

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. В. Гирн<sup>1</sup>, М. С. Руденко<sup>1</sup> ✉, В. Б. Тайгин<sup>2</sup>,  
А. Е. Михеев<sup>1</sup>, Д. В. Раводина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва,  
г. Красноярск, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,  
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В статье рассматривается прочность клеевых соединений образцов из титановых сплавов ОТ-4, поверхность которых обработана лазерным излучением. В работе представлены результаты анализа зависимости макро- и микрогеометрии полученной поверхности, химического состава, краевого угла смачивания и адгезионной прочности клеевых соединений при сдвиге от режимов лазерной обработки. Целью данной работы является определение оптимальных параметров лазерной обработки для получения высокой прочности клеевых соединений. Полученные результаты можно использовать при склеивании конструктивных элементов космических аппаратов. Исследования проводились на клеевой паре «Титан – Титан». В зависимости от режима обработки были выявлены характерные текстуры поверхности, которые были объединены в группы «В», «К» и «С». Высокоэнергетические режимы лазерной обработки поверхности образцов перед склеиванием приводят к значительному повышению прочностных характеристик клеевого соединения (до 70 %) благодаря увеличению площади склеивающей поверхности и механическому запираанию клея в микрорельефе текстуры образцов. Кроме того, применение данного способа, по сравнению с механическими и химическими методами, значительно повышает производительность обработки поверхности.

**Ключевые слова:** клеевое соединение, титановый сплав, прочность при сдвиге, лазерная обработка.

### Введение

Титановые сплавы широко используются в ракетно-космической технике в связи с их высокими удельными характеристиками по прочности и жесткости, а также в связи с их высокой химической стойкостью, низким коэффициентом термического расширения и удовлетворительными температурами эксплуатации. В космических аппаратах титановые сплавы широко используются в качестве соединительных элементов углепластиковых конструкций. При этом титановая деталь (законцовка или закладной элемент) клеивается в углепластиковый элемент космического аппарата. Так обеспечиваются разъемные и неразъемные шарнирные соединения каркасов солнечных батарей, штанг и силовых элементов. Пример фланцевой законцовки приведен на рис. 1.

✉ mister.m.rudenko@gmail.com

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2022

Несмотря на то, что клеевые соединения позволяют снизить массу конструкции и сократить затраты на производство, прочность соединения таких узлов довольно низкая. Это обусловлено тем, что титановые сплавы относятся к трудно-склеиваемым материалам по причине того, что на их поверхности всегда присутствует тонкая оксидная пленка, препятствующая образованию межатомных и межмолекулярных связей между клеем и подложкой. В настоящее время на предприятиях, изготавливающих космические аппараты, отсутствует надежный способ подготовки поверхности перед склеиванием титановых сплавов. На используемый метод подготовки поверхности согласно ОСТ 92-0949-74 (зашкуривание) большое влияние оказывает человеческий фактор, что отражается на качестве клеевого соединения. Таким образом, важной задачей является выявление способов обработки поверхностей перед склеиванием, которые будут обеспечивать удаление окислов и загрязнений с поверхности, а так-

же придание макро- и микрогеометрии и хорошей смачиваемости.

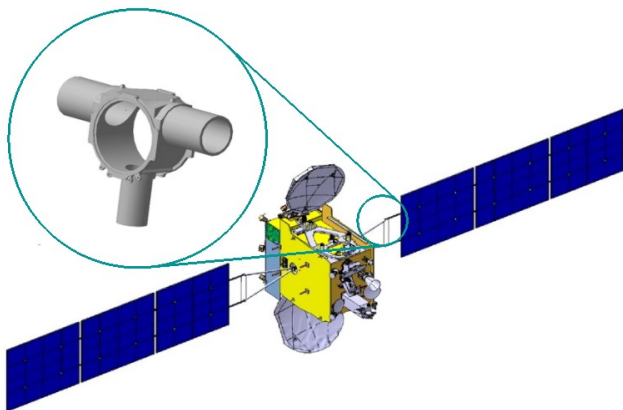


Рис. 1. Пример детали из титанового сплава для соединения трубчатых элементов КА

Анализ литературы показывает, что для увеличения прочности клеевых соединений титановых сплавов используются различные способы подготовки поверхности перед склеиванием. Обычно выделяют следующие способы обработки: механические, химические, электрохимические, обработка концентрированными источниками энергии, нанесение покрытий и др. [1].

*Механические способы обработки*, такие как пескоструйная, дробеструйная, обработка шлифованием, обработка щетками с проволочной щетиной и наждачной бумагой [2–5], несмотря на доступность и низкую стоимость, позволяют лишь создать шероховатость поверхности и удалить часть оксидного слоя и загрязнения. Однако удаленный оксидный слой образуется вновь сразу после обработки, поэтому прочность клеевых соединений с такой подготовкой остается низкой. Несмотря на это, такая обработка может быть использована перед другими обработками, которые позволяют модифицировать поверхностный оксидный слой, например, химической или электрохимической [1].

*Химические способы обработки* (травление) изменяют поверхность благодаря химическим реакциям. Существует огромное количество работ, посвященных этому вопросу [6–8]. При химической обработке оксид титана стравливается и образуется новая оксидная пленка с измененным составом, структурой или строением, в зависимости от сплава и состава ванн травления. Недостатками процесса является трудоемкость (необходимость большого количества подготовительных операций), кроме того, образовавшиеся структуры оксида титана обычно нестабильны при повышенных температурах, что приводит к развитию напряжений на границе раздела «клей – оксидный слой» и снижению прочности клеевого соединения [9]. Кроме того, при травлении в кислотах проблемой является

внедрение водорода в подложку в процессе обработки, что приводит к ее хрупкому разрушению [7].

*Электрохимические способы обработки* включают в себя обезжиривание и деоксидирование перед образованием анодной пленки [1]. При данном виде обработки можно регулировать размер пор поверхностного слоя посредством изменения компонентов электролита и плотности тока. В полученные поры проникает клей, что способствует высокой прочности клеевого соединения. Существуют разнообразные методики анодного оксидирования, применяемые для обработки титановых сплавов [10; 11]. Анализ литературных источников [1] показывает, что анодное оксидирование в растворе хромовой кислоты и в растворе NaOH обеспечивает высокую прочность клеевого соединения и стойкость к повышенным температурам и влажности. Применение данного вида обработки сдерживается сложностью процесса подготовки изделий перед анодированием и использованием в процессе вредных реагентов.

