

## ИСПЫТАНИЕ НА ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ «ТИТАН – УГЛЕПЛАСТИК», ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ

© 2024

- М. С. Руденко** старший преподаватель кафедры летательных аппаратов;  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск;  
[rudenko\\_ms@sibsau.ru](mailto:rudenko_ms@sibsau.ru)
- А. В. Гирн** кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры летательных аппаратов;  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск;  
[girn007@gmail.com](mailto:girn007@gmail.com)
- А. Е. Михеев** доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры летательных аппаратов;  
Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск;  
[michla@mail.ru](mailto:michla@mail.ru)
- В. Б. Тайгин** начальник сектора отдела разработки антенных систем  
и сборки полезных нагрузок космических аппаратов;  
АО «Информационные спутниковые системы» имени  
академика М. Ф. Решетнёва, г. Железногорск;  
[tavgin@iss-reshetnev.ru](mailto:tavgin@iss-reshetnev.ru)

В силовых конструкциях космических аппаратов часто используют клеевое соединение деталей из титановых сплавов и композиционных материалов. Для увеличения прочности клеевого соединения пары «титан – углепластик» необходима предварительная обработка склеиваемых поверхностей. Для обработки поверхности металла в данной работе предлагается применить лазерное текстурирование. Основной целью исследования является экспериментальное определение прочностных характеристик клеевого соединения углепластика и титанового сплава с различными режимами лазерной обработки поверхности металла и определение влияния термоциклирования на образцы клеевого соединения. Поверхность титанового сплава ОТ-4 обрабатывалась лазером при различных режимах, после чего образцы склеивали клеем ВК-9 и LOCTITE® EA 9394 AERO. Склеенные образцы подвергались термоциклированию в вакуумной камере в диапазоне температур от –150 до +150°C. Испытание образцов клеевого соединения на сдвиг показало, что лазерное текстурирование увеличивает прочность соединения в среднем на 60% для клея LOCTITE® EA 9394 AERO и на 142% для клея ВК-9. Образцы с лазерным текстурированием имеют когезионный характер разрушения по углепластику. При термоциклировании у большинства образцов наблюдается незначительное снижение прочности клеевого соединения (в среднем на 6...8%). Полученные результаты показывают, что использование лазерной обработки для подготовки титанового сплава перед склеиванием с композиционным материалом является перспективным методом повышения прочности клеевого соединения для элементов космического аппарата.

*Композиционный материал; титановый сплав; прочность клеевого соединения; термоциклирование; лазерное текстурирование*

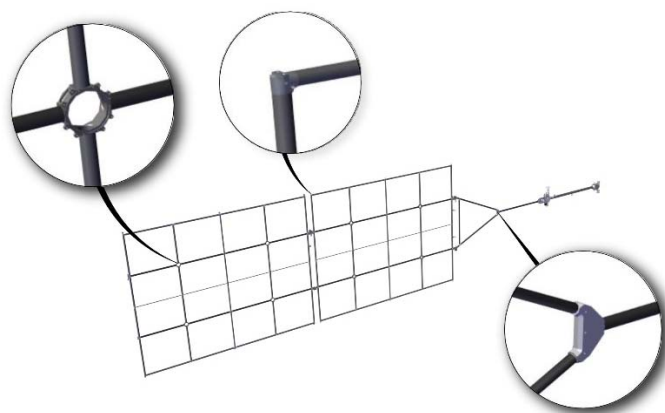
---

**Цитирование:** Руденко М.С., Гирн А.В., Михеев А.Е., Тайгин В.Б. Испытание на термоциклирование клеевого соединения «титан – углепластик», полученного с применением технологии лазерного текстурирования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 155-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-155-166

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), в первую очередь углепластики, являются основными материалами в силовых конструкциях космических аппаратов (КА). Это связано с их высокими удельными физико-механическими характеристика-

ми. Массовая доля композитов в КА может достигать более 80%, они используются в каркасах солнечных батарей, трёхслойных конструкциях, рефлекторах, кронштейнах и т. д. [1; 2] (рис. 1).



