

Метод лазерного текстурирования тел вращения для повышения адгезионной прочности титанового сплава

© М.С. Руденко¹, А.В. Гирн¹, А.Е. Михеев¹,
П.С. Шастовский¹, Г.С. Терлецкий²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, 662972, Российская Федерация

Представлен метод лазерного текстурирования тел вращения из титанового сплава для повышения адгезионной прочности клеевых соединений в конструкциях космических аппаратов. Разработан универсальный алгоритм управления лазерной обработкой, обеспечивающий точное формирование спиральной и сетчатой текстуры поверхности материала с заданными параметрами: шагом между канавками, углом наклона и длиной обрабатываемой зоны. Алгоритм расчета учитывает геометрические особенности деталей, включая диаметр криволинейной поверхности, а также синхронизирует скорость перемещения лазера и частоту вращения заготовки для достижения равномерного распределения текстуры. Экспериментальные исследования проводились на цилиндрических образцах с двумя вариантами текстуры. Результаты испытаний показали, что лазерное текстурирование значительно повышает прочность клеевых соединений, значения которой превосходят показатели в случае механической обработки. Улучшение адгезионных свойств обусловлено увеличением шероховатости и созданием механических связей поверхности и клея. Метод лазерного текстурирования перспективен для применения в производстве силовых элементов космических аппаратов, таких, например, как соединения композитная труба—титановая втулка.

Ключевые слова: лазерное текстурирование, адгезионная прочность, титановый сплав, тела вращения, космические аппараты, клеевые соединения

Введение. Лазерная микрообработка поверхности — это перспективная технология модификации эксплуатационных характеристик элементов ракетно-космической техники [1–3]. В то время как лазерная закалка, гравировка, резка, сверление уже нашли широкое применение в ракетно-космической отрасли, метод лазерного текстурирования поверхностей остается инновационным направлением, находящимся на стадии активного внедрения [4].

Лазерное текстурирование поверхности — это метод модификации поверхностного слоя материала с помощью направленного лазерного излучения, заключающийся в создании регулярных или стохастических микро- и наноструктур с заданными топографическими параметрами для придания поверхности специальных функциональных свойств: адгезионных, трибологических, оптических, гидрофобных или гидрофильных [5].

В современных космических аппаратах (КА) активно используются композиционные материалы, в частности углепластики, что обусловлено их исключительными удельными характеристиками прочности и жесткости. В конструкции КА многие несущие элементы, в том числе корпусные панели, силовые фермы и крепежные узлы, выполняются с применением клеевых соединений. Такой подход обеспечивает минимальную массу конструкции, высокую эксплуатационную надежность и оптимальное распределение механических нагрузок. Кроме того, адгезионные соединения позволяют эффективно использовать такие разнородные материалы, как углепластик и титан, что важно при проектировании легких и высокопрочных элементов КА.

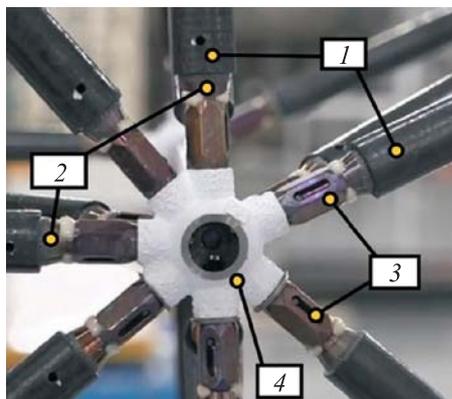
Титан и его сплавы относятся к категории трудносклеиваемых материалов из-за наличия на его поверхности тонкой пассивирующей оксидной пленки аморфного типа. Такое покрытие препятствует формированию прочных адгезионных связей на межатомном и межмолекулярном уровнях. В связи с этим для обеспечения требуемых адгезионных характеристик поверхность титановых сплавов необходимо подвергать предварительной обработке перед нанесением клеевого состава.

Перспективным методом предварительной обработки титановых сплавов перед склеиванием является лазерное текстурирование поверхности, которое формирует макро- и микрорельеф с заданными топографическими характеристиками, что способствует увеличению активной поверхности склеиваемых материалов. При этом лазерное воздействие одновременно удаляет аморфную оксидную пленку и модифицирует поверхность в глубокий кристаллический оксидный слой TiO_2 (диоксид титана), обеспечивая значительное улучшение адгезионных свойств [6]. Важное преимущество лазерного текстурирования по сравнению с традиционными методами обработки (механическими и химическими) заключается в возможности точного управления параметрами создаваемой структуры при сохранении химического состава и механических характеристик основного материала, что особенно важно для ответственных узлов КА.