К электрохимическим способам может быть отнесен процесс микродугового оксидирования (МДО), который позволяет отказаться от сложных операций подготовки поверхности перед обработкой и использовать экологически чистые электролиты, а также получать многофункциональные керамикоподобные оксидные покрытия с уникальными свойствами. Такие покрытия могут применяться для создания на деталях прочного тепло- и электроизолирующего слоя, защиты поверхностей от эрозии в высокоскоростных газовых потоках, коррозии в агрессивных средах и износа трением, для повышения коэффициента излучения поверхности и т. п. Процесс МДО представляет собой упрочняющую обработку материалов, совмещающую диффузионные, термические, плазмохимические и электрофизические процессы формирования оксидного слоя [12–15].

*Нанесение покрытий.* Для нанесения покрытий чаще всего используются газотермические способы напыления, которые позволяют получить покрытия с высокой адгезионной прочностью. Наибольшее применение имеет метод плазменного напыления [3] который заключается в быстром нагреве порошка ( $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и др.) до расплавленного состояния и распыления его на подложку с высокой скоростью.

*Обработка концентрированными источниками энергии.* В качестве таких источников могут использоваться плазменная струя, электронный луч, сжатая электрическая дуга или излучение лазера. При данной обработке изменяется шероховатость поверхности и происходит модифицирование поверхностного слоя [5; 16; 17].

Лазерная обработка выглядит предпочтительнее химических и электрохимических способов обработки, поскольку позволяет исключить не-

достатки «мокрых» методов обработки поверхности титана и достичь высокой стойкости клеевых соединений. При определенных условиях лазерная обработка поверхности титана позволяет создать столбчатую структуру с конусоподобными выступами, что способствует повышению прочности клеевого соединения благодаря увеличению площади обрабатываемой поверхности, образованию механического сцепления за счет проникновения клея между микроконусами, изменению химического состава поверхности с увеличением смачиваемости поверхности подложки клеем [18; 21].

P. Molitor и T. Young в своей работе [19] представили экологический способ лазерной обработки титанового сплава для авиационной промышленности. В их работе были исследованы три различных типа смесей эксимерного лазера (KrF, ArF и XeCl). Уровни плотности энергии лазеров варьировались от 0,3 до 5 Дж/см<sup>2</sup>. Они определили, что углы смачиваемости, измеренные после лазерной обработки, значительно меньше, чем на необработанной поверхности, а также было показано, что угол смачиваемости увеличивается при длительном хранении обработанного образца в условиях окружающей среды.

Y. Wang и др. в своей работе [18] рассматривали лазерную обработку титана для медицинских целей в ортопедических имплантатах. Считается, что титановые сплавы с лазерной текстурой обладают более благоприятной биосовместимостью. Используя ультрафиолетовый лазер и формируя им различные текстуры на поверхности, они изучили взаимосвязь между лазерной обработкой, свойствами поверхности и пролиферацией клеток.

Таким образом, анализ научной литературы показал, что использование лазерной обработки поверхности титановых сплавов для склеивания с углепластиковыми деталями является малоизученным направлением. Прочность клеевого соединения зависит от различных параметров: текстуры, шероховатости, угла смачиваемости и др. Ранее были проведены исследования [20], где определялось влияние метода обработки поверхности титанового сплава на прочность клеевого соединения. Целью данной работы является выявление оптимальных параметров лазерной обработки для получения высокой прочности клеевого соединения. Было решено провести предварительное исследование на определение адгезионной прочности на паре «Титан – Титан» чтобы исключить влияние подготовки поверхности углепластика.

## 1. Эксперимент

Экспериментальные исследования включали:

- лазерную обработку образцов из титанового сплава при различных режимах;

- склеивание обработанных при одинаковых режимах образцов друг с другом;
- испытание склеенных образцов на прочность при сдвиге.

Кроме того, для образцов, обработанных при разных технологических режимах, исследовали микроструктуру, стехиометрию (химический состав поверхности), микрогеометрию поверхности, определяли шероховатость и краевой угол смачивания.

## 2. Методика проведения исследований

В данной работе использовались образцы из титанового сплава ОТ-4, который широко применяется в ракетно-космической промышленности. Образцы изготовлены размером 70×20×2 мм.

Образцы обрабатывали иттербиевым импульсным волоконным лазером (IPG, YLPM-1-4×200-20-20) при температуре окружающей среды и в стандартной атмосфере. Переменными параметрами обработки были выбраны: мощность и скорость перемещения лазерного луча, а также количество полос обработки на 1 мм. Обработка поверхности проводилась двунаправленной штриховкой рабочей зоны, т. е. лазерный луч перемещался «змейкой» по поверхности образца. На рис. 2 схематично изображена траектория лазерной обработки. Характеристики лазера и режимы лазерной обработки представлены в табл. 1. Номера связанных комбинаций режимов обработки представлены в табл. 2.

Для образцов, предназначенных для испытания на прочность клеевого соединения, обработке подвергался участок под склеивание размером 15×20 мм<sup>2</sup> (рис. 2), для образцов, предназначенных для исследования свойств, зона обработки составляла 10×10 мм<sup>2</sup> (рис. 3).

Таблица 1

Параметры лазерной обработки

Параметр обработки	Значение
Длина волны лазера, мкм	1,064
Частота следования импульсов, кГц	40
Ширина импульса, нс	200
Энергия в импульсе, мДж	0,5
Количество проходов	2
Мощность лазера, Вт	10/15/20
Скорость обработки, мм/с	200/400/600
Количество полос на 1 мм, мм <sup>-1</sup>	15/25/50

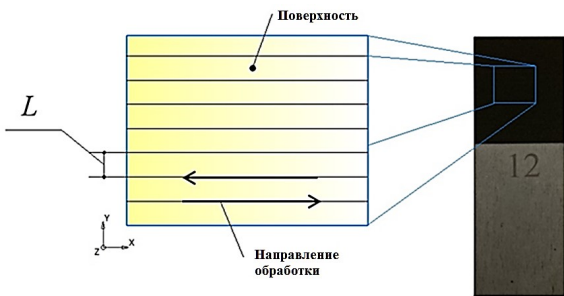


Рис. 2. Схема процесса обработки поверхности лазером

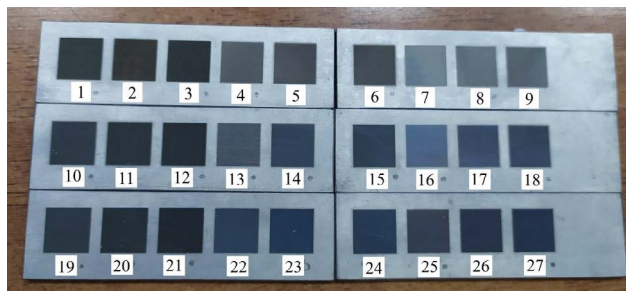


Рис. 3. Образцы лазерной обработки для исследования поверхности

Таблица 2

Номер образца в зависимости от режима обработки

Количество полос на 1 мм	Мощность лазера, Вт								
	10	15	20	10	15	20	10	15	20
15	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	10	11	12	13	14	15	16	17	18
50	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	200			400			600		
	Скорость обработки, мм/с								

Поверхности двух образцов, обработанных лазерным излучением, склеивались между собой клеем ВК-9 (ОСТ 1-90281-86), который представляет собой трехкомпонентную эпоксидную композицию холодного отверждения. Перед склеиванием обработанная лазером поверхность обезжиривалась ацетоном. Склеивание производилось согласно ОСТ 92-0949-74. Площадь клеевого соединения составляла  $S = 300 \text{ мм}^2$ . Геометрические размеры клеевого соединения внахлест схематично изображены на рис. 4а.

