

Научная статья

УДК 620.179.13

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188041>

EDN: <https://www.elibrary.ru/JMTLZW>



Применение теплового контроля для оперативной оценки осевого натяга и радиальных зазоров в болтовых соединениях компонентов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов

Владимир Дмитриевич Вермель¹, Сергей Анатольевич Титов², Дмитрий Сергеевич Чернышёв³,
Евгений Александрович Казьмин⁴, Глеб Андреевич Корнилов⁵

^{1, 2, 3, 5} Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Московская область, Жуковский, Российская Федерация

⁴ Компания «Солпотерм», Жуковский, Российская Федерация

¹ npk@tsagi.ru

Аннотация. Рассматриваются конструкции болтовых соединений авиационных деталей из полимерного композиционного материала (ПКМ). Прочность и долговечность соединений определяются наряду с другими факторами сохранением эксплуатационных параметров: осевого натяга болтов и радиальных зазоров между стержнем болта и кромками отверстий в соединяемых деталях. Поскольку такие конструкции широко применяются для наиболее ответственных соединений агрегатов, а также деталей силового каркаса, разработан оперативный тепловой метод контроля. Его основным достоинством является мобильность аппаратуры: ее можно переносить непосредственно к контролируемым соединениям. На основании получаемой информации формируются термограммы, обработка которых позволяет оценить ключевые параметры соединений и непосредственно в аэродромных условиях корректировать натяг болтов с выявленным ослаблением.

Поскольку контроль осуществляется по площади с охватом ряда болтов в многоточечном соединении, он может выполняться в соответствии со временем межполетного осмотра летательного аппарата.

Метод опробован на ряде конструктивно подобных образцов с использованием демонстрационного макета комплекса с оборудованием для теплового контроля.

Ключевые слова: болтовые соединения деталей из ПКМ, тепловой контроль соединений, условия эксплуатационной долговечности соединений, оперативный контроль болтовых соединений, тепловой неразрушающий контроль радиального зазора и осевого натяга, термограммы конструктивных параметров болтовых соединений, экспериментальное опробование метода теплового контроля

Для цитирования: Вермель В.Д., Титов С.А., Чернышёв Д.С., Казьмин Е.А., Корнилов Г.А. Применение теплового контроля для оперативной оценки осевого натяга и радиальных зазоров в болтовых соединениях компонентов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 2. С. 109–119. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188041>

Original article

Thermal Control Application for Operative Assessment of Axial Allowance and Radial Clearance in the Bolted Joints of Aviation Structures Components from Composites

Vladimir D. Vermel^{1✉}, Sergei A. Titov², Dmitrii S. Chernyshev³, Evgenii A. Kazmin⁴, Gleb A. Kornilov⁵

^{1, 2, 3, 5} Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Moscow Region, Zhukovsky, Russian Federation

⁴ Soluterm Company, Moscow Region, Zhukovsky, Russian Federation

¹ npk@tsagi.ru✉

Abstract

Under modern conditions, the increase in number of the parts from composite materials stipulated application of bolt-on junctions with metal bolts while the aggregate assembly. The strength and durability of the joints are largely determined by retention of the operational parameters such as axial tension of the bolts and radial gaps values between the bolt bodies and orifices edges of the parts being joined. As long as the multi-row bolt joints with a large number of the coupling elements are employed in the most loaded and critical structures, a high operational efficiency of the on-line inspection at the characteristic period of the post-flight inspections is necessary.

The article discusses thermal methods of operational non-destructive express inspection of bolted joints under the airfield conditions. The methods are based on the heat redistribution analysis between the heated metal bolts and connected parts made of composite material, recorded by a thermal imager in a sequence of shooting frames. The inspected connection is being heated by a thermal loading source, which includes a set of heating lamps and a uniform radiation reflector. Two heating methods have been studied, namely with the heat source placement from one side of the joint, and on the opposite side relative to the thermal imager.

Thermal imaging processing of the joint elements heating process provides thermograms of the heat distribution between the metal bolts and the PCM parts.

Significant differences of the thermophysical properties allows evaluating by the heat redistribution the important parameters such as density of the adjacency of the parts surfaces in the joint, which determines axial tension of the connecting bolt. Thermal annular halos relative to the edges of the holes are presented as characteristics of the tension parameters in the joint.

The rational color-grade try-out in the images for their clearness enhancing was performed.

Experimental testing of the method on structurally similar samples allowed establishing correspondence between the thermogram and the controlled connection parameters, namely the radial gaps axial tension of the connecting bolts. The efficiency of the considered thermal control is ensured by the area of the controlled fragment of the bolted joint, at the significantly limited control time.

The thermograms being obtained allowed identifying visual indicators of the bolted joint parameters quality.

A patent of the Russian Federation has been obtained for the considered thermal control method.

