обработки. Обработанная поверхность склеивалась с углепластиком КМУ-4 по площади 300 мм² трехкомпонентным клеем ВК-9. Испытание на прочность клеевого соединения проводилось на разрывной машине Eurotest T-50 и показало, что прочность образцов с лазерной обработкой увеличилась более чем на 80 % относительно среднего значения механического шлифования. Наибольшее значение прочности на сдвиг показали образцы с лазерной обработкой № 1 и 3. Это связано с увеличением площади склеивания поверхности, а также механическим запираемостью клея в микрорельефе структуры. Увеличение прочности на сдвиг, вызванное лазерной обработкой поверхности, представляет собой смешанный эффект увеличения площади поверхности, механического запираемостью клея и изменения химического состава поверхности. Химический состав структуры поверхности под воздействием лазерного сканирования постепенно трансформируется из Ti и Ti₂O₃ в кристаллический TiO₂. Характер разрушения клеевого соединения у образцов с лазерной обработкой преимущественно когезионный, но также наблюдались образцы с разрушением материала углепластика, т. е. сдвиговые напряжения в композиционном материале превосходили адгезионную прочность. Влияние предварительной обработки композиционного материала на прочность клеевого соединения в этой работе не рассматривалось.

Ключевые слова: лазерная обработка, прочность клеевого соединения, титановый сплав, углепластик.

Laser processing of titanium alloys to increase the strength of adhesive joint with cfrp

M. S. Rudenko^{1*}, A. V. Girn¹, A. E. Mikheev¹, V. B. Taigin²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabockii prospect, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
²JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

Titanium alloys are hard-to-bond materials due to the fact that a thin oxide film is always present on their surface, which prevents the formation of interatomic and intermolecular bonds between the adhesive and the substrate. In the load-bearing structures of spacecraft (SC), an adhesive bond between a titanium alloy and a composite material is often used. But the strength of such knots is relatively small compared to the mechanical connection. The purpose of this work is to increase the strength of the adhesive joint, due to laser processing of the working surface of the titanium alloy for gluing. Texturing of the surface of the titanium alloy OT-4 was carried out on an ytterbium pulsed fiber laser in 4 processing modes. The treated surface was glued with KMU-4 carbon fiber over an area of 300 mm² using a VK-9 three-component adhesive. The adhesive strength test was carried out on a Eurotest T-50 tensile tester. The test showed that the strength of the laser-treated samples increased by more than 80% relative to the average value of mechanical grinding. The highest value of shear strength was shown by samples with laser processing No. 1 and No. 3. This is due to the greatest increase in the area of bonding of the surface, as well as the mechanical locking of the adhesive in the microrelief of the structure. The increase in shear strength caused by laser surface treatment is a mixed effect of increasing surface area, mechanically locking the adhesive, and changing the surface chemistry. The chemical composition of the surface structure under the influence of laser scanning is gradually transformed from Ti and Ti₂O₃ to crystalline TiO₂. The nature of the destruction of the adhesive joint in the samples with laser processing is predominantly cohesive, but samples with the destruction of the carbon fiber material were also observed, that is, the shear stress in the composite material exceeded the adhesive strength. The effect of pretreatment of the composite material on the strength of the adhesive joint was not considered in this work.

Keywords: laser processing, adhesive strength, titanium alloy, carbon fiber.

Введение

Титановые сплавы широко используют в качестве элементов крепления, шарниров, силовых элементов в космическом аппарате (КА). В частности, титановые сплавы используются для создания неразъёмных клеевых соединений углепластиковых конструкций. Поскольку традиционные методы соединения (сварка, пайка), применяемые для металлических деталей, не могут быть использованы для деталей из композиционных материалов (КМ) или усложняют конструкцию (резьбовые, клепанные соединения и др.) [1–3], КМ приклеивают к металлическим элементам, через которые обеспечивается соединение. На рис. 1 представлен фитинг замка зачекочки КА, который представляет собой клеевую пару «титан – углепластик».