*Рис. 1. Пример элементов конструкций космического аппарата, для которых используется клеевое соединение «титан – углепластик»*

Одной из проблем использования ПКМ в конструкциях КА является сложность выполнения разъёмных и неразъёмных соединений. Широко используемые при соединении металлических материалов методы сварки и пайки не могут быть применены в конструкциях из ПКМ. Способы механического крепления с использованием болтов, заклепок и пр. имеют ограниченное применение, поскольку требуют сверления отверстий, что приводит к повреждению волокон, нарушению структуры композита и, как следствие, снижению прочности и жёсткости конструкции. Наиболее надёжными и широко применяемыми способами соединения деталей из ПКМ являются клеевые соединения с использованием металлических «законцовок» и «закладных» элементов. Оптимальными материалами для таких «законцовок» являются лёгкие алюминиевые и титановые сплавы, однако алюминий имеет высокий коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) ( $\alpha_L(\text{Al}) = 23,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ), что при эксплуатации в условиях космоса (циклический нагрев – охлаждение) может привести к росту внутренних напряжений в клеевом соединении с углепластиком, который, наоборот, имеет низкий КЛТР (в диапазоне от  $-0,1 \cdot 10^{-6}$  до  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ) [3], и к разрушению соединения. У титана КЛТР ниже ( $\alpha_L(\text{Ti}) = 8 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ) и он является более прочным и жёстким, чем алюминий, при относительно невысокой плотности. Однако титановые сплавы относятся к трудносклеиваемым материалам, так как на поверхности сплава всегда находится тонкая оксидная плёнка, которая препятствует образованию межатомных и межмолекулярных связей между клеем и подложкой. Поэтому изучение этого вопроса является актуальной научной задачей.

Существуют несколько распространённых способов подготовки поверхности для повышения адгезии между клеем и подложкой. Механическая обработка, такая как пескоструйная обработка, шлифовка абразивом, фрезерование режущим инструментом могут улучшить прочность клеевого соединения за счёт увеличения шероховатости поверхности и очистки поверхности от загрязнений и оксидной плёнки [4; 5]. Однако удаленный оксидный слой образуется вновь сразу после обработки, поэтому прочность клеевых соединений с такой подготовкой остается низкой. Химические методы, в частности травление, анодирование, микродуговое оксидирование также могут увеличить

прочность клеевого соединения за счёт структурной модификации поверхности [6 – 8], но эти процессы являются трудоёмкими, энергозатратными и экологически опасными.

В работе [9] представлены результаты исследования по определению предела прочности на сдвиг, кручение, сжатие и изгиб клеевого соединения законцовки из титанового сплава и штанги из ПКМ. Титановый сплав перед склеиванием подвергался механическому рифлению на токарном станке, а затем химическому травлению для формирования высокой степени микрошероховатости. Такой метод совмещает недостатки механической и химической подготовки титана в связи с длительностью обработки и является низкотехнологичным процессом.

Для увеличения адгезии титановых сплавов с клеем перспективной является лазерная обработка (ЛО) поверхности металлов [10]. Принцип лазерной обработки основан на плавлении, испарении и затвердевании поверхности металлического материала. Лазерный луч проходит от источника излучения к поверхности, где энергия лазерного импульса поглощается металлическим материалом, вследствие чего материал расплавляется и нагревается до температуры испарения. Испарённый материал образует плазменный шлейф на переднем фронте ширины лазерного импульса. Плазменный факел создает высокое внутреннее давление, которое выталкивает расплавленный металлический материал от центра лазерного луча. Выброшенный материал возвращается обратно на поверхность и образует новый затвердевший слой.

В работе [11] нами было исследовано влияние лазерной обработки поверхности титанового сплава на адгезионные и прочностные свойства клеевого соединения. Были выявлены характерные типы текстур при однонаправленной штриховке в зависимости от параметров лазерного излучения. Большое влияние на модификацию поверхности вносит мощность лазерного излучения и шаг траекторий излучения. Проведены предварительные исследования адгезионной прочности клеевой пары «титан – титан». В работе [12] было представлено исследование адгезионной прочности клеевой пары «титан – углепластик», которое показало, что предварительная лазерная обработка поверхности титанового сплава может увеличить прочность соединения на 80% относительно механической обработки. Увеличение прочности клеевого соединения при лазерной обработке зависит от трёх взаимосвязанных факторов. Во-первых, от увеличения площади контакта склеивания, во-вторых, от механического запираания клея в структуре образцов, и в-третьих, от изменения химического состава поверхности. Химический состав структуры поверхности под воздействием лазерного сканирования постепенно трансформируется из  $Ti$  и  $Ti_2O_3$  в кристаллический  $TiO_2$ .

Разработанная и исследованная технология показала высокие результаты испытаний на прочность, но, чтобы использовать её в элементах КА, необходимо подтвердить результаты в условиях, приближённых к космическим. КА на орбите испытывает ионизирующее излучение, условия вакуума, ультрафиолетовое воздействие, влияние микрометеоритов, перепад температур от  $-200$  до  $+200$  °С.