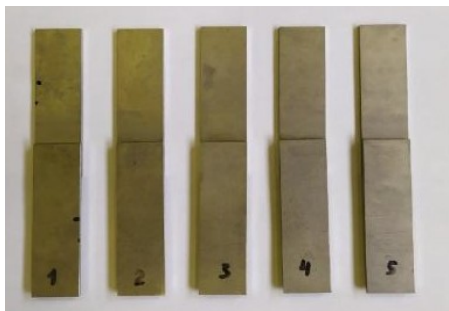
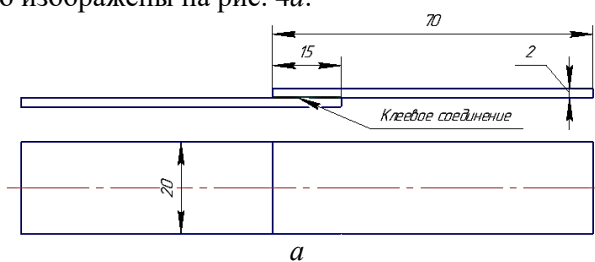


Рис. 4. Образец для испытания на сдвиг  
а – чертеж клеевого соединения; б – внешний вид склеенных образцов

Механическое испытание клеевого соединения проводилось не менее чем через 24 часа после склеивания (ОСТ 92-1477-78) в условиях квазистатического нагружения на универсальной испытательной машине (Eurotest T-50, S.A.E. IBERTEST, Испания). Нагрузка создавалась с постоянной скоростью 5 мм/мин. Для обеспечения статической надежности склеивали серию из 5 образцов для каждого выбранного режима обработки поверхности. Испытание клеевого соединения схематично изображено на рис. 5а.

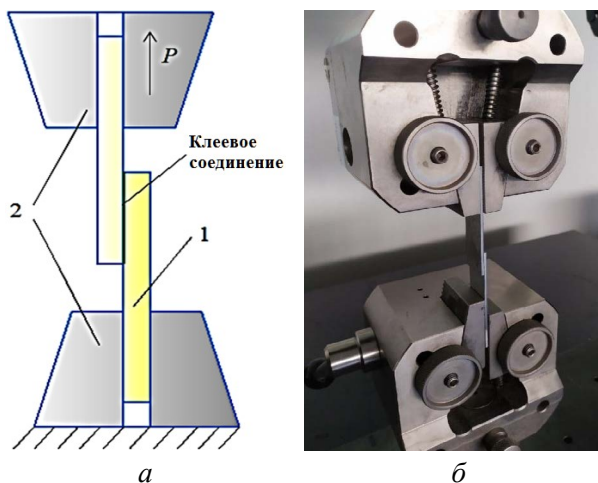


Рис. 5. Испытание клеевого соединения:  
а – схема испытания: 1 – образец; 2 – захваты;  
б – внешний вид образцов в процессе испытания

Для качественного анализа микроструктуры и микрорельефа обработанных лазером поверхностей использовали сканирующий электронный ми-

кроскоп (Tescan Vega 3 XMU, Чехия) и оптический металлографический микроскоп (Neophot-32, Carl Zeiss, Германия). Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай). Краевой угол смачивания измеряли методом лежащей капли.

### 3. Результаты и обсуждение

Предварительный анализ обработанной поверхности проводился на оптическом микроскопе. Были выявлены несколько характерных текстур поверхности среди всех образцов в зависимости от режимов обработки:

1) Текстура «Волна» («В») – наблюдается на образцах с 1 по 9. Особенность текстуры заключается в том, что на поверхности можно выявить траектории лазерного излучения. В зависимости

от удельной энергии лазера форма рельефа может иметь сильные отличия (рис. 6). Глубина «канавки», оставленная лазерным лучом, варьируется от 13 до 116,71 мкм. При обработке поверхности рельеф уходит не только вглубь, но и из-за расплава материала приподнимается над первоначальным уровнем.

В зависимости от режима лазерной обработки можно наблюдать симметричную структуру «канавки». Но на высокоэнергетических режимах обработки наблюдается появление «структур-артефактов» (рис. 6б). За счет подплавления стенки «канавки» образуются наросты, которые в частных случаях могут иметь высоту от 40 до 60 мкм. Данные структуры увеличивают рабочую площадь склеивания. Клей, затекая в данную структуру, будет создавать «замок-якорь», что должно увеличивать прочность клеевого соединения.

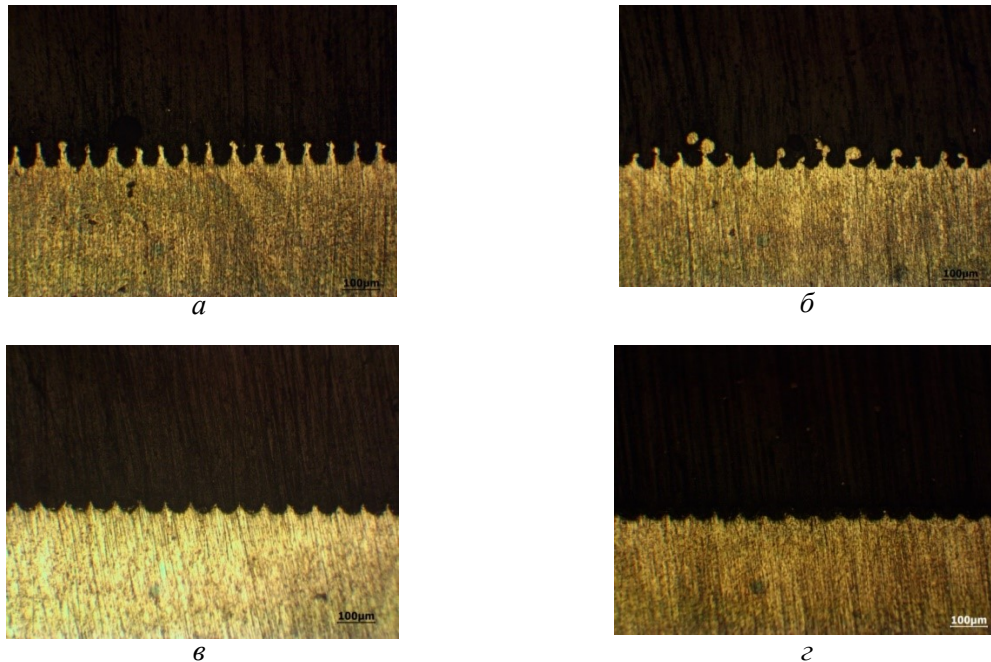


Рис. 6. Фотографии микрошлифов образцов с текстурой «В»: а – 1, б – 3, в – 4, г – 8