Несмотря на видимые преимущества клевого соединения, прочность таких узлов довольно низкая. Это связано с тем, что титановые сплавы относятся к трудносклеиваемым материалам, так как на поверхности сплава всегда находится тонкая оксидная пленка, которая препятствует образованию межатомных и межмолекулярных связей между клеем и подложкой. Увеличить адгезионную прочность титановых сплавов можно с помощью предварительной обработки перед склеиванием. Методы обработки титана для увеличения адгезионной прочности при склеивании рассмотрены в работах [4; 5]. Лазерная обработка является перспективным методом увеличения адгезионной прочности титанового сплава [6]. Данный метод обладает высокой производительностью и стабильностью свойств обработанной поверхности, а также, в отличие от химических

методов обработки поверхности, экологической чистотой процесса. В работах [7–11] рассмотрены механизмы лазерной обработки на металлах (Al, Ti) лазерами различных типов.

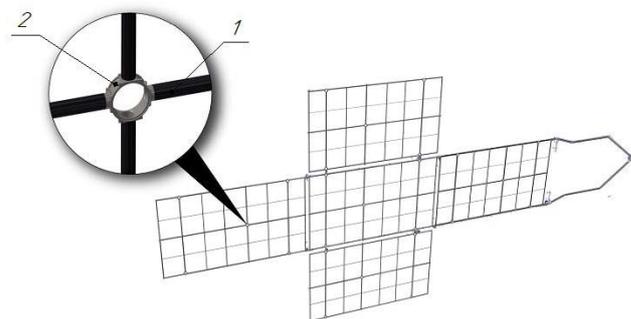


Рис. 1. Механическое устройство батареи солнечной:
1 – силовой трубчатый элемент (углепластик); 2 – фитинг (титановый сплав)

Fig. 1. Mechanical device of solar battery:
1 – power tubular element (carbon fiber); 2 – fitting (titanium alloy)

Ранее были проведены исследования [12; 13], где определялось влияние метода обработки поверхности титанового сплава на прочность клеевого соединения пары «титан – титан». Было выявлено, что лазерная абляция поверхности положительно влияет на адгезионную прочность поверхности титанового сплава.

Эксперимент

В данном исследовании использовались образцы титанового сплава ОТ-4 размерами 70×20×2 мм и образцы двунаправленного углепластика КМУ-4 размерами 70×20×2 мм. Образцы склеивались трехкомпонентным клеем ВК-9 (ОСТ 1-90281–86) внахлест. Склеивание проводилось согласно ОСТ 92-0949-74. Площадь клеевого соединения $S = 300 \text{ мм}^2$. Для обеспечения статистической надежности испытывалась партия из 5 образцов. Геометрические размеры образца для испытаний представлены на рис. 2.

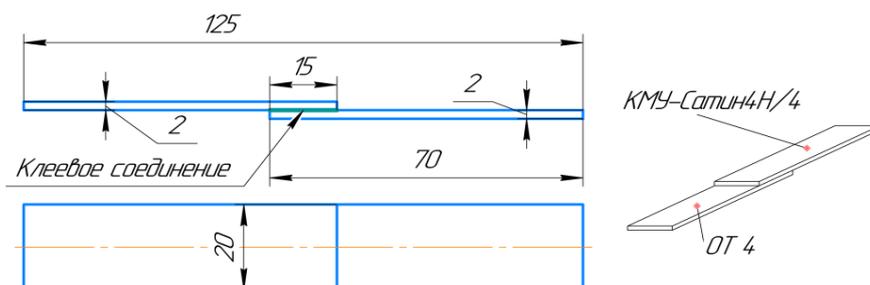


Рис. 2. Геометрические размеры образца клеевого соединения титана с углепластиком

Fig. 2. Geometrical dimensions of the sample of adhesive joint of titanium with carbon fiber

Для определения прочности клеевого соединения пары «титан – углепластик» проводились испытания на сдвиг (англ. Single-Lap Shear Test). Механическое испытание проводилось через 24 ч после склеивания на универсальной разрывной машине (Eurotest T-50, S.A.E.IBERTEST, Испания) со скоростью 5 мм/мин.