Термоциклирование является одним из основных типов наземных испытаний для космического аппарата, и, в частности, для клеевых соединений [13; 14]. Термоциклирование позволяет оценить долговечность и надёжность клеевых соединений под воздействием экстремальных температур, которые возникают во время эксплуатации космического аппарата на орбите. Прочность после термоциклирования может уменьшиться по причине роста внутренних напряжений в клеевом соединении из-за высокой разности КЛТР. В исследовании [15] прочность клеевого соединения стеклопластика после термоциклирования упала на 20%, а жёсткость на 18%. Термоциклирование также влияет на характер разрушения.

Основной целью настоящего исследования является экспериментальное определение характеристик клеевого соединения углепластика и титанового сплава с различ-

ными видами лазерной обработкой поверхности, а также определение влияния термоциклирования на такие соединения.

### Экспериментальные исследования

Определение влияния термоциклирования на прочность клеевого соединения клеевой пары «титан – углепластик» включало следующие этапы:

- 1) поверхности титанового сплава обрабатывались лазерным лучом тремя режимами;
- 2) осуществлялось склеивание титана и композиционного материала (углепластика) для испытания на сдвиг двумя видами клея: ВК-9 и LOCTITE® EA 9394 AERO по ОСТ 92-0949-74;
- 3) половина подготовленных образцов подверглась термоциклированию в вакуумной камере;
- 4) производилось испытание образцов на сдвиг на разрывной машине;
- 5) проводился анализ полученных при испытаниях результатов.

Образцы композиционного материала были изготовлены из углепластика КМУ-Сатин4Н/4. Размеры образцов 70×20×1 мм, количество слоёв 10 (рис. 2). КМУ-Сатин4Н/4 изготовлен методом прямого прессования из препрега ПУ-Сатин4Н/4 154.ТУ180, состоящего из углеродной ткани УТ-3К-Сатин4Н-185-30 (ТУ 23.99.14-032-75969440) пропитанной эпоксифенольным связующим ЭНФБ (ТУ 1-596-36). Из такого композиционного материалы изготавливают детали КА, работающие в интервале температур от –170 до +150 °С при нормальном давлении и в условии вакуума до 10<sup>-8</sup> Па, дозы радиации могут достигать 6·10<sup>8</sup> рад.

Физико-механические характеристики композиционного материала КМУ-Сатин4Н/4 представлены в табл. 1.

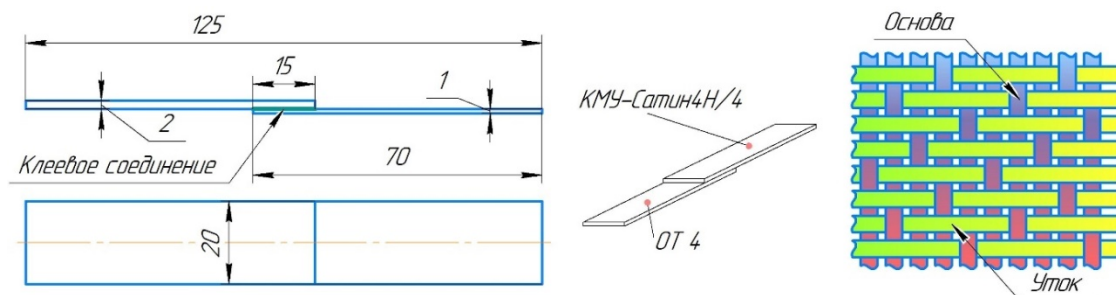


Рис. 2. Схема клеевого соединения пары «титан – углепластик»

Таблица 1. Характеристики полимерного композиционного материала КМУ-Сатин4Н/4

№	Показатель	Значение
1	Пористость, % не более	3,5
2	Предел прочности при растяжении, МПа	735,5
3	Предел прочности при сдвиге, МПа	49

Для титановых образцов использовался сплав ОТ-4, который широко применяется в конструкции КА. Размер образцов титанового сплава 70×20×2 мм.

В табл. 2 представлены варианты поверхностной обработки титанового сплава и углепластика, используемый клей и режим воздействия на клеевое соединение после склеивания.

Параметры режимов лазерной обработки титановых образцов (№3, №12, №13) представлены в табл. 3.