2) Текстура («К») – наблюдается у образцов 10–12, 15, 19–21. Особенность текстуры в том, что структура представляет собой грубую неупорядоченную поверхность без трещин (рис. 7). Глубина поверхности – от 20 до 50 мкм. За счет высокой мощности лазера и большого количества полос проходов на 1 мм энергетический пучок от лазерного луча накладывается на поверхность, разрушая симметрию, наблюдаемую у текстуры «В».

3) Текстура «С» – наблюдается у образцов 13–14, 16–18, 22–27. Воздействие энергетического пучка минимально, в большей степени, из-за высокой скорости перемещения лазерного луча. Текстура имеет малую шероховатость. Глубина рельефа – менее 10 мкм (рис. 8).

Было решено для дальнейшего исследования выбрать образцы с лазерной обработкой, которые в большей степени характеризуют текстуру своей поверхности: текстура «В» – 1 и 3 образец; текстура «К» – 12 образец; текстура «С» – 13 образец. Микроструктура шлифа, микрофотография поверхности и химический анализ выбранных образцов представлены в табл. 3.

Часть энергии лазерного излучения поглощается материалом, что способствует его плавлению и морфологическому изменению поверхности и образованию оксидного слоя. Считается, что химический состав поверхности титановых сплавов выполняет ключевую функцию в адгезии поверхности [18].

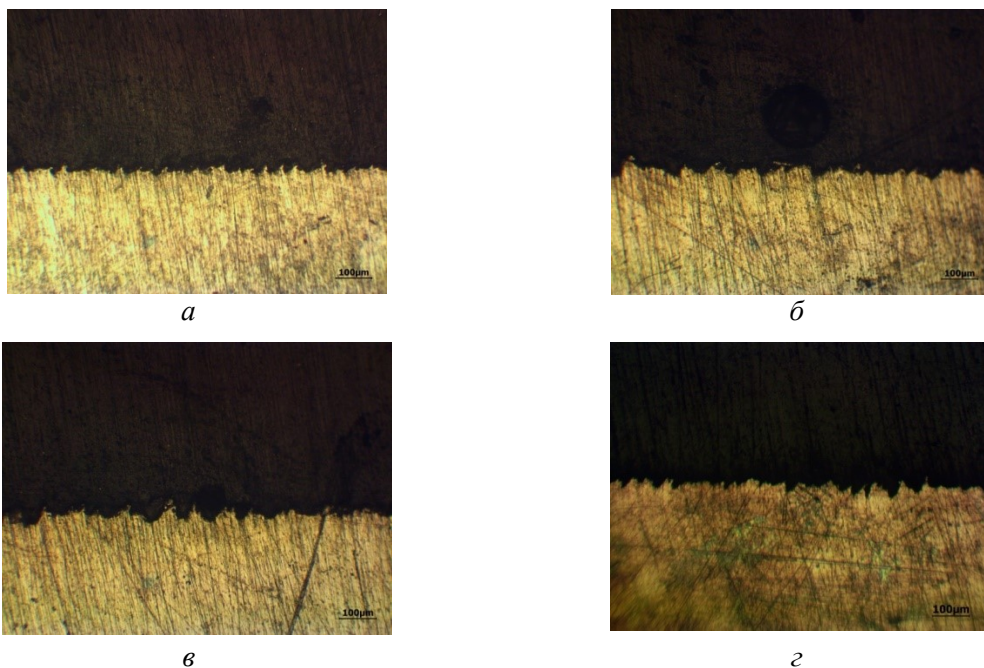


Рис. 7. Фотографии микрошлифов образцов с текстурой «К»: а – 10, б – 11, в – 12, г – 21