Лазерная обработка поверхности проводилась на иттербиевом импульсном волоконном лазере (IPG, YLPM-1 – 4×200-20-20). В предыдущем исследовании [13] выявлены характерные текстуры поверхности, которые были взяты за основу в этой работе. Режимы лазерной обработки представлены в табл. 1. Длина волны лазера 1,064 мкм, частота следования импульсов 40

кГц, энергия в импульсе 0,5 мДж. Схема перемещения лазерного луча является двунаправленной штриховкой по одной оси. Микроструктура поверхности титанового сплава в зависимости от режима обработки представлена на рис. 3.

Таблица 1

Параметры лазерной обработки поверхности титанового сплава

№ режима	1	3	12	13
Мощность лазера, Вт	10	20	20	10
Скорость обработки, мм/с	200	200	200	400
Количества полос на 1 мм	15	15	25	25

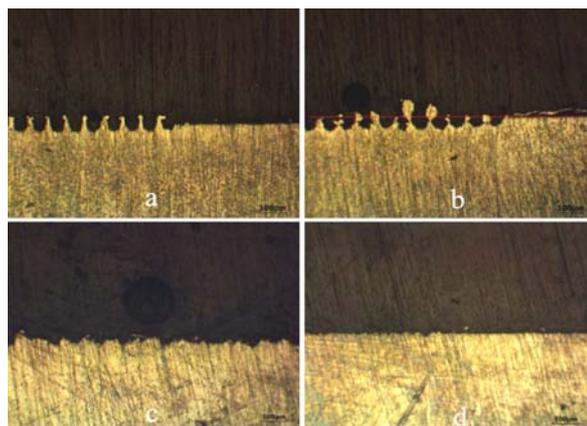


Рис. 3. Микроструктура поверхности титана при лазерной обработке:
a – режим № 1; *b* – режим № 3; *c* – режим № 12; *d* – режим № 13

Fig. 3. The microstructure of the titanium surface during laser processing:
a – mode № 1; *b* – mode № 3; *c* – mode № 12; *d* – mode № 13

Для сравнения, были изготовлены и испытаны на сдвиг образцы с механическими методами обработки поверхности титанового сплава: ручное шлифование поверхности в двух направлениях и с пескоструйной обработкой. Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай). Результаты шероховатости поверхности представлены в табл. 2. Среднее значение шероховатости углепластика составляет 0,85 мкм.

На рис. 4 представлены результаты средних значений прочности на сдвиг клеевых соединений.

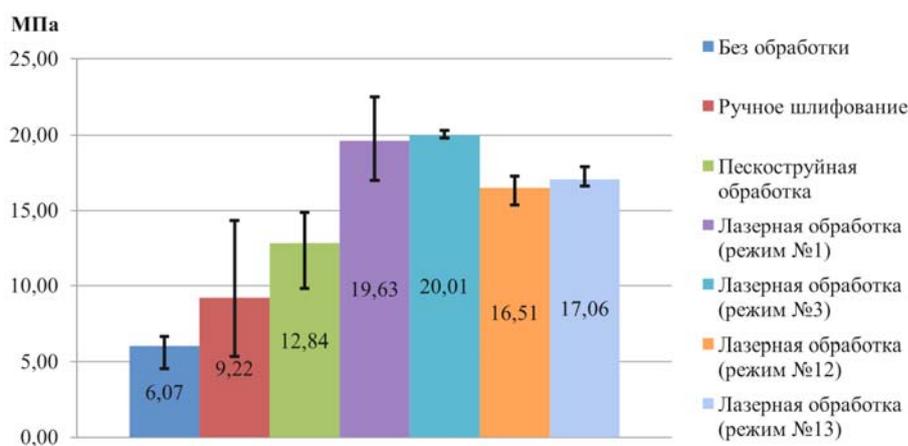


Рис. 4. Результаты испытаний прочности образцов на сдвиг

Fig. 4. Results of testing the strength of specimens for shear

**Значение шероховатости поверхности титанового сплава
с разными методами обработки перед склеиванием**

Метод обработки	Ti без обработки	Ручное шлифование	Пескоструйная обработка	Лазерная обработка, режим № 1	Лазерная обработка, режим № 3	Лазерная обработка, режим № 12	Лазерная обработка, режим № 13
Ra, мкм	0,78	1,23	1,15	6,5	9,65	5,37	1,76