В работах [7, 8] приведен анализ прочностных свойств адгезионных соединений на плоских образцах из титановых сплавов с поверхностной модификацией. Результаты показывают, что лазерное текстурирование способствует увеличению прочности клеевого соединения на 70...80 % по сравнению с необработанной поверхностью. Кроме того, установлено, что оптимизация параметров текстуры поверхности дополнительно повышает прочность КА на 20 %. Однако большинство несущих элементов конструкций КА, включая каркасные и ферменные узлы, представляют собой соединения типа «труба — втулка», в которых углепластиковая труба соединяется с титановой втулкой (рис. 1).

Рис. 1. Сборочный элемент клеевого соединения КА:

1 — углепластиковая силовая труба; 2 — титановая законцовка; 3 — фиксатор законцовки; 4 — фитинг, изготовленный аддитивным методом



Несмотря на подтвержденную эффективность лазерного текстурирования для повышения адгезионных свойств плоских титановых поверхностей, остается нерешенной задача адаптации данного метода для обработки тел вращения, характерных для КА. Основные технологические сложности заключаются:

- в обеспечении стабильного качества текстурирования на криволинейных поверхностях с варьируемыми диаметрами (5...50 мм);
- поддержании заданных параметров микрорельефа при изменении угла обработки относительно оси вращения (0...90°);
- достижении равномерного распределения текстуры по всей обрабатываемой поверхности с учетом скорости сканирования.

Отсутствие универсальной методики, предназначенной для приведенных случаев, ограничивает применение технологии лазерного текстурирования в производстве силовых элементов типа «композитная труба — титановая втулка», что делает актуальным такое исследование.

Цель исследования заключается в разработке универсального алгоритма лазерного текстурирования тел вращения, обеспечивающего точный контроль параметров формируемой поверхности, включая угол наклона текстуры α , шаг между структурными элементами δ и длину обработки H . Предлагаемая методика направлена на создание адаптивной системы управления, позволяющей корректировать траекторию лазерного сканирования с учетом геометрических особенностей детали и требуемых функциональных характеристик поверхности.

Расчет параметров лазерного текстурирования. Разрабатываемый алгоритм расчета должен обеспечивать точную синхронизацию возвратно-поступательного движения лазерного луча с равномерным однонаправленным вращением заготовки, для того чтобы достичь высокой производительности процесса. Входными параметрами для расчета являются количество формируемых канавок S , угол наклона текстуры относительно оси вращения α , диаметр заготовки D и длина обрабатываемой зоны H (рис. 2). Шаг между соседними канавками δ зависит от входных параметров S , α и D .

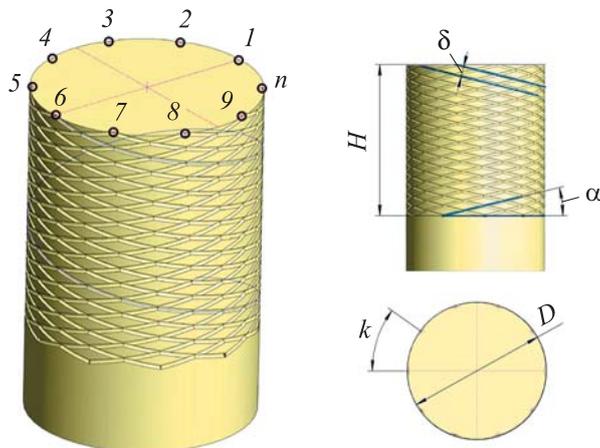


Рис. 2. Параметры текстуры на теле вращения

Для определения параметров лазерного текстурирования цилиндрических поверхностей используется система уравнений, включающая

- шаг между линиями на окружности k , определяемый по формуле

$$k = \frac{\pi D}{S},$$

где D — диаметр заготовки, мм; S — количество линий текстуры в одном направлении;

- фактический шаг между линиями вдоль образца, представленный выражением

$$\delta = k \sin \alpha = \frac{\pi D}{S} \sin \alpha,$$

где α — угол наклона текстуры относительно оси вращения, град.