Keywords: bolted joints of PCM parts, thermal control of joints, conditions of operational durability for joints, operational control of bolted joints, thermal non-destructive testing of axial and radial tension, thermograms of structural parameters of bolted joints, experimental approbation of the thermal control method

For citation: Vermel V.D., Titov S.A., Chernyshev D.S., Kazmin E.A., Kornilov G.A. Thermal Control Application for Operative Assessment of Axial Allowance and Radial Clearance in the Bolted Joints of Aviation Structures Components from Composites. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(2):109-119. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188041>

List of Figures

Fig. 1. The design and manufactured sample for conducting experimental studies: *a* – the sample scheme; *b* – drawing; *c* – parameter list; *d* – the front side photo; *e* – the back side photo

Fig. 2. Non-destructive thermal testing schematic: *a* – at direct thermal loading; *b* – at the reverse thermal loading

Fig. 3. Photo of the experimental thermal control unit

Fig. 4. Heat exchange between the bolt and carbon fiber during irradiation by the heating spotlights

Fig. 5. Thermogram (*a*) and thermal profile (*b*) of the sample

Fig. 6. Initial thermograms in various color pallets (*a, b*) and temperature-and-time dependencies (*c, d*) for the bolts (*1–6*) and the sample (*7*)

Fig. 7. Thermogram of the sample under the reverse thermal loading

Fig. 8. Diagram of a designed structurally similar joint: *1, 2* – carbon fiber panel; *3* – onlay; *4* – bolt; *5* – nut; *6* – spacer

Fig. 9. General view of the composite joints prepared for the strength tests: *a* – frontal view; *b* – view of the end surface

Fig. 10. The bolted joint zone thermogram of the PCM samples

Fig. 11. The bolted joint zone thermogram of for the two PCM samples after deformation in the testing machine

List of Tables

Table. Thermography results identification

Введение

Одним из критических элементов конструкций, в том числе авиационных, являются узлы соединения деталей и агрегатов. В авиационных конструкциях с широким использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ) для наиболее ответственных соединений агрегатов самолетов (фюзеляжа, консоли крыла, оперения и др.), а также деталей силового каркаса применяются многорядные болтовые соединения с использованием металлических болтов [1, 2]. Болтовые соединения обладают рядом существенных достоинств, в числе которых простота монтажа, эксплуатационная эффективность в случае разборных конструкций, низкая затратность. Усталостная долговечность соединений [1, 2] обеспечивается в том числе с помощью введения осевого и радиального натяга при установке болтов. Выполнение отверстий под размещение болтов в деталях из полимерных композиционных материалов приводит к нарушению структуры армирующего наполнителя и образованию свободного края на кромках отверстий в соединяемых пакетах слоистого композита. Существенно меньшая жесткость связующего обуславливает повреждение кромок отверстий стержнем металлических болтов. Развитие повреждений ускоряется при образовании радиальных зазоров между стержнем болта и кромками отверстия. Одним из факторов повышения долговечности металло-композитного соединения является осевой натяг соединительных болтов [3]. Обеспечивая плотность прилегания поверхностей соединяемых деталей и трение между ними, осевой натяг снижает интенсивность воздействия болта на кромки отверстия и их повреждаемость.

В процессе эксплуатации возможно расширение радиальных зазоров за счет деградации свойств ПКМ на кромках отверстий, а также уменьшения осевого натяга соединительных болтов.

Отклонения от требуемой плотности посадки и осевого натяга болтов возможны на этапе сборки соединений. Этим обусловлена актуальность проведения оперативного неразрушающего контроля (НК) затяжки болтов в соединениях [4]. В современных условиях эксплуатации воздушных судов

используется ряд методов НК (ПБ 03-440-02, ГОСТ Р ИСО 9712-2023), включая ультразвуковой акустико-эмиссионный, радиационный, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами (капиллярный и течеискание), вибродиагностический, электрический, тепловой, оптический.

В авиационной промышленности, где требуется повышенная надежность, роль НК возрастает. В научно-техническом аспекте НК является развивающимся направлением исследований [5, 6], а также практического внедрения [7]. Условно методы НК можно разделить на два типа: прямых и косвенных измерений [8].

К прямым методам НК относятся:

- оценка осевого натяга болта путем измерения момента затяжки с применением динамометрических ключей;

- визуальный осмотр соединений, не позволяющий оценить изменение натяга болтов в соединениях и образование зазоров между болтом и кромками отверстия в соединяемых деталях;

- применение проникающей жидкости, позволяющее обнаруживать зазоры между болтом и отверстием в соединении; недостатком способа является проникновение жидкости в кромки слоистого ПКМ и заполнение межслоевых трещин.

К косвенным методам НК относятся способы, основанные на связи напряжения в стержне болта с проходящими акустическими и электромагнитными сигналами. Актуальные материалы по применению ультразвукового контроля соединений с натягом, а также вихретокового, опробованного при проведении контроля резьбовых соединений, представлены в работах [9, 10].

К недостаткам перечисленных способов можно отнести высокую трудоемкость из-за необходимости контактного исследования каждого элемента болтового соединения, сложность интерпретации результатов исследования и отсутствие экспериментальных данных об их применении для полимерных композиционных материалов.

В настоящей статье рассматривается тепловой метод экспресс-диагностики многорядных многоточечных болтовых соединений деталей из

ПКМ, источником информации о состоянии соединения является распределение температуры по поверхности.

Тепловой контроль имеет ряд очевидных преимуществ перед другими методами НК:

- наглядность и простота интерпретации результатов в виде термограмм;

- высокая производительность благодаря большой площади контролируемого фрагмента конструкции при минимальных временных затратах;

- мобильность комплекса технических средств.

Имеются примеры удачного использования теплового метода неразрушающего контроля отдельных деталей авиационных конструкций, в частности металлических лопаток двигателей [11], а также трещинообразования в деталях из ПКМ [12] и др. Его применение позволяет дополнительно выявлять неоднородности структуры ПКМ, включая несплошности и ударные повреждения.

Методам теплового контроля деталей из ПКМ посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей, в частности исследование ударных повреждений в авиационных деталях рассмотрено В. Вавиловым и др. [13]. Использованию термографии для определения целостности деталей из ПКМ посвящена работа [14]. Исследование оптических источников нагрева проводил Г. Корнилов [15]; нагрев композитной конструкции за счет ее вибрационного нагружения исследовался в работах [16–20].