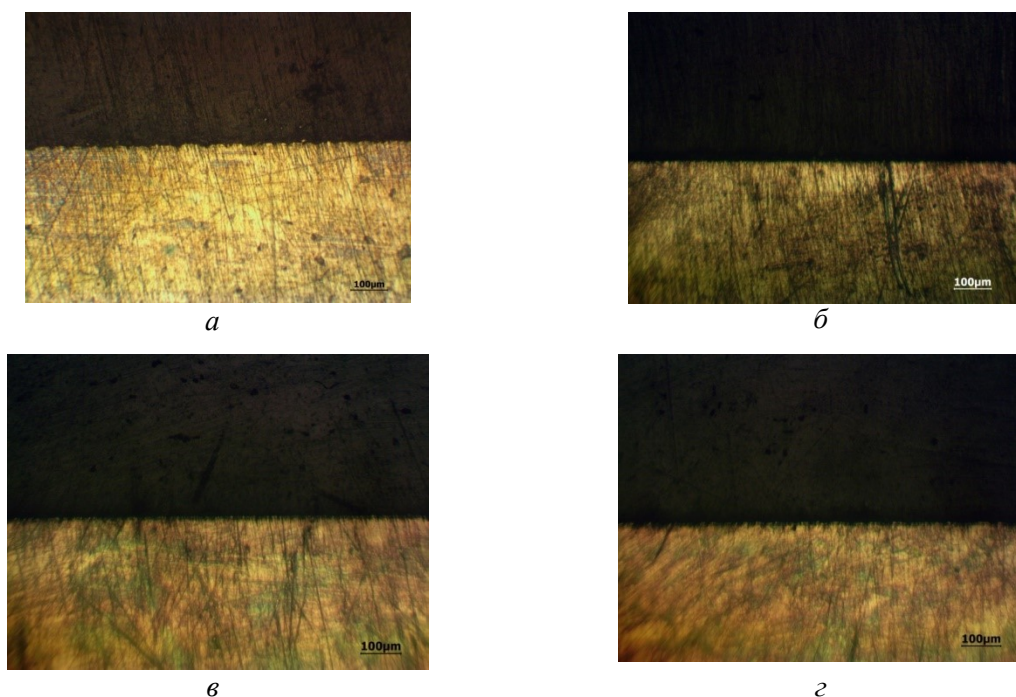


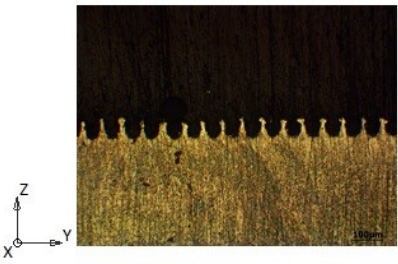
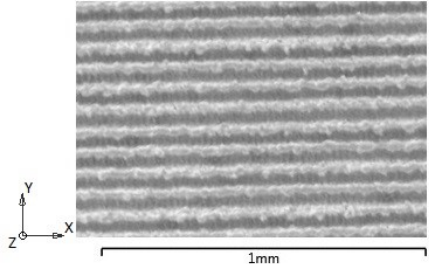

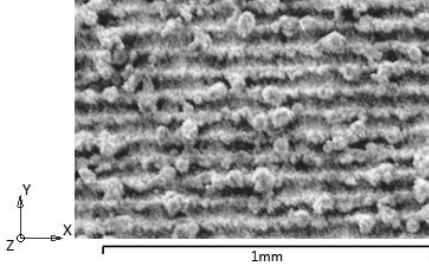

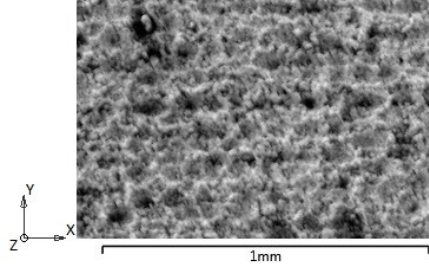

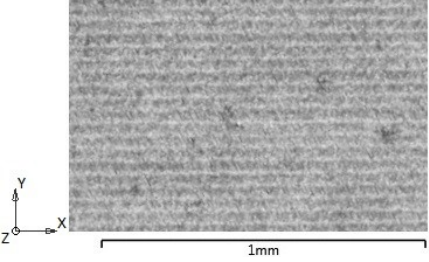
Рис. 8. Фотографии микрошлифов образцов с текстурой «С»: а – 13, б – 16, в – 22, г – 24

Измерения шероховатости поверхности и угол смачиваемости представлены в табл. 4. Угол смачиваемости измеряли через 24 часа после обработки поверхности. В связи с направленной особенностью поверхности после лазерной обработки капля жидкости удлиняется в направлении лазерного сканирования. Поэтому угол смачиваемости капли измерялся параллельно направлению

обработки (рис. 9). Смачиваемость поверхности сильно зависит от времени после обработки [19]. После 48 часов хранения обработанной поверхности на воздухе при комнатной температуре наблюдается небольшое увеличение угла смачиваемости, через месяц наблюдается возвращение к первоначальному значению необработанной поверхности.

Таблица 3

Параметры текстур

№ образца	Микрошлиф	Электронный микроскоп	Химический состав
1			Ti – 70,86 % O – 24,09 % C – 2,71 % Al – 1,71 % Mn – 0,62 %
3			Ti – 71,25 % O – 23,66 % C – 2,6 % Al – 1,75 % Mn – 0,73 %
12			Ti – 68,34 % O – 26,17 % C – 3,16 % Al – 1,64 % Mn – 0,7 %
13			Ti – 68,81 % O – 23,87 % C – 4,46 % Al – 2,09 % Mn – 0,78 %

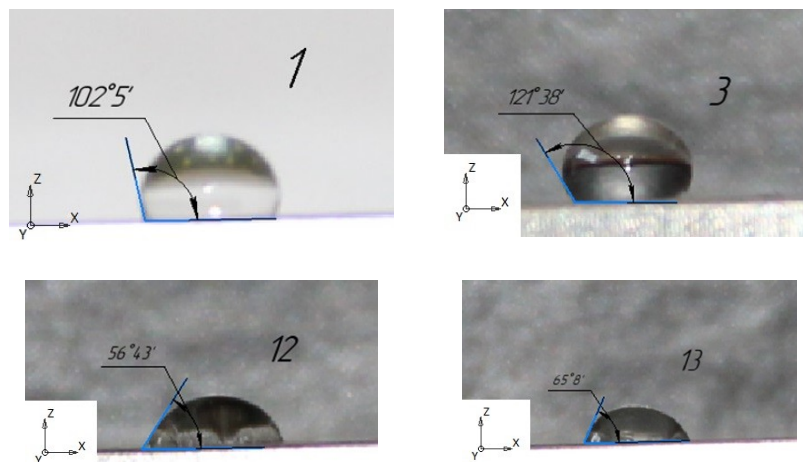


Рис. 9. Угол смачиваемости на обработанных лазером поверхностях:  
а – 1, б – 3, в – 12, г – 13

Образцы № 1 и № 3 показали гидрофобную поверхность. Это можно объяснить тем, что капля жидкости лежит на пиках обработанной поверхности, образуя воздушный карман с поверхностью, лежащей ниже вершин поверхности, что приводит к увеличению угла смачиваемости. Данное состояние представляет собой смешанное состояние Венцеля и Касси-Бакстера [22; 23]. Углы смачиваемости образцов № 12 и № 13 незначительно изменились по сравнению с необработанной поверхностью. Для масштабирования процесса лазерной обработки важным параметром является время обработки образца площадью 1 см<sup>2</sup>. Для ис-

следуемых режимов обработки данный параметр представлен в табл. 4.

На рис. 10 можно наблюдать микрошлифы клеевого соединения исследуемых образцов. На образцах № 1 и № 3, которые имеют гидрофобную структуру, не наблюдаются воздушные карманы. Это может быть связано с технологией склейки по ОСТ 92-0949-74. После нанесения клея и соединения пластин с лазерной обработкой необходимо приложить распределенную нагрузку на образец. Под действием этой силы клей проникает в микрорельеф поверхности и застывает, создавая неразъемное соединение.