Для обеспечения замкнутости траектории при лазерном текстурировании необходимо, чтобы конечная точка последнего витка совпадала с начальной точкой первого витка. Однако при заданной длине обработки H данное условие, как правило, не выполняется из-за дискретного характера наложения линий. Топология процесса требует, чтобы первая линия, начинающаяся в точке 0 (исходная координата), достигала сопряженной точки i^* на противоположной стороне образца, а при обратном ходе траектория проходила через точку $2i$, формируя непрерывную структуру (рис. 3). Для реализации этого условия необходимо ввести компенсационный параметр q , который корректирует общую длину обработки до значения h и обеспечивает точное совпадение начальной и конечной точек.

Компенсационный параметр q , который аддитивно дополняет базовую длину рабочей зоны H , определяется так:

$$q = (k(N + 1) - M) \operatorname{tg} \alpha,$$

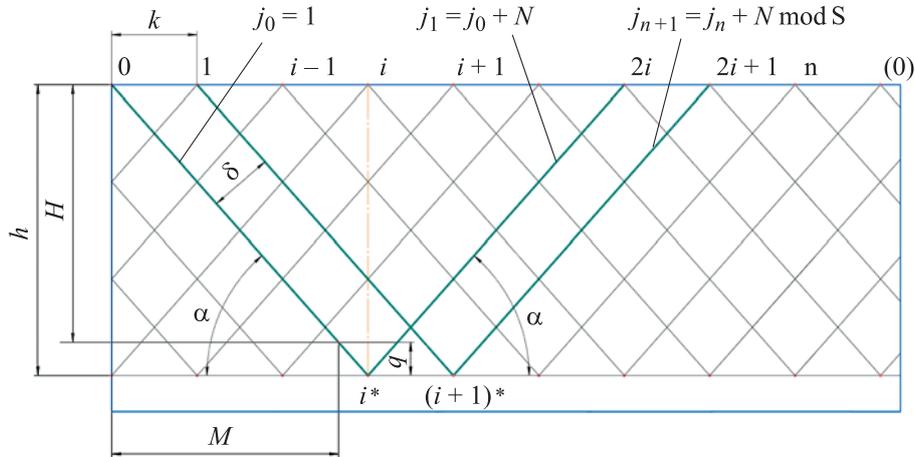


Рис. 3. Схема структуры лазерного текстурирования

где M — проекция длины витка по окружности, мм, $M = H/\operatorname{tg}\alpha$; N — определяет целочисленный шаг перехода между витками спиральной текстуры ($N = M/k$), обеспечивая выполнение следующих условий:

- переход от начального витка $j_0 = 1$ к витку $j_1 = (j_0 + N) \bmod S$;
- последующие витки $j_{n+1} = (j_n + N) \bmod S$.

Фактический шаг между соседними витками рассчитывается по формуле

$$N_{\text{eff}} = N \bmod S.$$

Общая длина траектории лазера h , необходимая для полного покрытия цилиндрической поверхности текстурой с заданными параметрами, вычисляется как сумма:

$$h = H + q.$$

Именно h обеспечивает точное замыкание текстуры без разрывов и является программной длиной линии, которая задается в ЧПУ лазера.

Для того чтобы исключить наложение витков и обеспечить полное текстурирование поверхности, должно выполняться условие:

$$\text{НОД}(2N_{\text{eff}}, S) = 1,$$

где НОД — наибольший общий делитель.

При нарушении этого условия, при котором два числа не имеют общих делителей, кроме 1, траектория закликивается на части линий, приводя к неполному покрытию и локальным наложениям текстуры. Оптимизация процесса текстурирования достигается при выборе значения S из последовательности (Π) простых чисел.

Принцип формирования спиральной текстуры при одновременном вращении заготовки с постоянной угловой скоростью и возвратно-

поступательном движении лазера со скоростью v представлен на схеме (рис. 4). Угол α определяет плотность укладки канавок, а параметр q обеспечивает равномерное распределение структурных элементов по поверхности.