Т. Ванг, Ж. Солг и др. [21] использовали присоединение к болтам пьезоэлектрических датчиков, определяющих натяг в теле соединительного элемента.

В известных публикациях о методах контроля внимание уделяется прежде всего целостности деталей из ПКМ – обнаружению возможных неоднородностей в структуре материала деталей.

В реальных конструкциях болтовых соединений с большим количеством соединительных элементов применение датчиков деформации практически невозможно.

Предлагаемый способ контроля радиальных зазоров и осевого натяга крепежа в болтовом соединении основан на значительных различиях теплофизических свойств (теплопроводности, теплоемкости и др.) металлических болтов и соединяемых деталей из ПКМ. При плотном сопряжении крепежного элемента и соединяемой детали тепловой поток свободно перераспределяется между ними. При неплотном сопряжении перераспределение тепла между болтом и деталью существенно уменьшается, что выявляется при сопоставлении термограмм.

Экспериментальное исследование предлагаемого способа контроля болтовых соединений деталей из ПКМ рассматривается ниже.

1. Образцы для проведения исследования

В качестве объектов для проведения исследований разработаны образцы, состоящие из двух пластин размером 300×300 мм², толщиной 10 мм каждая, имеющих шесть отверстий, расположенных в два ряда (рис. 1).

В качестве крепежного элемента использована пара – металлический болт с гайкой. Головка болта плоская с углублением под затяжку торцевым шестигранником, что позволяет устанавливать его в отверстие композитной пластины впотай. Для затяжки гайки применяется накидной ключ.

Отверстия под болты в верхнем ряду (рис. 1,а) имеют одинаковые диаметры. Болты устанавливались с различными моментами затяжки. Отверстия нижнего ряда имеют диаметры, обеспечивающие радиальные зазоры: $\Delta D4 = 0,05$ мм, $\Delta D5 = 0,1$ мм и $\Delta D6 = 0,15$ мм.

2. Проведение теплового контроля соединений

При тепловом неразрушающем контроле различают два подхода: *прямой* и *обратный*.

При прямом тепловом нагружении источник теплового нагружения (ИТН) и тепловизор расположены с одной стороны исследуемого соединения (рис. 2,а), а при обратном тепловом нагружении ИТН расположен с противоположной стороны (рис. 2,б).

Исследование с прямым тепловым нагружением выполнено специалистами компании «Солютерм» с применением разработанного инструментального оборудования теплового контроля [22] в длинноволновом инфракрасном (ИК) поддиапазоне 7,5–13,0 мкм. Общий вид экспериментальной установки и тестового образца, представлен на рис. 3.

При облучении образца тепловым потоком от нагревательных прожекторов происходит нагрев поверхностей торца болта и углепластика, зависящий от коэффициентов поглощения и теплоемкостей данных материалов (рис. 4). Возможны три случая нагрева: 1) болт нагревается в большей степени, чем образец, и передает тепло углепластику по двум поверхностям контакта: конической, под шляпкой болта, и цилиндрической; 2) болт нагревается в меньшей степени, чем образец, и получает тепло от углепластика по поверхностям контакта; 3) болт и углепластик нагреваются одинаково, и при этом не происходит передачи тепла между ними. Таким образом, переходная температурная область между болтом и углепластиком возникает в первых двух случаях. Измерение тепловизором возможно при превышении интенсивностью излучения переходной области пороговой чувствительности фотоприемника. При этом наибольшее влияние на тепловой контраст переходной температурной