Таблица 4

Параметры поверхности и лазерной обработки

Образец	Без обработки	1	3	12	13
Удельная плотность энергии обработки $E_d$ , мкДж/мкм <sup>2</sup>	–	0,750	1,5	2,5	0,625
Время обработки 1 см <sup>2</sup> , с	–	7,5	7,5	12,5	6,25
Шероховатость $R_a$ , мкм	0,72	6,5	9,65	5,37	1,76
Угол смачиваемости, °	61	102,5	121,38	56,43	65,8

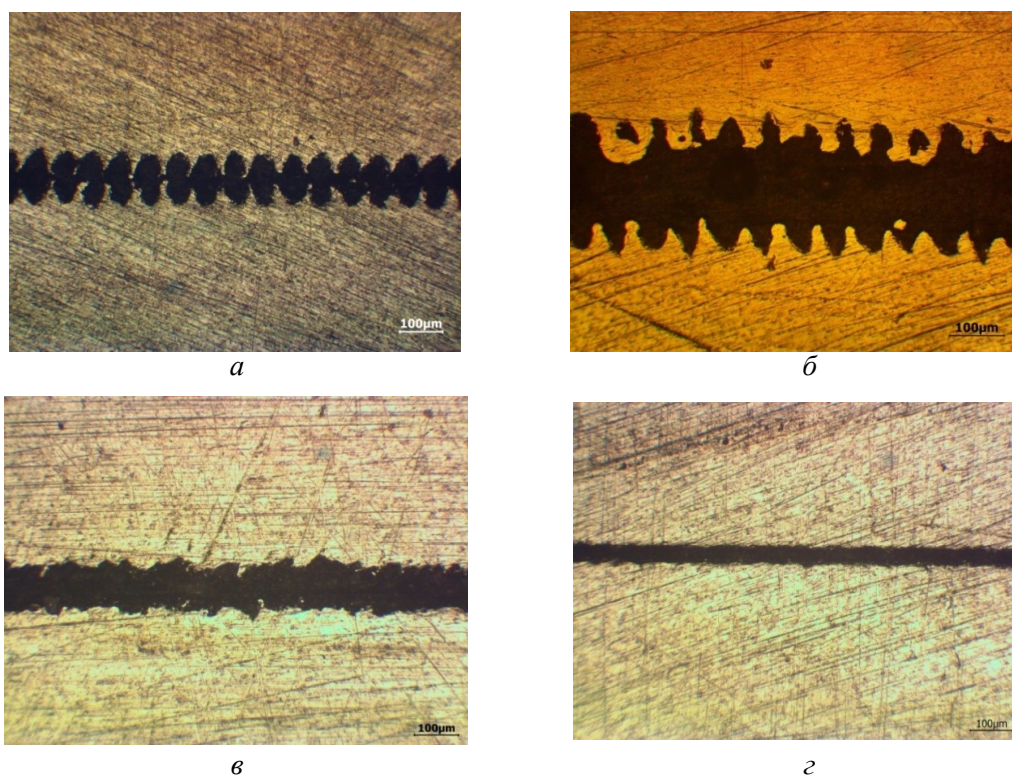


Рис. 10. Микрошлифы склеенных образцов:  
а – 1, б – 3, в – 12, г – 13

В табл. 5 и рис. 11 представлены результаты средних значений прочности на сдвиг клеевых соединений образцов №№ 1, 3, 12 и 13. На образцах

№№ 1, 3 и 13 наблюдается когезионное разрушение клеевого соединения, на образце 12 – смешанная схема разрушения (рис. 12).



Таблица 5

Результаты испытаний клеевых соединений на прочность при сдвиге

Образец	Без обработки	1	3	12	13
Прочность на сдвиг, МПа	14,15	23,61	25,13	24,17	21,83
Прирост прочности, %	–	66,8	77,5	70,7	54,2

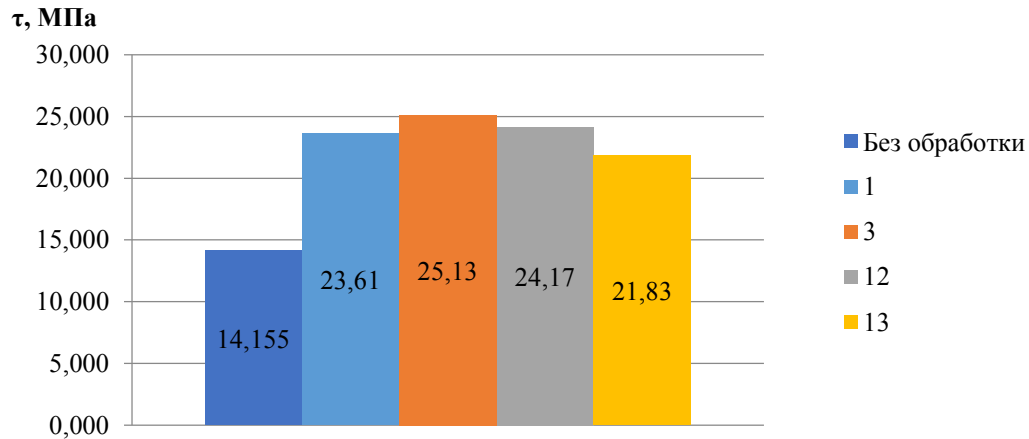


Рис. 11. Диаграмма прочности на сдвиг образцов

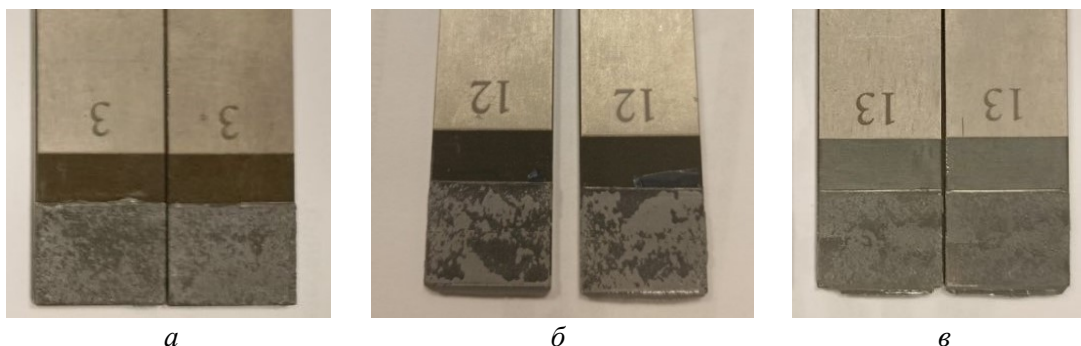


Рис. 12. Характер разрушения клеевого соединения:  
а – 3, б – 12, в – 13

Большой прирост прочности клеевого соединения показали образцы под № 3 и № 12 – более 70 %. Имея разные текстуры, образцы показали высокие результаты.

По микрошлифам исследуемых образцов было определено, что площадь контакта обработанных поверхностей увеличилась. В табл. 6 представлен показатель  $\delta$ , который показывает, во сколько раз в среднем увеличилась площадь контакта склейки:

$$\delta = L_{л} / L_{пр},$$

где  $L_{л}$  – длина кривой поверхности лазерной обработки на микрошлифе,  $L_{пр}$  – проекция кривой на горизонтальную ось.