Таблица 2. Варианты образцов клеевого соединения для испытаний

№ варианта	Лазерная обработка поверхности ОТ-4	Обработка углепластика	Клей	Термоциклирование	Количество образцов
1	–	Пескоструйная	БК-9	–	5
2	–	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	–	5
3	Режим № 3	Пескоструйная	БК-9	–	5
4	Режим № 3	Пескоструйная	БК-9	+	5
5	Режим № 3	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	–	5
6	Режим № 3	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	+	5
7	Режим № 12	Пескоструйная	БК-9	–	5
8	Режим № 12	Пескоструйная	БК-9	+	5
9	Режим № 12	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	–	5
10	Режим № 12	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	+	5
11	Режим № 13	Пескоструйная	БК-9	–	5
12	Режим № 13	Пескоструйная	БК-9	+	5
13	Режим № 13	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	–	5
14	Режим № 13	Пескоструйная	LOCTITE® EA 9394 AERO	+	5

Таблица 3. Параметры режимов лазерной обработки

Параметр	Режим №3	Режим №12	Режим №13
Мощность лазера, Вт	20	20	10
Скорость обработки, мм/с	200	200	400
Количество полос на 1 мм, мм <sup>-1</sup>	15	25	25
Длина волны лазера, мкм	1,064		
Частота следования импульса, кГц	40		
Ширина импульса, нс	200		
Энергия в импульсе, мДж	1		
Количество проходов	2		

Обработка поверхности титановых образцов проводилась иттербиевым импульсным волоконным лазером (IPG, YLPM-1-4×200-20-20) при комнатной температуре в стандартной атмосфере. В работе [11] были выявлены оптимальные режимы лазерной обработки поверхности, которые используются в данной работе.

Обработка проводилась однонаправленной штриховкой рабочей зоны. Площадь обрабатываемой поверхности 15×20 мм. Для обеспечения статистической надёжности испытания проводились на пяти образцах для каждого выбранного режима.

На рис. 3 представлена текстура поверхности в зависимости от режима лазерной обработки. Шероховатость поверхности вследствие лазерной обработки увеличилась для режима №3 с Ra = 0,78 мкм до Ra = 9,65 мкм; для режима №12 с Ra = 0,78 мкм до Ra = 5,37 мкм; для режима №13 с Ra = 0,78 мкм до Ra = 1,76 мкм.

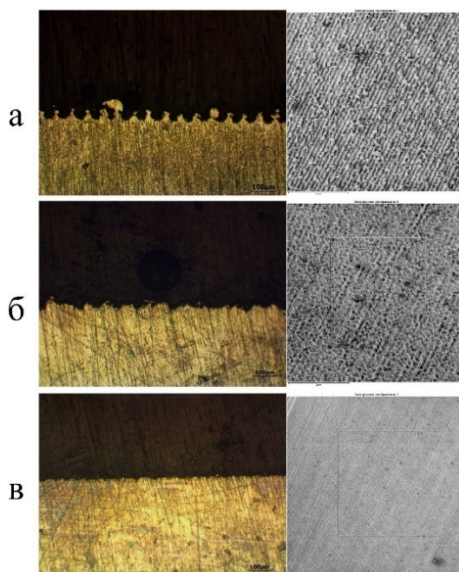


Рис. 3. Текстура поверхности в зависимости от режима обработки:  
а – режим №3; б – режим №12; в – режим №13

Для увеличения площади зоны склеивания поверхность углепластика подвергалась пескоструйной обработке, средняя шероховатость поверхности при этом увеличилась с  $Ra = 1,8$  мкм до  $Ra = 4,3$  мкм. Чтобы минимизировать влияние загрязнения поверхности с течением времени, склеивание образцов проводилось через 4 часа после лазерной обработки. Перед склеиванием обработанные поверхности титанового сплава и углепластика обезжиривались ацетоном. Площадь клеевого соединения  $S = 300$  мм<sup>2</sup>.

В исследовании использовались два клея, применяемых для конструкций КА: трёхкомпонентный ВК-9 (ОСТ 1-90281-86) и двухкомпонентный конструкционный пастообразный клей LOCTITE® EA 9394 AERO. Оба клея полимеризуются при комнатной температуре и обладают высокой прочностью при температурах до 177°C и выше, что и определяет его использование в сборке элементов КА. Склеивание проводилось по ОСТ 92-0949-74.

Испытание на воздействие циклического изменения температуры в условиях вакуума проводилось в вакуумной камере, при остаточном давлении  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Нагрев образцов осуществляли лампами типа КГ-127-1000, а охлаждение – жидким азотом. Клеевые соединения подверглись 10 температурным циклам. Диапазон температур составил от  $-150$  до  $150$  °С.

Для определения прочности клеевого соединения пары «титан – углепластик» испытывались образцы на сдвиг. Испытания проводились на универсальной разрывной машине Eurotest T-50 (S.A.E.IBERTEST, Испания) со скоростью 3 мм/мин.

Для анализа микроструктуры и микрорельефа обработанных лазером поверхностей использовали сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 (ХМУ, Чехия) и оптический металлографический микроскоп Neophot-32 (Carl Zeiss, Германия). Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром TR110 (TIME Group Inc., Китай).