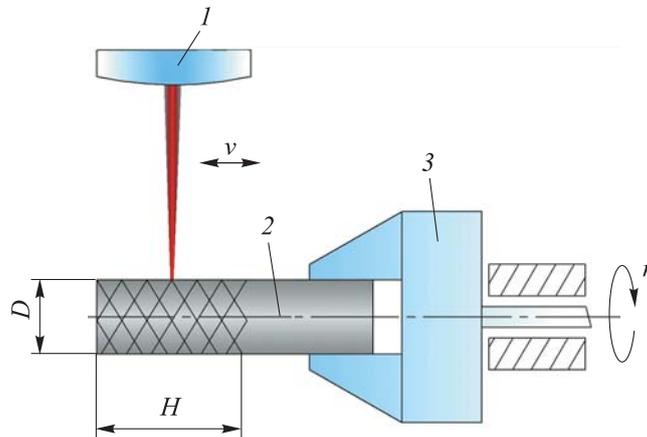


Рис. 4. Схема лазерного текстурирования тела вращения:

1 — лазерная установка; 2 — образец (тело вращения); 3 — зажим шагового двигателя

Алгоритм расчета должен учитывать зависимость скорости продольного перемещения лазера от частоты вращения заготовки, чтобы гарантировать:

- точное позиционирование лазера при реверсировании на торцах заготовки;
- соблюдение заданных геометрических параметров текстуры ($\alpha \pm 0,5^\circ$, $\delta \pm 10$ мкм) по всей поверхности;
- минимальное время переналадки при изменении диаметра D или угла α .

Для расчета линейной скорости лазерного фокального пятна относительно поверхности образца необходимо задать частоту вращения заготовки n (об/мин). Скорость v определяется так:

$$v = \frac{\pi D n t g \alpha}{60}.$$

Для лазерного текстурирования в ЧПУ лазера следует задать линейную скорость v , а для анализа тепловых процессов в зоне обработки необходимо учитывать результирующую скорость перемещения лазерного пятна относительно поверхности v_r , которая вычисляется по формуле

$$v_r = \frac{\pi D n}{60 \cos \alpha}.$$

Тогда удельная плотность энергии E (Дж/мм²) определяется выражением

$$E = \frac{4P_{\text{ср}}}{\pi d v_r},$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя мощность лазера, Вт; d — диаметр фокального пятна, мм.

Время обработки t является ключевым технологическим параметром, определяющим преимущество лазерного метода над традиционными механическими и химическими способами обработки поверхностей. Для разработанного метода лазерного текстурирования время обработки рассчитывается по формуле

$$t = \frac{hS}{30v}.$$

Для того чтобы сформировать требуемую текстуру, в управляющей программе лазерной системы необходимо задать две линии длиной h . Первая из них начинается в начальной точке образца и заканчивается на противоположном конце, а вторая линия возвращается в исходную позицию. Затем надо установить цикл повторения процесса S раз с заданной скоростью перемещения лазера v и частотой вращения n , после чего следует инициировать обработку.

Критерий равномерности распределения текстуры Δ формализуется как относительное отклонение фактического шага $\delta_{\text{реал}}$ от расчетного $\delta_{\text{расч}}$:

$$\Delta = \left| \frac{\delta_{\text{расч}} - \delta_{\text{реал}}}{\delta_{\text{расч}}} \right| \leq 0,05,$$

где $\delta_{\text{реал}}$ — измеренное расстояние между соседними бороздами, мм.



Рис. 5. Металлические образцы из титанового сплава без текстуры (а), титанового сплава с текстурой (б), из алюминиевого сплава с текстурой (в)

Образцы тел вращения, обработанные лазерным излучением для получения сетчатой и спиральной текстуры на основании предложенного метода расчета, показаны на рис. 5.

Экспериментальная часть. Для проверки эффективности предложенного метода по лазерной обработке поверхности тела вращения с целью увеличения адгезионной прочности были изготовлены опытные

образцы титановых заглушек со спиральной текстурой, нанесенной лазером. Выбор спиральной конфигурации текстуры обусловлен результатами исследования [8], в котором было установлено, что структуры, ориентированные ортогонально направлению приложения нагрузки, показывают повышенную устойчивость к сдвиговым деформациям в адгезионных соединениях.

Для верификации расчетной методики были отобраны две спиральные текстуры с разным шагом δ между канавками. В исследовании использовались следующие конфигурации текстурирования: текстура Т1 с шагом спирали $\delta = 250$ мкм и текстура Т2 с $\delta = 125$ мкм.

Экспериментальные исследования проводили на выполненных из титанового сплава ОТ-4 цилиндрических образцах диаметром $D = 17,8$ мм, при этом длина текстурированного участка была $H = 15$ мм.