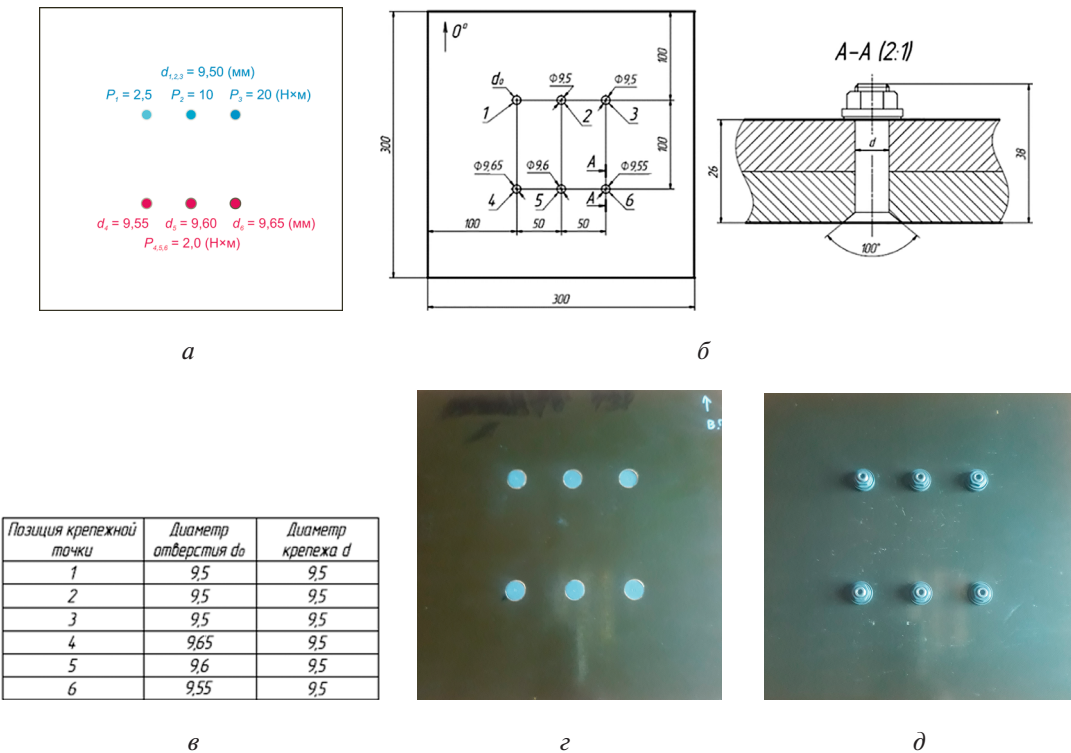


Рис. 1. Конструкция и изготовленный образец для проведения экспериментальных исследований:
а – схема образца; б – чертеж; в – таблица параметров; г – фотография лицевой стороны образца;
д – фотография обратной стороны образца

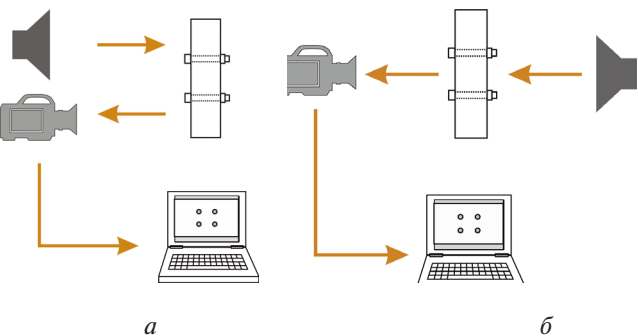


Рис. 2. Схемы теплового неразрушающего контроля:
а – при прямом тепловом нагружении;
б – при обратном тепловом нагружении

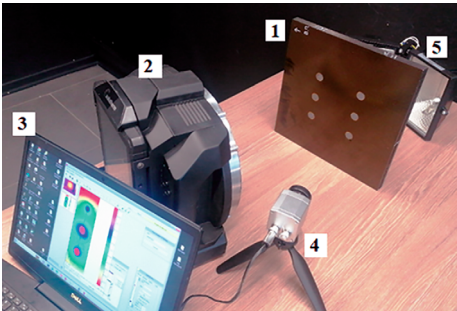


Рис. 3. Фото экспериментальной установки теплового контроля:
1 – образец; 2 – тепловой дефектоскоп;
3 – компьютер; 4 – тепловизор Optrix PI450;
5 – прожекторы IEK

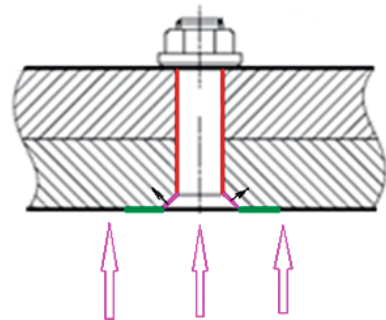


Рис. 4. Теплообмен между болтом и углепластиком при их облучении нагревательными прожекторами

области между болтом и углепластиком на поверхности образца (рис. 4, зеленый цвет) должно быть в зоне контакта конусных поверхностей болта и углепластика (малиновый), расположенной вблизи от поверхности образца.

При обратном тепловом нагружении использовался комплекс оборудования в следующем составе:

- источник теплового нагружения с комплектом промышленных ламп и рефлекторами равномерного облучения;

– тепловизор в средневолновом ИК-поддиапазоне (3–5 мкм);

– портативный компьютер с предустановленным программным обеспечением тепловизора для его настройки и обработки данных ИК-съемки.

Тепловой нагрев осуществляется продолжительным импульсом с мощностью до 3 кВт и длительностью до 20 с, после чего ИТН выключался. Благодаря дополнительному отвороту рефлектора предотвращалось влияние инерциального теплового излучения ИТН на процесс остывания образца. Нагрев и остывание образца регистрировались до завершения динамических изменений температурного поля на поверхности (не более 120 с с момента выключения ИТН).

Данные инфракрасной съемки выбранных областей представлены на рис. 5.

Для повышения оптической наглядности изображения использовались следующие процедуры:

- 1) вариация цветных палитр;
- 2) локализация области анализа – выбор субкадра;
- 3) применение к субкадру алгоритмов автоматической регулировки усиления (АРУ) соответствия значения температур цветовой палитре.

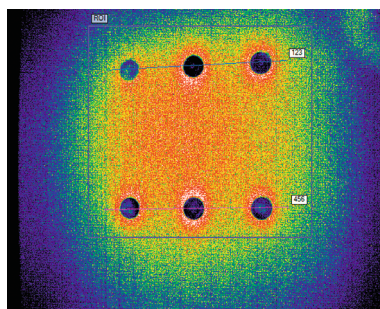
Полученная термограмма состояния болтового соединения для образца показана на рис. 5,а.

Обработка последовательности кадров инфракрасной съемки позволила построить график изменения температур в выбранной зоне узла соединения (рис. 5,б).