### Результаты испытаний

На рис. 4 представлены значения среднего предела прочности клеевого соединения для каждой группы образцов при использовании клея LOCTITE® EA 9394 AERO (для образцов без лазерной обработки и обработанных по трём режимам). На рис. 5 представлены подобные результаты для клея ВК-9.



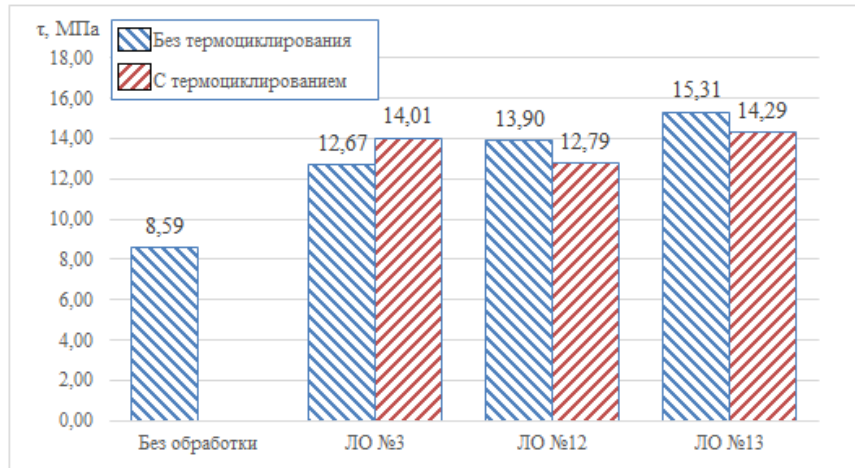


Рис. 4. Прочность клеевого соединения при использовании клея LOCTITE® EA 9394 AERO

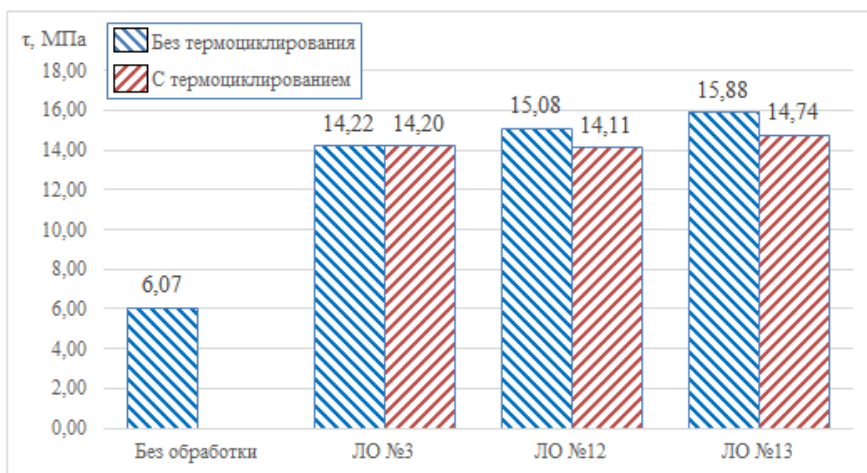


Рис. 5. Прочность клеевого соединения при использовании клея BK-9

Предел прочности клеевого соединения после лазерной обработки увеличился в среднем на 60% для клея LOCTITE® EA 9394 AERO и на 142% для клея BK-9 соответственно. После термоциклирования у большинства образцов наблюдается незначительное снижение прочности клеевого соединения в среднем на 6...8%. Это подтверждает возможность использования лазерной обработки титановых сплавов в узлах космического аппарата, подвергающихся циклическому нагреванию и охлаждению во время орбитального полёта.

Образцы без предварительной подготовки поверхности разрушились адгезионно между поверхностью титанового сплава и клея (рис. 6, а), что подтверждает низкие адгезионные характеристики титана. Наблюдались случаи смешанного разрушения соединения (рис. 6, б). Произошло адгезионное и когезионное разрушение углепластика. Это можно объяснить проникновением клея в структуру композиционного материала через микропоры. Большая часть образцов при испытании разрушилась когезионно по углепластику (рис. 6, в, г, д, е), что соответствует разрушению «в» на рис. 7. Это подтверждает, что адгезия между титаном и клеем выше расчётной прочности полимерного композиционного материала для данной марки композита КМУ-Сатин4Н/4.

Следует отметить, что соединение внахлёт подвергается изгибу во время нагрузки, создавая большие напряжения [15]. Многослойные композиты имеют слабую прочность в перпендикулярном направлении армирования. Для дальнейшего повышения прочности клеевого соединения необходимо увеличивать межслойную прочность углепластика.