Результаты и обсуждения

По рис. 2 видно, что лазерная обработка поверхности титанового сплава благоприятно влияет на прочность клеевого соединения пары «титан – углепластик». Если сравнивать результаты, то лазерная обработка увеличила прочность более чем на 160 % по сравнению с необработанной поверхностью. Так как на производстве перед склеиванием металла и композиционного материала металл механически обрабатывается для увеличения площади сцепления, будет правильней сравнивать прочность образцов с лазерной обработкой со значением образцов с ручным шлифованием. Следовательно, прочность образцов с лазерной обработкой увеличилась более чем на 80 % относительно среднего значения механического шлифования.

Наибольшее значение прочности на сдвиг показали образцы с лазерной обработкой № 1 и 3. Это связано с наибольшим увеличением площади склеивания поверхности, а также механического запираания клея в микрорельефе структуры. Режим № 13, имея незначительное увеличение площади поверхности, что видно из шероховатости поверхности, показал значительный прирост прочности клеевого соединения. Это значит, что улучшение прочности на сдвиг, вызванное лазерной обработкой поверхности, представляет собой смешанный эффект увеличения площади поверхности, механического запираания клея и изменения химического состава поверхности. Химический состав структуры поверхности под воздействием лазерного сканирования постепенно трансформируется из Ti и Ti₂O₃ в кристаллический TiO₂. Лазерная обработка способствует превращению металлических элементов и оксидов с низкой валентностью в оксид с высокой валентностью [14; 15], что способствует связи клея и поверхности.

Характер разрушения клеевого соединения у образцов с лазерной обработкой преимущественно когезионный, но также наблюдались образцы с разрушением материала углепластика, т. е. сдвиговые напряжения в композиционном материале превосходили адгезионную прочность. Характер разрушения у образцов без обработки, с ручной шлифовкой и пескоструйной обработкой показал адгезионное и смешанное разрушение. Стоит отметить, что испытания образцов с ручной шлифовкой показали сильный разброс значений, что указывает на малую надежность данного метода склеивания.

Если сравнивать результаты предыдущего исследования [5] с представленными, то можно наблюдать уменьшение прочности клеевого соединения у одинаковых режимов лазерной обработки на 25 %, что связано с влиянием подготовки углепластика перед склеиванием.

Заключение

Исследование показало, что лазерная обработка поверхности титанового сплава перед склеиванием с углепластиком увеличивает клеевую прочность более чем на 80 %, по сравнению с современной технологией склеивания (механическая обработка). Наибольший показатель прочности показали образцы с режимами обработки, которые обеспечивают наибольшую площадь склеивания (режим № 1 и 3).

Библиографические ссылки

1. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints / G. Yang, T. Yang, W. Yuan, Y. Du // Composites Part B. 2019. Vol. 160. P. 446–456.
2. Molitor T. Young. Investigations into the use of excimer laser irradiation as a titanium alloy surface treatment in a metal to composite adhesive bond // International Journal of Adhesion & Adhesives. 2004. Vol. 24. P. 127–134.

3. Способ подготовки поверхности металлических фитингов к склеиванию с трубами из композиционных материалов / В. Е. Ануфриенко, М. В. Волков, И. О. Надеин, А. А. Филипов // Решетневские чтения: материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2022. Ч. 1. С. 6–8.
4. Сибилева С. В., Каримова С. А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 25–35.
5. Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites / L. Palmieri Frank, A. Belcher Marcus, J. Christopher et al. // International Journal of Adhesion & Adhesives. 2016. Vol. 68. P. 95–101.
6. Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification / E. G. Baburaj, D. Starikov, J. Evans et al. // Int. J. Adhes. Adhes. 2007. Vol. 27. P. 268–276.
7. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review / Junying Mina, Hailang Wana, Blair E. Carlson et al. // Optics and Laser Technology. 2020. Vol. 128. P. 106188.
8. Nanosecond laser ablation for improving the strength of CFRTP and aluminum alloy adhesively bonded joints / Ziwei Feng, Hongyun Zhao, Caiwang Tan et al. // Composite Structures. 2021. Vol. 274. P. 114369.
9. Moroni F., Musiari F., Favi C. Influence of the laser ablation surface pre-treatment over the ageing resistance of metallic adhesively bonded joints // International Journal of Adhesion & Adhesives. 2021. Vol. 105, P. 102764.
10. 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.
11. Controllable hydrophilic titanium surface with micro-protrusion or micro-groove processed by femtosecond laser direct writing / W. He, P. Yao, D. Chu et al. // Optics and Laser Technology. 2022. Vol. 152. P. 108282. Doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108082.
12. Способы повышения адгезии клевого соединения титанового сплава / М. С. Руденко, С. В. Марченко, Д. В. Раводина и др. // Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск. 2021. Ч. 1. С. 52–54.
13. 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
14. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy / Y. Wang, M. Zhang, K. Li et al. // Optics and Laser Technology. 2021. Vol. 139. P. 106987.
15. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser // Y. Wang, J. Zhang, K. Li, J. Hu // Journal of Materials Science & Technology. 2021. Vol. 94. P. 136–146.