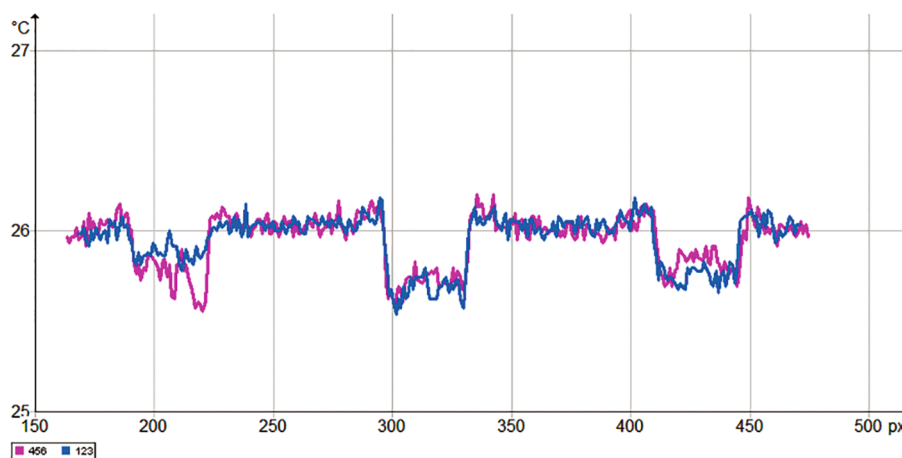
3. Анализ результатов теплового контроля тестового образца

Результаты исследований – серии термограмм от момента начала нагрева и до остывания образцов – были получены при прямом и обратном тепловом нагружении образцов.

Результаты контроля при прямом тепловом нагружении приведены на характерных термограммах, полученных с помощью дефектоскопа и программного обеспечения SOLIRT [23], которое создано для обработки данных активного теплового контроля и численного моделирования тепловых процессов с использованием алгоритмов активного теплового контроля (вычитание фонового изображения, фурье-анализ, анализ главных компонент, алгоритмы дефектометрии, измерения температуропроводности, тепловой инерции и алгоритмы тепловой томографии). В процессе остывания образца, после теплового нагружения, отчетливо видно, как



а



б

Рис. 5. Термограмма образца и термопрофили: а – термограмма; б – термопрофили

тепловой поток передается от металлического болта в композитную пластину (термограммы на рис. 6, а и б). Представленные в разных цветовых палитрах, они наглядно показывают наличие переходной температурной области между болтом и углепластиком – кольцевых зон с температурой, превышающей в окрестности контакта детали из ПКМ и металлического болта температуру основной детали из ПКМ, в дальнейшем области «ореола» на тепловом поле образца.

При обратном тепловом нагружении образца был также получен ряд термограмм от момента начала его нагрева до остывания. Обращает на себя внимание то, что после прекращения теплового нагружения происходит резкое падение температур головок болтов и композитной пластины, а затем постепенное увеличение их температур. Это обусловлено тем, что тыльная сторона образца, максимально прогретая во время теплового нагружения, сама стала источником теплового излучения.

Термограммы на интервале времени от 30 до 90 с после прекращения теплового нагружения практически не различаются, следовательно, выбор термограммы является инвариантным в данном временном интервале, что позволяет использовать монокадровую обработку данных тепловизионной съемки.

В связи с этим детальный анализ термограмм проводился после прекращения теплового воз-

действия, через временной промежуток, равный 60 с.

Важным элементом теплового неразрушающего контроля является анализ соответствующих термопрофилограмм (термопрофилей) – график изменения значения температур. Так, на рис. 5 и 6, помимо результирующих термограмм образца, представлены термопрофили, построенные через верхний и нижний ряды крепежных элементов, линии голубого и малинового цвета соответственно.

Анализ термопрофиля верхнего ряда показал, что при моментах затяжки больше 10 (Н · м) головки имеют достаточно низкую температуру, а при малых моментах затяжки температура головки несколько увеличивается.

Следовательно, при плохой затяжке крепежного элемента в композитной конструкции его головка в результате теплового нагружения, по видимому, лучше прогревается за счет воздуха в зазоре между стержнем и композиционным материалом.

Итоговая термограмма для исследуемого образца с маркировкой крепежа в соответствии с таблицей, представленной на рис. 1, б, показана на рис. 7.

Обобщающие результаты анализа полученных термограмм представлены в таблице.

Проведенные исследования показали, что индикатором качества состояния крепежного соединения композитных пластин является наличие