Стоит отметить, что органическое загрязнение обработанной поверхности вносит отрицательное влияние на прочность клеевого соединения [18]. В химическом составе всех образцов был обнаружен углерод, что косвенно подтверж-

дает наличие органического загрязнения. Поэтому очистке поверхности до лазерной обработки и перед склеиванием необходимо уделять особое внимание.

Таблица 6

Значения показателя  $\delta$

№ образца	$\delta$
1	2,48
3	2,37
12	1,53
13	1,09

Заключение

Высокоэнергетические режимы лазерной обработки поверхности образцов перед склеи-

ванием приводят к значительному повышению прочностных характеристик клевого соединения (до 70 %). Прочность клевого соединения титановых образцов увеличивается благодаря, во-первых, увеличению площади склеивающей поверхности, во-вторых, механическому запираанию клея в микрорельефе текстуры поверхности.

Применение лазера значительно сокращает время обработки поверхности по сравнению

с механическими и химическими методами. Это важно при серийном производстве изделий, что непосредственно влияет на стоимость конечного продукта.

На основе полученных данных дальнейшее исследование будет направлено на определение влияния фазового состава поверхности на прочность клеевых соединений, в том числе пары «титановый сплав – углепластик».

## Список литературы

- [1] Сибилева С. В., Каримова С. А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 25–35.
- [2] Allen K. W., Alsalim H. S. Titanium and alloy surfaces for adhesive bonding // *J. Adhesion*. 1974. vol. 6. pp. 229–237.
- [3] Molitor P., Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2002. vol. 22. pp. 101–107.
- [4] Ramani K., Weidner W. J., Kumar G. Silicon sputtering as a surface treatment to titanium alloy for bonding with PEKEKK // *Int. J. Adhes. Adhes.* 1998. vol. 18. pp. 401–412.
- [5] Akram M., Jansen K. M. B., Ernst L. J., Bhowmik S. Atmospheric pressure plasma surface modification of titanium for high temperature adhesive bonding // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2011. vol. 31. pp. 598–604.
- [6] Venables J. D. Review: adhesion and durability of metal–polymer bonds // *J. Mater. Sci.* 1984. vol. 19. pp. 2431–2453.
- [7] Nagaoka A., Yokoyama K., Sakai J. Evaluation of hydrogen absorption behavior during acid etching for surface modification of commercial pure Ti, Ti–6Al–4V and Ni–Ti superelastic alloys // *Corrosion Science*. 2010. vol. 52. pp. 1130–1138.
- [8] Smith T. A Surface treatment for Ti–6Al–4V // *J. Adhes.* 1983. vol. 15. no. 2. pp. 137–150.
- [9] Mahoon A. Titanium adherends // *Durability of structural adhesives*. 1983. P. 255.
- [10] Ditchek B. M., Breen K. R., Sun T. S., Venables J. D. Morphology and composition of titanium adherends prepared for adhesive bonding // *Proc. 25th Nat. SAMPE Symp.* 1980. pp. 13–24.
- [11] Assefpour-Dezfuly M., Vlachos C., Andrews E. H. Oxide morphology and adhesive bonding on titanium surfaces // *J. Mater. Sci.* 1984. vol. 19. pp. 3626–3639.
- [12] Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование. М. : Экомет, 2005. 368 с.
- [13] Гордиенко П. С., Гнеденков С. В. Микродуговое оксидирование титана и его сплавов. Владивосток : Дальнаука, 1997. 185 с.
- [14] Коломейченко А. В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами с применением микродугового оксидирования : монография. Орел : Орел ГАУ, 2013. 255 с.
- [15] Федоров В. А., Белозеров В. В., Великосельская Н. Д. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // *Физика и химия обработки материалов*. 1991. № 1. С. 87–93.
- [16] Fundeanu I., Klee D., Kwakernaak A., Poulis J. A. The effect of substituted poly(p-xylylene) on the quality of bonded joints when used as a primer replacement // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2010. vol. 30. pp. 111–116.
- [17] Wang Y., Zhang J., Li K., Hu J. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser // *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. vol. 94. pp. 136–146.
- [18] Wang Y., Zhang M., Li K., Hu J. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy // *Optics and Laser Technology*. 2021. vol. 139. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.
- [19] Molitor P., Young T. Investigations into the use of excimer laser irradiation as a titanium alloy surface treatment in a metal to composite adhesive bond // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2004. vol. 24. pp. 127–134.
- [20] Руденко М. С., Марченко С. В., Раводина Д. В., Гирн А. В., Михеев А. Е. Способы повышения адгезии клевого соединения титанового сплава // *Решетневские чтения : материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск*. 2021. Ч. 1. С. 52–54.
- [21] 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. pp. 268–276.
- [22] Cassie A. B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces // *Faraday Society*. 1944. vol. 40. pp. 546–551. doi: 10.1039/tf9444000546.
- [23] Patil D., Aravindan S., Wasson M. K., Vivekanandan P., Rao P. V. Fast Fabrication of Superhydrophobic Titanium Alloy as Antibacterial Surface Using Nanosecond Laser Texturing // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*.

2017. no. 6. doi: 10.1115/1.4038093.

[24] Wang Y., Zhang J., Li K., Hu J. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser // Journal of Materials Science & Technology. 2021. no. 94. pp. 136–146.

## THE EFFECT OF LASER SURFACE TREATMENT OF TITANIUM SAMPLES ON THE ADHESIVE STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS

**A. V. Girn<sup>1</sup>, M. S. Rudenko<sup>1</sup>, V. B. Taigin<sup>2</sup>,  
A. E. Mikheev<sup>1</sup>, D. V. Ravodina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,  
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

*The article considers the strength of adhesive joints of specimens made of OT-4 titanium alloys, the surface of which has been treated with laser radiation. The paper presents the results of the dependence of the macro- and microgeometry of the obtained surface, chemical composition, wetting angle and adhesion strength of adhesive joints under shear on laser processing modes. The purpose of this work is to determine the optimal parameters of laser processing for obtaining high strength adhesive joints. The results obtained can be used for gluing spacecraft structural elements. The studies were carried out on the adhesive pair «Titan – Titan». Depending on the processing mode, characteristic surface textures were identified, which were combined into groups «B», «K» and «C». High-energy modes of laser surface treatment of samples before gluing lead to a significant increase in the strength characteristics of the adhesive joint (up to 70 %) due to an increase in the area of the gluing surface and mechanical locking of the adhesive in the microrelief of the texture of the samples. In addition, the use of this method, in comparison with mechanical and chemical methods, significantly increases the productivity of surface treatment.*