References

1. Yang G., Yang T., Yuan W., Du Y. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints. *Composites Part B*. 2019, Vol. 160, P. 446–456.
2. Molitor T. Young. Investigations into the use of excimer laser irradiation as a titanium alloy surface treatment in a metal to composite adhesive bond. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2004, Vol. 24, P. 127–134.
3. Anufrienko V. E., Volkov M. V., Nadein I. O., Filipov A. A. [A method of preparing the surface of metal fittings for gluing with pipes made of composite materials]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev readings: materials of the XXVI Intern. scientific-practical. conf.]. Krasnoyarsk, 2022, No. 1, P. 6–8 (In Russ.).
4. Sibileva S. V., Karimova S. A. [Surface treatment of titanium alloys to ensure adhesion properties (review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2013, No. S2, P. 25–35 (In Russ.).
5. Frank L. Palmieri, Marcus A. Belcher, Christopher J. et al. Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2016, Vol. 68, P. 95–101.
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. Junying Mina, Hailang Wana, Blair E. Carlson et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020, Vol. 128, P. 106188.
8. Ziwei Feng, Hongyun Zhao, Caiwang Tan et al. Nanosecond laser ablation for improving the strength of CFRTP and aluminum alloy adhesively bonded joints. *Composite Structures*. 2021, Vol. 274, P. 114369.
9. Moroni F., Musiari F., Favi C. Influence of the laser ablation surface pre-treatment over the ageing resistance of metallic adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2021, Vol. 105, P. 102764.
10. Hailang Wan, Junying Min, Jianping Lin 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.
11. Wanying He, Peng Yao, Dongkai Chu et al. Controllable hydrophilic titanium surface with micro-protrusion or micro-groove processed by femtosecond laser direct writing. *Optics and Laser Technology*. 2022, Vol. 152, P. 108282.
12. Rudenko M. S., Marchenko S. V., Ravodina D. V., Girn A. V., Mikheev A. E. [Methods for increasing the adhesion of a titanium alloy adhesive joint]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Reshetnev Readings: Materials of the XXV Intern. scientific-practical. conf.]. Krasnoyarsk, 2021, No. 1, P. 52–54 (In Russ.).
13. 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. Doi: 10.26732/j.st.2022.2.03 (In Russ.).
14. Yifei Wang, Meiju Zhang, Kangmei Li et al. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy. *Optics and Laser Technology*. 2021, Vol. 139, P. 106987.
15. Yifei Wang, Jing Zhang, Kangmei Li, Jun Hu. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021, Vol. 94, P. 136–146.

© Руденко М. С., Гирн А. В., Михеев А. Е., Тайгин В. Б., 2023

Руденко Михаил Сергеевич – старший преподаватель кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rudenko_ms@sibsau.ru.

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, заведующий кафедрой летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Тайгин Виталий Борисович – начальник сектора отдела разработки антенных систем и сборки полезных нагрузок космических аппаратов; АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: taygin@iss-reshetnev.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, Head of the Department of Aircraft; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Taygin Vitaly Borisovich – head of the sector of the department for the development of antenna systems and the assembly of payloads of spacecraft; JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”. E-mail: taygin@iss-reshetnev.ru.