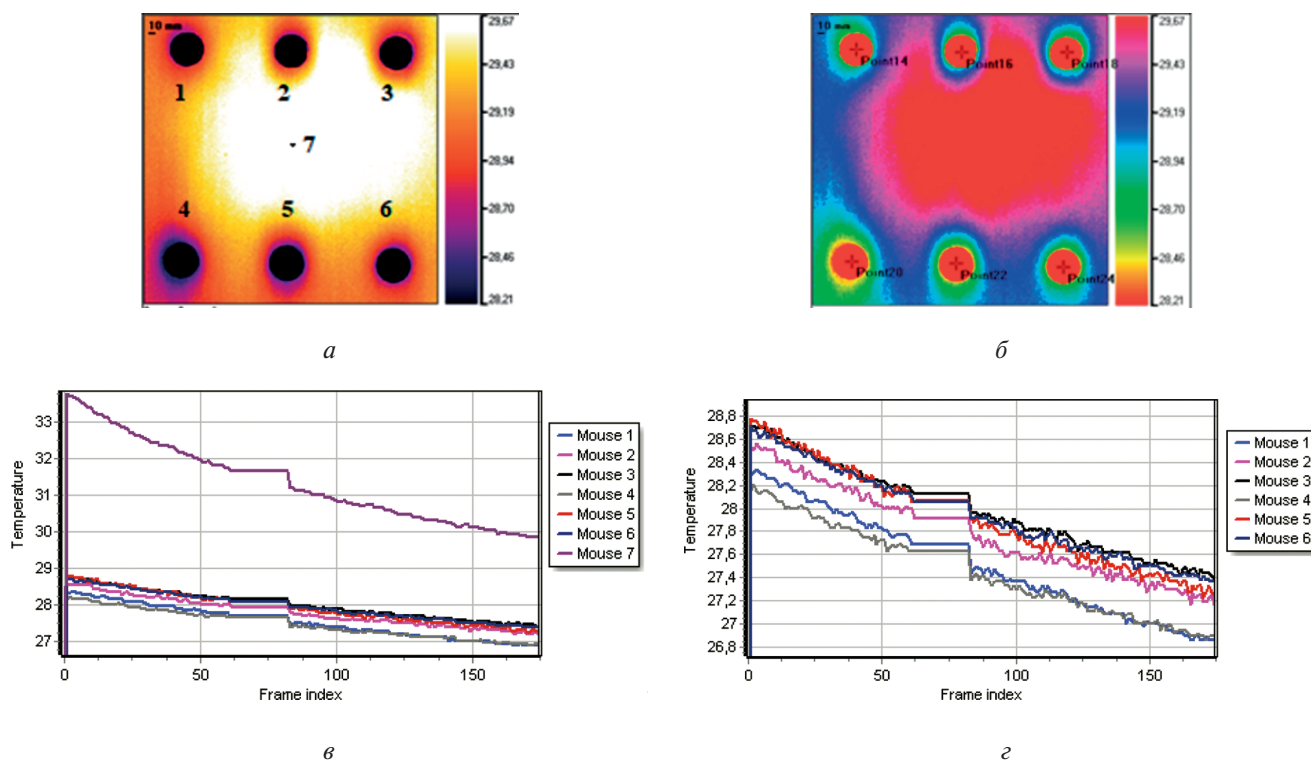


Рис. 6. Исходные термограммы в разных цветовых палитрах (а, б) и температурно-временные зависимости (в, г) для болтов (1–6) и образца (7)

Идентификация результатов термографии

№	Качество крепежа	Признаки на термограмме	Момент затяжки, Н · м	Зазор, мм
1	Низкое	Отсутствие «ореола»	2	0,10–0,15
2	Среднее	Белый «ореол»	10	0,05–0,10
3	Высокое	Красный «ореол»	10; 20	0,00–0,05

Примечание: низкое – наличие зазора или отсутствие нормального натяга;
среднее – зазор в соединении 0,05–0,10 мм на радиус, момент затяжки 10 Н · м;
высокое – соответствует плотной посадке и требуемому моменту затяжки 20 Н · м.

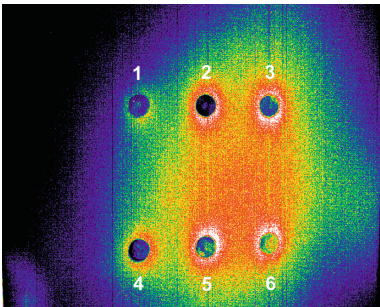


Рис. 7. Термограмма образца при обратном тепловом нагружении

«ореола», его отсутствие соответствует ослабленному осевому натягу болта. Для рассматриваемого композитного образца применение НК на основе метода ИК-термографии позволяет с использованием данных таблицы идентифицировать результаты.

Использование термопрофилограмм для анализа состояния болтового соединения деталей из ПКМ позволяет определить тенденции температурных изменений при различных моментах затяжки болта и зазорах между его стержнем и отверстием.

Метод ИК-термографии для контроля болтовых соединений композитных деталей можно использовать путем визуального анализа термограмм, по характерным изображениям, соответствующим состоянию конкретного болтового соединения.

4. Применение теплового неразрушающего контроля для болтовых односрезных соединений из ПКМ

Ранее рассматривались болтовые соединения с установкой болтов с потайной головкой. Перераспределение в них теплового потока от болта к композитной детали доступно для внешнего измерения тепловизором. При установке болта с головкой на поверхности детали этому может препятствовать металлическая шайба. Для подтверждения возможности контроля было проведено исследование на образцах многорядного соединения двух углепластиковых пластин в виде односрезного стыка. Схема конструктивно-подобного образца (КПО) представлена на рис. 8, а его фотография – на рис. 9.

С применением теплового контроля замерялась температура перед проведением испытаний, в процессе испытаний и после разрушения образца.

Результаты, полученные при прямом тепловом нагружении тестового образца соединения,

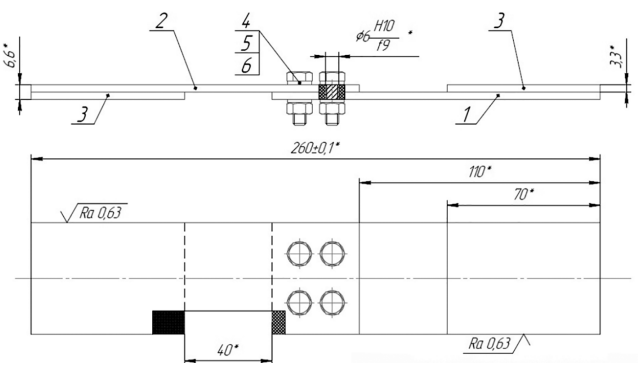


Рис. 8. Схема спроектированного КПО соединения: 1, 2 – панель из углепластика; 3 – накладка; 4 – болт; 5 – гайка; 6 – шайба



а



б

Рис. 9. Общий вид подготовленных для проведения прочностных испытаний образцов композитных соединений: а – фронтальный вид; б – вид с торцевой поверхности

не позволили сделать вывод о степени натяга крепежа.