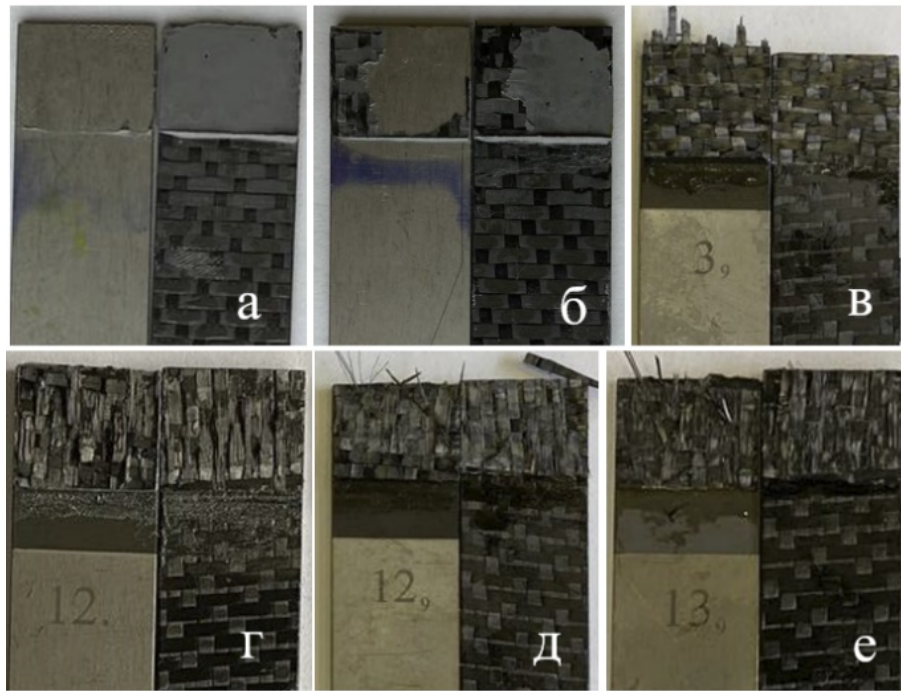


Рис. 6. Характер разрушения варианта клеевого соединения из табл. 2:  
 а, б – №2; в – №3; г – №9; д – №8; е – №12

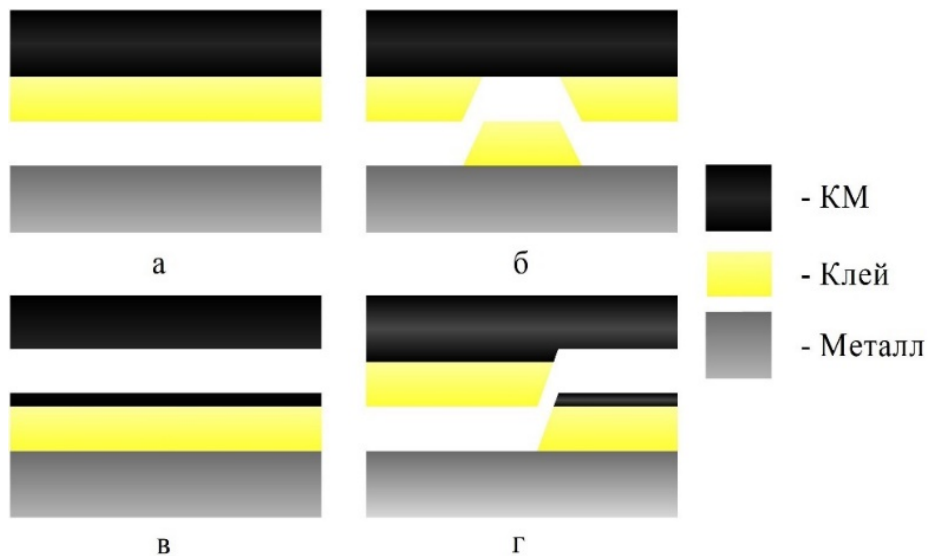


Рис. 7. Режимы разрушения клеевого соединения:  
 а – адгезионный, на границе разделов титан – клей; б – когезионное разрушение по клеевому шву;  
 в – когезионное, межслойное разрушение углепластика; г – смешанное разрушение

В работе [11] были проведены испытания на сдвиг клеевой пары «титан – титан» с лазерным текстурированием поверхности. Значение прочности на сдвиг для режима №3, №12 и №13 составило 25,13; 24,17 и 21,83 МПа соответственно. Характер разрушения клеевого соединения на трёх режимах обработки являлся адгезионным (рис. 7, а). При сравнении представленных результатов испытаний с предыдущими исследованиями выявлена разница адгезионной прочности между клеем и поверхностью металла в пределах 9...12 МПа.