Лазерная обработка поверхности тел вращения (рис. 6) проводилась на иттербиевом импульсном волоконном лазере (IPG, YLPM-1-4×200-20-20) с длиной волны 1,064 мкм, режимы текстурирования приведены в таблице. Глубина канавки, полученной лазерной обработкой, составила 60 мкм.

Режимы лазерного текстурирования

| Текстура | Спиральная Т1 | Спиральная Т2 |
|-------------------------------------|---------------|---------------|
| <i>Параметры текстуры</i> | | |
| S | 1 | |
| α , град | 0,256 | 0,128 |
| δ , мкм | 0,250 | 0,125 |
| <i>Параметры лазерной обработки</i> | | |
| Мощность лазера, Вт | 10 | |
| Частота вращения n , об/мин | 200 | |
| Скорость обработки v , мм/с | 0,833 | 0,416 |
| Длина волны лазера, мкм | 1,064 | |
| Частота следования импульса, кГц | 40 | |
| Ширина импульса, нс | 200 | |
| Энергия в импульсе, мДж | 1 | |

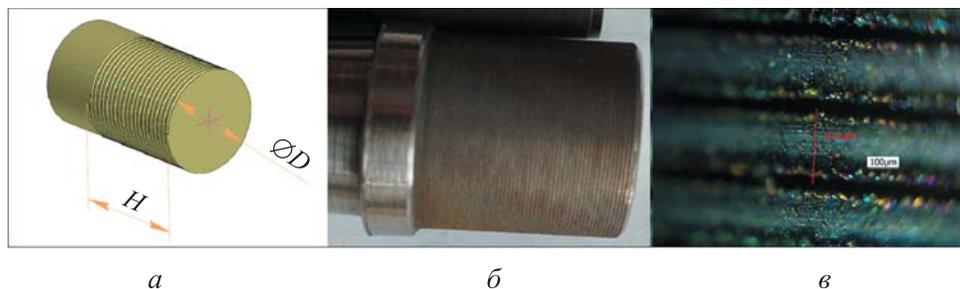


Рис. 6. Лазерная обработка поверхности тела вращения:
a — схема обработки; *б* — внешний вид образца со спиральной текстурой;
в — микроструктура поверхности образца

Титановые образцы с одинаковой спиральной текстурой клеивались с двух сторон на глубину 10 мм в углепластиковую трубку длиной 180 мм с внутренним диаметром 18 мм и толщиной стенки 1,5 мм. В качестве адгезива был использован трехкомпонентный клей ВК-9 (ОСТ 1-90281–86) на основе эпоксидной и полиамидной смолы. Площадь клеевого контакта $S = 560 \text{ мм}^2$. Испытания на сдвиг проводились через семь дней после склеивания для полной полимеризации клея на воздухе при комнатной температуре. С целью лучшего сцепления между поверхностями к образцам прикладывали статическую нагрузку и фиксировали до полного застывания соединения.

Прочность клеевого соединения на сдвиг определяли на универсальной разрывной машине Eurotest T-50 (S.A.E. IBERTEST, Испания) со скоростью 5 мм/мин (рис. 7).



Рис. 7. Испытание клеевого соединения:

a — принципиальная схема испытаний (*1* — неподвижная траверса; *2* — законцовки; *3* — образец; *4* — подвижная траверса); *б* — внешний вид образцов клеевого соединения; *в* — образец, установленный в разрывную машину

Результаты и обсуждения. Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром (TR110, TIME Group Inc., Китай). У первой спиральной текстуры Т1 шероховатость поверхности составила $R_a = 4,76 \text{ мкм}$, у второй текстуры Т2 — $R_a = 6,37 \text{ мкм}$. Прочность клеевых соединений σ определена на основе значения нагрузки P , зафиксированной в момент разрушения образца. Было проведено сравнение прочности соединений образцов при разных типах обработки поверхности:

- плоские образцы с клеевым соединением титан—углепластик без предварительной обработки, исследованные в работе [8] (рис. 8, *a*);
- образцы, полученные точением при изготовлении, с шероховатостью поверхности $R_a = 1,8 \text{ мкм}$ (рис. 8, *б*);
- образцы с нанесенными посредством лазерной обработки спиральными текстурами Т1 (рис. 8, *в*) и Т2 (рис. 8, *г*).