При обратном тепловом нагружении были зафиксированы области передачи теплового потока от металлических элементов к композитной пластине с фиксацией областей с повышенной температурой в детали из ПКМ в виде кольцевых областей в зоне контакта с металлическим болтом. Характерная термограмма с «ореолами» распределений температур представлена на рис. 10.

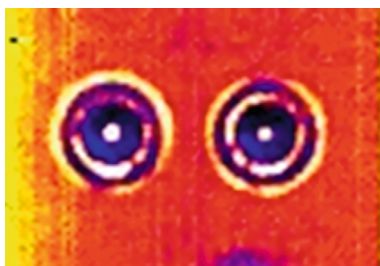


Рис. 10. Термограмма зоны болтового соединения образцов из ПКМ

При деформировании образца в процессе испытаний происходит овализация отверстий в детали из ПКМ, а также удлинение болтов, что приводит к нарушению плотного сопряжения контактирующих поверхностей деталей и крепежа. В этом случае металлический крепеж передает тепло, полученное от источника теплового нагружения, во внешнюю среду без передачи в деталь из ПКМ и на термограммах отсутствует кольцообразная область с повышенной температурой — «ореол». Характерная термограмма в зоне деформированного соединений представлена на рис. 11.

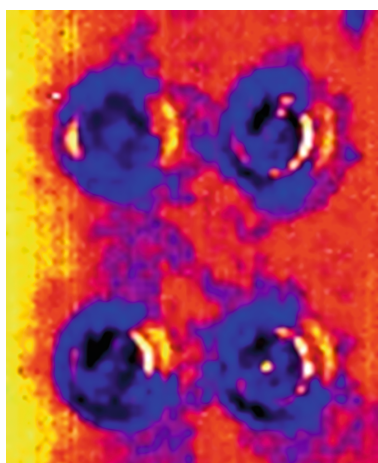


Рис. 11. Термограмма зоны болтового соединения двух образцов из ПКМ после деформирования в испытательной машине

В результате проведенных экспериментальных исследований:

- продемонстрирована возможность применения теплового контроля с односторонним доступом к детали при использовании болтов с потайной головкой;

- показана эффективность термографии с обратным продолжительным тепловым нагружением для крепежа с шайбой и головкой болта на внешней поверхности;

- установлено, что показателем качества состояния крепежного соединения композитной конструкции может стать наличие «ореола» на термограмме, причем его отсутствие соответствует слабому крепежу (с уменьшенным осевым натягом и увеличенным радиальным зазором). Применительно к рассматриваемому композитному образцу сформирована совокупность данных, которая позволяет идентифицировать состояние крепежного соединения по моменту затяжки болта и зазору между стержнем болта и кромками отверстия.

Новизна данного подхода в тепловом неразрушающем контроле при исследовании болтовых односрезных соединений из ПКМ была подтверждена полученным патентом РФ на изобретение [24].

Выводы

Разработан и экспериментально опробован способ теплового контроля для оперативной оценки осевого натяга болтов в многоточечных болтовых соединениях деталей из ПКМ. Его применение дает возможность выявить ослабленную затяжку болтов и провести их дозатяжку для получения расчетных прочностных и ресурсных характеристик соединения в конструкции.

Проведена экспериментальная оценка метода теплового неразрушающего контроля в двух инфракрасных поддиапазонах 3–5 мкм и 7,5–13,0 мкм для контроля зазоров между стержнем крепежных болтов и отверстием. Как прямое, так и обратное тепловое нагружение осуществлялось с краткосрочным полиимпульсным, а также с продолжительным воздействием.

Сопоставление полученных результатов с результатами, опубликованными в известных работах, показывает существенное преимущество предложенного способа теплового контроля болтовых соединений, обеспечивающего оперативное, площадное, дистанционное проведение контроля. Результаты контроля наглядны, они могут быть получены в ограниченное время в соответствии с требованиями к проведению межполетных осмотров. Развитием метода, наряду с совершенствованием