## Заключение

Полученные результаты показывают, что использование лазерной обработки для подготовки титанового сплава перед склеиванием с композиционным материалом является перспективным методом повышения прочности клеевого соединения для элементов космического аппарата. Предел прочности на сдвиг клеевого соединения с лазерным текстурированием поверхности титанового сплава для клея ВК-9 вырос на 142%, для клея LOCTITE® EA 9394 AERO – на 60%. После проведённых испытаний на термоциклирование прочность клеевого соединения упала на 6...8%, что подтверждает возможность использовать лазерное текстурирование титановых сплавов на узлах космического аппарата, подвергающихся циклическому нагреванию и охлаждению во время орбитального полёта. Стоит отметить, что высокая шероховатость поверхности приводит к большей эффективной площади клеевого соединения. Но сложный микро-рельеф способствует задерживанию пузырьков воздуха в клее, что приводит к недостаточной смачиваемости поверхности. Поэтому при внедрении технологии в производство необходимо использовать клей с низкой вязкостью или создавать давление во время склеивания для затекания клея в микрорельеф.

## Библиографический список

1. Терлецкий Г.С., Зыков А.О., Тайгин В.Б. Анализ конструкций мембранных трансформируемых антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6, № 3 (41). С. 149-162. DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01
2. Волков М.В., Двирный В.В. Каркас солнечной батареи из труб треугольного сечения // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5, № 3 (37). С. 160-165. DOI: 10.26732/j.st.2021.3.05
3. Быткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.А. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроения. 2018. Т. 17, № 1. С. 100-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117
4. Ануфриенко В.Е., Волков М.В., Надеин И.О., Филиппов А.А. Способ подготовки поверхности металлических фитингов к склеиванию с трубами из композиционного материала // Материалы XXVI Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения», посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (09-11 ноября 2022 г., Красноярск). Ч. 1. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2022. С. 6-8.
5. Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2016. V. 65. P. 41-46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
6. Hu Y., Zhang J., Wang L., Jiang H., Cheng F., Hu X. A simple and effective resin pre-coating treatment on grinded, acid pickled and anodised substrates for stronger adhesive bonding between Ti-6Al-4V titanium alloy and CFRP // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 432. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.128072
7. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 25-35.
8. Prolongo S.G., Ureña A. Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2009. V. 29, Iss. 1. P. 23-31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.01.001

9. 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 (42). С. 263-271. DOI: 10.26732/j.st.2022.4.05

10. Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J., Sun Ch. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review // Optics and Laser Technology. 2020. V. 128. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188

11. 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 (40). С. 90-101. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03

12. 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

13. Алямовский А.И., Давыдов Д.Я., Земцова Е.В., Копыл Н.И. Результаты экспериментальных исследований высокотемпературных клеевых композиций на биосмалеимидной основе применительно к конструкциям ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2020. № 3 (30). С. 24-34. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-24-34

14. Sousa J.M., Correia J.R., Firmo J.P., Cabral-Fonseca S., Gonilha J. Effects of thermal cycles on adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends // Composite Structures. 2018. V. 202. P. 518-529. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.081

15. Hu Y., Yuan B., Cheng F., Hu X. NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy // Composites Part B: Engineering. 2019. V. 178. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107478

## **THERMOCYCLING TEST OF A TITANIUM-CARBON FIBER ADHESIVE JOINT PRODUCED USING LASER TEXTURING TECHNOLOGY**

© 2024

**M. S. Rudenko** Senior Lecturer of the Department of Aircraft;  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation;  
[rudenko\\_ms@sibsau.ru](mailto:rudenko_ms@sibsau.ru)

**A. V. Girn** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Aircraft;  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation;  
[girn007@gmail.com](mailto:girn007@gmail.com)

**A. E. Mikheev** Doctor of Science (Engineering), Professor,  
Professor of the Department of Aircraft;  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation;  
E-mail: [michla@mail.ru](mailto:michla@mail.ru)

**V. B. Taigin** Head of the Sector of the Department for the Development of Antenna  
Systems and the Assembly of Payloads of Spacecraft,  
JSC Information Satellite Systems named after academician  
M.F. Reshetnev, Zheleznogorsk, Russian Federation;  
[taygin@iss-reshetnev.ru](mailto:taygin@iss-reshetnev.ru)