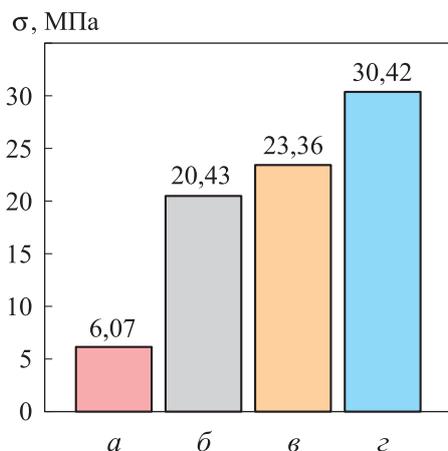


Рис. 8. Прочность клеевого соединения в зависимости от метода обработки поверхности титанового сплава

При использовании лазерной текстуры Т1 прочность соединения составила 23,36 МПа, что превышает показатель механической обработки, равный 20,43 МПа. Это объясняется формированием заданного микрорельефа, увеличивающего площадь контакта и обеспечивающего более эффективное механическое зацепление.

Наибольшая прочность, составившая 30,42 МПа, достигнута при применении текстуры Т2, что подтверждает преимущество лазерного текстурирования для улучшения адгезионных характеристик поверхности. По сравнению с механической обработкой лазерный метод обеспечил прирост прочности на ~50 %. Улучшенные показатели были обусловлены повышенной шероховатостью, способствующей увеличению площади контакта и усилению механической адгезии.

Заключение. Проведенные испытания подтвердили, что лазерное текстурирование поверхности, особенно с повышенной шероховатостью, значительно повышает прочность клеевых соединений. Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанный метод расчета параметров лазерной обработки может быть успешно применен для поверхностей сложной геометрии, а это открывает перспективы его использования для улучшения адгезионных характеристик в конструкционных элементах космических аппаратов. В рамках дальнейших исследований планируется нанесение сетчатой текстуры с целью дополнительного повышения прочности клеевого соединения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mishra S., Sridhara N., Mitra A., Yougandar B., Dash S.K., Agarwal S., Dey A. CO₂ laser cutting of ultra thin (75 μm) glass based rigid optical solar reflector (OSR) for spacecraft application. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, vol. 90, pp. 128–138. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.007

- [2] Вятлев П.А., Шеманов А.Г., Горный С.Г., Юдин К.В., Григорьев П.С., Мишин Ю.Н. Анализ качества меандра фольгового электронагревателя космического назначения, изготовленного с использованием лазерного излучения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-9-2208
- [3] Полищук Г.М., Сысоев В.К., Вятлев П.А., Лопота В.А., Туричин Г.А., Вартапетов С.К. Высокоэффективные лазерные технологии изготовления изделий ракетно-космической техники. *Авиакосмическое приборостроение*, 2008, № 4, с. 52–60.
- [4] Min J., Wan H., Carlson B., Lin J., Sun C. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*, 2020, vol. 128, paper 106188. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188
- [5] Wei Y., Jin X., Luo Q., Li Q., Sun G. Adhesively bonded joints — A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 276, p. 111225. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111225
- [6] Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № S2, с. 25–35.
- [7] Гирн А.В., Руденко М.С., Тайгин В.Б., Михеев А.Е., Раводина Д.В. Влияние лазерной обработки поверхности титановых образцов на адгезионную прочность клеевых соединений. *Космические аппараты и технологии*, 2022, т. 6, № 2, с. 90–99. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03
- [8] Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Орешкин Д.И. Влияние лазерного текстурирования поверхности титанового сплава на адгезионную прочность клеевых соединений. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2024, т. 25, № 3, с. 391–403. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403

Статья поступила в редакцию 25.06.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Шастовский П.С., Терлецкий Г.С. Метод лазерного текстурирования тел вращения для повышения адгезионной прочности титанового сплава. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 11. EDN KOXCDV

Руденко Михаил Сергеевич — ст. преподаватель кафедры «Летательные аппараты» СибГУ имени академика М.Ф. Решетнёва. e-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

Гирн Алексей Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты» СибГУ имени академика М.Ф. Решетнёва. e-mail: girn@sibsau.ru

Михеев Анатолий Егорович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Летательные аппараты» СибГУ имени академика М.Ф. Решетнёва. e-mail: miheev@sibsau.ru

Шастовский Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая механика» СибГУ имени академика М.Ф. Решетнёва. e-mail: shastovskyps@sibsau.ru