*Keywords: adhesive joint, titanium alloy, shear strength, laser processing.*

### References

- [1] Sibileva S. V., Karimova S. A. *Obrabotka poverkhnosti titanovykh splavov dlya obespecheniya adgezionnykh svoystv (obzor)* [Surface treatment of titanium alloys to provide adhesion properties] // Aviation Materials and Technologies, 2013, no. 2, pp. 25–35. (In Russian)
- [2] Allen K. W., Alsalim H. S. Titanium and alloy surfaces for adhesive bonding // J. Adhesion, 1974, vol. 6, pp. 229–237.
- [3] Molitor P., Young T. Adhesives bonding of a titanium alloy to a glass fibre reinforced composite material // Int. J. Adhes. Adhes., 2002, vol. 22, pp. 101–107.
- [4] Ramani K., Weidner W. J., Kumar G. Silicon sputtering as a surface treatment to titanium alloy for bonding with PEKEKK // Int. J. Adhes. Adhes., 1998, vol. 18, pp. 401–412.
- [5] Akram M., Jansen K. M. B., Ernst L. J., Bhowmik S. Atmospheric pressure plasma surface modification of titanium for high temperature adhesive bonding // Int. J. Adhes. Adhes., 2011, vol. 31, pp. 598–604.
- [6] Venables J. D. Review: adhesion and durability of metal–polymer bonds // J. Mater. Sci., 1984, vol. 19, pp. 2431–2453.
- [7] Nagaoka A., Yokoyama K., Sakai J. Evaluation of hydrogen absorption behavior during acid etching for surface modification of commercial pure Ti, Ti–6Al–4V and Ni–Ti superelastic alloys // Corrosion Science, 2010, vol. 52, pp. 1130–1138.
- [8] Smith T. A Surface treatment for Ti–6Al–4V // J. Adhes., 1983, vol. 15, no. 2, pp. 137–150.
- [9] Mahoon A. Titanium adherends // Durability of structural adhesives, 1983, P. 255.
- [10] Ditchek B. M., Breen K. R., Sun T. S., Venables J. D. Morphology and composition of titanium adherends prepared for adhesive bonding // Proc. 25th Nat. SAMPE Symp., 1980, pp. 13–24.
- [11] Assefpour-Dezfuly M., Vlachos C., Andrews E. H. Oxide morphology and adhesive bonding on titanium surfaces // J. Mater. Sci., 1984, vol. 19, pp. 3626–3639.

- [12] Suminov I. V., Epelfeld A. V., Lyubov V. B., Crete B. L., Borisov A. M. *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Micro-oxidation: Theory, Technology, Equipment]. Moscow, Ekomet, 2005, 368 p. (In Russian)
- [13] Gordienko P. S., Gnednikov S. V. *Mikrodugovoe oksidirovanie titana i ego splavov* [Micro-oxidation of titanium and its alloys]. Vladivostok, Dal'nauka, 1997, 185 p. (In Russian)
- [14] Kolomeychenko A. V. *Tekhnologii povysheniya dolgovechnosti detaley mashin vosstanovleniem i uprochneniem rabochikh poverkhnostey kombinirovannymi metodami s primeneniem mikrodugovogo oksidirovaniya* [Technologies for increasing the durability of machine parts by restoring and hardening working surfaces with combined methods using microfrave oxidation]. Orel, Orel GAU, 2013, 255 p. (In Russian)
- [15] Fedorov V. A., Belozarov V. V., Velikosek'skaya N. D. *Formirovanie uprochnennykh poverkhnostnykh sloev metodom mikrodugovogo oksidirovaniya v razlichnykh elektrolitakh i pri izmenenii tokovykh rezhimov* [Formation of hardened surface layers by micro-oxidation in various electrolytes and when changing current modes] // Physics and chemistry of materials treatment, 1991, no. 1, pp. 87–93. (In Russian)
- [16] Fundeanu I., Klee D., Kwakernaak A., Poulis J. A. The effect of substituted poly(p-xylylene) on the quality of bonded joints when used as a primer replacement // *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2010, vol. 30, pp. 111–116.
- [17] Wang Y., Zhang J., Li K., Hu J. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser // *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 94, pp. 136–146.
- [18] Wang Y., Zhang M., Li K., Hu J. Study on the surface properties and biocompatibility of nanosecond laser patterned titanium alloy // *Optics and Laser Technology*, 2021, vol. 139. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.106987.
- [19] Molitor P., Young T. Investigations into the use of excimer laser irradiation as a titanium alloy surface treatment in a metal to composite adhesive bond // *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2004, vol. 24, pp. 127–134.
- [20] Rudenko M. S., Marchenko S. V., Radodina D. V., Girn A. V., Mikheev A. E. *Sposoby povysheniya adgezii kleevogo soedineniya titanovogo splava* [Methods for increasing adhesion of adhesive connection of titanium alloy] // Reshetnev readings: materials of the XXV International conference, Krasnoyarsk, 2021, Part 1, pp. 52–54. (In Russian)
- [21] 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, pp. 268–276. doi: 10.1039/tf9444000546.
- [22] Cassie A. B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces // *Faraday Society*, 1944, vol. 40, pp. 546–551.
- [23] Patil D., Aravindan S., Wasson M. K., Vivekanandan P., Rao P. V. Fast Fabrication of Superhydrophobic Titanium Alloy as Antibacterial Surface Using Nanosecond Laser Texturing // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2017, no. 6. doi: 10.1115/1.4038093.
- [24] Wang Y., Zhang J., Li K., Hu J. Surface characterization and biocompatibility of isotropic microstructure prepared by UV laser // *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, no. 94, pp. 136–146.

## Сведения об авторах

*Гирн Алексей Васильевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию имени академика М. Ф. Решетнёва в 1998 году. Область научных интересов: нанесение защитных покрытий различного назначения, композиционные материалы.

*Михеев Анатолий Егорович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1973 году. Область научных интересов: нанесение защитных покрытий различного назначения, повышение твердости металлических поверхностей.

*Раводина Дарья Владимировна* – инженер кафедры летательных аппаратов Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончила Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва в 2011 году. Область научных интересов: нанесение защитных покрытий различного назначения.

*Руденко Михаил Сергеевич* – ассистент кафедры летательных аппаратов Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва. Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва в 2020 году. Область научных интересов: проведение испытаний механических устройств космических аппаратов.

ORCID: 0000-0002-1074-2548

*Тайгин Виталий Борисович* – начальник сектора отдела разработки антенных систем и сборки полезных грузов космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».