In spacecraft load-bearing structures, adhesive bonding of titanium alloy and composite material parts is often used. To increase the strength of the adhesive bond of the titanium-carbon fiber reinforced plastic pair, preliminary treatment of the bonded surfaces is necessary. In this paper, it is proposed to use laser texturing to process the metal surface. The main objective of the study is to experimentally determine the strength characteristics of the adhesive bond of carbon fiber reinforced plastic and titanium alloy with different modes of laser processing of the metal surface and to determine the effect of thermal cycling on the samples of the adhesive bond. The surface of the OT-4 titanium alloy was laser processed in different modes, after which the samples were glued with VK-9 and LOCTITE® EA 9394 AERO glue. The glued samples were subjected to thermal cycling in a vacuum chamber in the temperature range from –150 to +150 °C. Shear testing of adhesive bond samples showed that laser texturing increases bond strength by an average of 60% for LOCTITE® EA 9394 AERO adhesive and by 142% for VK-9 adhesive. Samples with laser texturing have a cohesive nature of failure on carbon fiber. During thermal cycling, most samples show a slight decrease in adhesive bond strength by an average of 6...8%. The results show that the use of laser processing to prepare titanium alloy before bonding with composite material is a promising method for increasing the strength of adhesive bonds for spacecraft components.

*Composite material; titanium alloy; adhesive bond strength; thermal cycling; laser texturing*

*Citation:* Rudenko M.S., Girn A.V., Mikheev A.E., Taigin V.B. Thermocycling test of a titanium-carbon fiber adhesive joint produced using laser texturing technology. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 155-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-155-166

## References

1. Terletsky G.S., Zykov A.O., Taygin V.B. Analysis of the designs of membrane transformable antennas for spacecraft. *Spacecrafts and Technologies*. 2022. V. 6, no. 3 (41). P. 149-162. (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2022.3.01
2. Volkov M.V., Dvirny V.V. Solar battery frame made of pipes triangular cross-section. *Spacecrafts and Technologies*. 2021. V. 5, no. 3 (37). P. 160-165. (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2021.3.05
3. Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.A. Choice of materials for producing dimensionally stable load-carrying structures. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 1. P. 100-117. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117
4. Anufrienko V.E., Volkov M.V., Nadein I.O., Filippov A.A. A method for preparing the surface of metal fittings for gluing with tubes made of composite material. *Materialy XXVI Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Reshetnevskie Chteniya», posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva (09-11 noyabrya 2022 g., Krasnoyarsk)*. Chast' 1. Krasnoyarsk: Reshetnev University Publ., 2022. P. 6-8. (In Russ.)
5. Khan A.A., Al Kheraif A.A., Alhijji S.M., Matinlinna J.P. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016. V. 65. P. 41-46. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.11.003
6. Hu Y., Zhang J., Wang L., Jiang H., Cheng F., Hu X. A simple and effective resin pre-coating treatment on grinded, acid pickled and anodised substrates for stronger adhesive bonding between Ti-6Al-4V titanium alloy and CFRP. *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 432. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.128072
7. Sibileva S.V., Karimova S.A. Surface treatment of titanium alloys to provide adhesion properties. *Aviation Materials and Technologies*. 2013. No. S2. P. 25-35. (In Russ.)
8. Prolongo S.G., Ureña A. Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009. V. 29, Iss. 1. P. 23-31. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.01.001

9. Udod L.S., Nagovitsin V.N. Preparation of the surface of parts from titanium alloys for gluing with parts from polymer composite materials. *Spacecrafts and Technologies*. 2022. V. 6, no. 4 (42). P. 263-271. (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2022.4.05

10. Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J., Sun Ch. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020. V. 128. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106188

11. Girn A.V., Rudenko M.S., Taigin V.B., Mikheev A.E., Ravodina D.V. The effect of laser surface treatment of titanium samples on the adhesive strength of adhesive joints. *Spacecrafts and Technologies*. 2022. V. 6, no. 2 (40). P. 90-101. (In Russ.). DOI: 10.26732/j.st.2022.2.03

12. 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. V. 24, no. 1. P. 188-194. (In Russ.). DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-188-194

13. Alyamovskiy A.I., Davydov D.Ya., Zemtsova E.V., Kopyl N.I. Results of experimental studies into high-temperature adhesive compositions on bismaleimide base as applied to rocket and space hardware. *Space Engineering and Technology*. 2020. No. 3 (30). P. 24-34. (In Russ.). DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-3-24-34

14. Sousaa J.M., Correiaa J.R., Firmo J.P., Cabral-Fonseca S., Gonilha J. Effects of thermal cycles on adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends. *Composite Structures*. 2018. V. 202. P. 518-529. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.02.081

15. Hu Y., Yuan B., Cheng F., Hu X. NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy. *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 178. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107478