Терлецкий Георгий Сергеевич — инженер-конструктор 3-й категории АО «Решетнёв». e-mail: terletskiys@sibsau.ru

The method of laser texturing of bodies of rotation to increase the adhesive strength of titanium alloy

© M.S. Rudenko¹, A.V. Girn¹, A.E. Mikheev¹,
P.S. Shastovsky¹, G.S. Terletsky²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Territory, 660037, Russian Federation
²JSC “Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems”,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory, 662972, Russian Federation

The paper presents a method of laser texturing of bodies of rotation made of titanium alloy to increase the adhesive strength of adhesive joints in spacecraft structures. A universal laser processing control algorithm has been developed that ensures the precise formation of a spiral and mesh surface texture of the material with specified parameters: the pitch between the grooves, the angle of inclination and the length of the treated area. The algorithm takes into account the geometric features of the parts, including the diameter of the curved surface, and synchronizes the speed of the laser and the rotation frequency of the workpiece to achieve uniform texture distribution. Experimental studies were carried out on cylindrical samples with two texture variants. The test results showed that laser texturing significantly increases the strength of adhesive joints, which is 50% higher than values shown after mechanical processing. The improvement of adhesive properties is associated with an increase in surface roughness and the creation of mechanical bonds between the surface and the adhesive. The laser texturing method is promising for use in the production of spacecraft power elements, such as composite tube–titanium sleeve joints.

Keywords: laser texturing, adhesive strength, titanium alloy, bodies of rotation, spacecraft, adhesive joints

REFERENCES

- [1] Mishra S., Sridhara N., Mitra A., Yougandar B., Dash S.K., Agarwal S., Dey A. CO₂ laser cutting of ultra thin (75 μm) glass based rigid optical solar reflector (OSR) for spacecraft application. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, vol. 90, pp. 128–138. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.007
- [2] Vyatlev P.A., Shemanov A.G., Gornyy S.G., Yudin K.V., Grigoryev P.S., Mishin Yu.N. Analiz kachestva meandra folgovogo elektronagrevatelya kosmicheskogo naznacheniya, izgotovlennogo s ispol'zovaniem lazernogo izlucheniya. [Quality analysis of the meander of a space-purpose foil electric heater made using laser radiation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-9-2208
- [3] Polishchuk G.M., Sysoev V.K., Vyatlev P.A., Lopota V.A., Turichin G.A., Vartapetov S.K. Vysokoeffektivnye lazernye tekhnologii izgotovleniya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Highly efficient laser technologies for manufacturing rocket and space technology products]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2008, no. 4, pp. 52–60.
- [4] Min J., Wan H., Carlson B., Lin J., Sun C. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020, vol. 128, paper 106188. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188

- [5] Wei Y., Jin X., Luo Q., Li Q., Sun G. Adhesively bonded joints — A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 276, paper 111225. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111225
- [6] Sibileva S.V., Karimova S.A. Obrabotka poverkhnosti titanovykh splavov dlya obespecheniya adgezionnykh svoystv (obzor) [Surface treatment of titanium alloys to ensure adhesive properties (review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. S2, pp. 25–35.
- [7] Girn A.V., Rudenko M.S., Taygin V.B., Mikheev A.E., Ravodina D.V. Vliyanie lazernoy obrabotki poverkhnosti titanovykh obraztsov na adgezionnyuyu prochnost' kleevykh soedineniy [The effect of laser surface treatment of titanium samples on the adhesive strength of adhesive joints]. *Kosmicheskije apparaty i tekhnologii*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 90–99. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03
- [8] Rudenko M.S., Girn A.V., Mikheev A.E., Oreshkin D.I. Vliyanie lazernogo teksturirovaniya poverkhnosti titanovogo splava na adgezionnyuyu prochnost' kleevykh soedineniy [The effect of laser texturing of the titanium alloy surface on the adhesive strength of adhesive joints]. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal*, 2024, vol. 25, no. 3, pp. 391–403. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-391-403

Rudenko M.S., Senior lecturer, Department of Aircraft, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. e-mail: rudenko_ms@sibsau.ru

Girn A.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. e-mail: girn@sibsau.ru

Mikheev A.E., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Aircraft, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. e-mail: miheev@sibsau.ru

Shastovsky P.S., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. e-mail: shastovskyps@sibsau.ru

Terletsky G.S., 3rd category design engineer, JSC “Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems”. e-mail: terletskiys@iss-reshetnev.ru