нием аппаратного комплекса, может стать создание интеллекта для обработки результатов термографической экспертной системы с элементами искусственного интеллекта для обработки результатов термографической съемки.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Яковец А.И., Сироткин О.С., Фирсов В.А. и др. Технология выполнения высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов. М.: Машиностроение, 1987. 191 с.
Yakovets AI, Sirotkin OS, Firsov VA, et al. *Technology of performing high-resource riveting and bolted joints in aircraft structures*. Moscow: Mashinostroenie; 1987. 191 p. (In Russ.).
2. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений в авиационной технике. М.: Машиностроение, 2006. 330 с.
Sirotkin OS, Grishin VI, Litvinov VB. *Design, calculation and technology of joints in aviation technology*. Moscow: Mashinostroenie; 2006. 330 p. (In Russ.).
3. Глебова М.А., Гришин В.И., Гусева Н.В. и др. Оценка прочности многорядных металлокомпозитных соединений авиационных конструкций // Ученые записки ЦАГИ. 2020. Т. 51. № 2. С. 57-67.
Glebova MA, Grishin VI, Guseva NV, et al. Strength estimation of metal-composite multiple row joints. *TsAGI Science Journal*. 2020;51(2):183-196.
4. Bickford JH. Other ways to control Preload. In: *Introduction to the design and behavior of bolted joints: nongasketed joints*. 5th ed. CRC Press; 2022. p. 197-216.
5. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2013. 542 с.
Vavilov VP. *Infrared thermography and thermal control*. Moscow: Spectr; 2013. 542 p. (In Russ.).
6. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль: Учеб. пособие. М.: Спектр, 2013. 171 с.
Budadin ON, Vavilov VP, Abramova EV. *Thermal control*. Moscow: Spectr, 2013. 171 p. (In Russ.).
7. Zweschper Th, Wu D, Busse G. Detection of loose rivets in airplane components using lock-in thermography. *4th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT98; September 7–10, 1998; Lodz, Poland)*. p. 161-166. DOI: 10.21611/qirt.1998.025
8. Nikraves SMY, Goudarzi M. A Review Paper on Looseness Detection Methods in Bolted Structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017;14(12):2153-2176. DOI: 10.1590/1679-78254231
9. Рыжова Т.Б. Оценка величин радиального натяга в заклепочных соединениях авиаконструкций с помощью ультразвука // Дефектоскопия. 1994. №6. С. 17.
Ryzhova TB. Estimation of radial tension values in rivet joints of aircraft structures using ultrasound. *Defectoscopy*. 1994(6):17. (In Russ.).
10. Герасимов В.Я., Парышев Д.Н. Повышение прочности болтов на основе деформационной тренировки переменными растягивающими напряжениями // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 9. С. 25-28.
Gerasimov VYa, Paryshev DN. Increasing the strength of bolts based on deformation training with variable tensile stresses. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2006(9):25-28. (In Russ.).
11. Абгарян В.К., Абгарян М.В., Могулкин А.И. и др. Тепловизионные измерения температур ускоряющего электрода высокочастотного ионного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 128-138. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182567>
Abgarian VK, Abgaryan MV, Mogulkin A, et al. Thermal Image Measurements of the Radio-Frequency Ion Thruster Accelerating Electrode Temperature. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):128-138. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=182567>
12. Жуков О.М., Ширяев Е.А., Вдовенко А.Г. Термографический контроль с ультразвуковой стимуляцией нагрева рабочей лопатки первой ступени газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 1. С. 172-179. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184460>
Zhukov OM, Shiryayev EA, Vdovenko AG. Thermographic Control with Ultrasonic Heating Stimulation of the Gas Turbine Engine First Stage Work Blade. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(1):172-179. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=184460>
13. Vavilov V, Chulkov A, Smotrov A, et al. Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity. *Measurement Science and Technology*. 2019;30(3). DOI: 10.1088/1361-6501/ab018e
14. Nishina Y, Imanishi D, Midorikawa S, et al. Infrared Thermography for Nondestructive Testing. *JFE GIHO* 2015(35):80–81.

15. Корнилов Г.А. Методика ИК-термографии выявления скрытого дефекта в авиационной конструкции из полимерных композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. 2022. Т. 24. № 1. С. 41-48. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.06
Kornilov GA. The method of infrared thermography for detecting a hidden defect in the aviation structure of polymer composites. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022;24(1):41-48. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.06
16. Ibarra-Castaneda C, Genest M, Guibert S, et al. Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study. *Proceccing of SPIE – The International Society for Optical Engineering (July 1-4, 2007; Orlando, Florida, USA)*. Vol. 6541, Thermosense XXIX: 654116. DOI: 10.1117/12.720097
17. Ullmann T, Aoki R, Schmidt T. Lock-in Thermography for Process Integrated Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Aircraft Structures. *10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (July 27-30, 2010; Québec, Canada)*. DOI: 10.21611/qirt.2010.140
18. Huga F, Kajiwara I, Hosoya N, et al. Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013;40(2):589-604. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.05.023
19. He K, Zhu WD. Detecting Loosening of Bolted Connections in a Pipeline Using Changes in Natural Frequencies. *Journal of Vibration and Acoustic*. 2014;136(3):034503-1.
20. Huynh TC, Lee KS, Kim JT. Local dynamic characteristics of PZT impedance interface on tendon anchorage under prestress force vibration. *Smart structures and systems*. 2015;15(2):375-393. DOI: 10.12989/sss.2015.15.2.375
21. Wang T, Song G, Wang Z, et al. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method. *Smart Materials and Structures*. 2013;22(8):087001. DOI: 10.1088/0964-1726/22/8/087001
22. Чернышёв Д.С., Живаев С.Н. Устройство для активного термографического неразрушающего контроля композитных авиационных конструкций. Патент RU 223337 U1. Бюлл. № 5, 14.02.2024.
Chernyshev DS, Zhivaev SN. *Device for active thermographic non-destructive testing of composite aircraft structures*. Patent RU 223337 U1. Bull. 5, 14.02.2024. (In Russ.).
23. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Активная количественная термография (SOLIRT). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2018666023. Бюлл. № 12, 11.12.2018.
Nesteruk DA, Vavilov VP. *Active quantitative thermography (SOLIRT)*. Certificate of state registration of the computer program RU 2018666023. Bull. 12, 11.12.2018. (In Russ.).
24. Титов С.А., Барышников О.Е., Захаржевский П.А. и др. Способ неразрушающего контроля состояния болтового соединения в конструкциях из полимерного композиционного материала. Патент RU 2858648 C1. Бюлл. № 8, 20.03.2026.
Titov SA, Baryshnikov OE, Zakharzhevskij PA, et al. *Method for non-destructive testing of state of bolted joint in structures made of polymer composite material*. Patent RU 2858648 C1. Bull. 8, 20.03.2026. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 05.05.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 14.05.2026
Принята к публикации / Accepted 14.05.2026