

УДК 539.4

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ерохин Г.Ю.^{1,2}, студент гр. ПС-21, IV курс, Крюкова Я.С.^{1,2}

Научный руководитель: Горбачев М.В.¹, к.т.н., доцент

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, г. Новосибирск

²Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А.
Чаплыгина, 630051, Россия, г. Новосибирск.

1. Введение

В последние десятилетия полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в авиационной и космической технике благодаря высокому значению отношения прочности к массе, коррозионной стойкости и возможности формирования конструкций сложной формы. Использование композитных материалов в элементах планера летательных аппаратов, стержневых конструкциях космических аппаратов и силовых элементах требует детального анализа их термомеханического поведения [1].

Особенностью ПКМ является выраженная анизотропия теплофизических и механических свойств, обусловленная ориентацией армирующих волокон и структурой слоистого материала. Это приводит к значительным различиям коэффициентов теплопроводности в продольном и поперечном направлениях. В результате термомеханические расчёты композитных конструкций оказываются значительно более сложными по сравнению с расчётами для традиционных металлических материалов без учёта анизотропии [2].

Кроме того, температурные воздействия могут существенно влиять на эксплуатационные характеристики композитных материалов. При повышенных температурах возможны процессы термического старения связующего, изменение межфазного взаимодействия между волокнами и матрицей, а также снижение механической прочности материала. В условиях космической эксплуатации на композитные элементы дополнительно воздействуют циклические температурные нагрузки и вакуум, что требует разработки надёжных методов теплового анализа [3].

В связи с этим в научной литературе активно развиваются различные подходы к моделированию температурных полей и теплопереноса в композитных конструкциях, включающие аналитические методы, численное моделирование и экспериментальные исследования теплофизических свойств материалов.

Целью настоящего обзора является анализ существующих методов теплового расчёта композитных элементов конструкций и оценка их применимости при проектировании авиационно-космической техники.

2. Аналитические методы теплового расчёта композитных материалов

Одними из первых подходов к анализу температурных процессов в композитных конструкциях являются аналитические методы решения задачи теплопроводности, основанные на решении уравнений теплопереноса для многослойных анизотропных материалов.

В большинстве случаев тепловое состояние композитных элементов описывается дифференциальным уравнением теплопроводности с учётом температурной зависимости теплофизических свойств материала. При этом эффективные коэффициенты теплопроводности определяются с использованием микромеханических моделей или правил смесей, учитывающих вклад армирующих волокон и матричного материала [4].

Для однонаправленных композитных материалов характерна значительная разница между продольной и поперечной теплопроводностью. В продольном направлении теплопроводность определяется главным образом свойствами армирующих волокон, тогда как в поперечном направлении значительную роль играет полимерная матрица. Это приводит к формированию анизотропного температурного поля в конструкциях, особенно при локальном нагреве или охлаждении [5].

В ряде исследований показано, что традиционные методы определения теплофизических свойств композитов, основанные на испытаниях стандартных образцов, не всегда позволяют корректно учитывать особенности структуры материала. Например, при изготовлении образцов из готовых конструкционных элементов возможно нарушение структуры армирования и, как следствие, изменение теплофизических характеристик [6].

В связи с этим были предложены методы определения коэффициентов теплопроводности непосредственно на элементах натуральных конструкций. В таких методиках измеряются температурные поля на поверхности композитного элемента, после чего с использованием методов решения обратных задач теплопроводности определяются искомые теплофизические параметры материала [7].

Аналитические методы обладают рядом преимуществ, включая относительную простоту и возможность получения оценочных решений на ранних этапах проектирования. Однако их применение ограничено сложностью реальной геометрии конструкций и необходимостью учитывать большое количество факторов, таких как тепловое излучение, конвекция и локальные источники нагрева/охлаждения.

3. Численные методы теплового анализа композитных конструкций

С развитием вычислительной техники широкое распространение получили численные методы моделирования тепловых процессов, прежде всего метод конечных элементов (МКЭ или FEM). Этот подход позволяет

анализировать температурные поля в конструкциях сложной формы и учитывать анизотропные свойства материалов [8].

Метод конечных элементов применяется для решения как стационарных, так и нестационарных задач теплопроводности. При этом композитная структура может моделироваться различными способами: в виде эквивалентного анизотропного материала или с явным учётом специфики отдельных слоёв композитного пакета.

Одним из важных преимуществ численного моделирования является возможность учитывать реальные условия эксплуатации конструкций, включая:

- тепловое излучение;
- конвективный теплообмен;
- Тепловое взаимодействие между элементами конструкции;
- Неизотермичность свойств материалов.

В работах, посвящённых моделированию композитных элементов космических конструкций, показано, что точность тепловых расчётов существенно зависит от корректности исходных данных по теплофизическим свойствам материалов. Недостаточная точность этих данных может приводить к значительным ошибкам при прогнозировании температурного состояния конструкций [9].

Численные методы также широко применяются для анализа тепловых процессов в сборных композитных конструкциях, содержащих механические соединения. Наличие болтовых соединений приводит к локальным неоднородностям температурного поля и может существенно влиять на распределение температур и напряжений в конструкции [10].

Современные программные комплексы позволяют выполнять сопряжённые расчёты, в которых одновременно учитываются тепловые и механические воздействия на элементы конструкции. Такой подход особенно важен для анализа термо-напряжённого состояния композитных конструкций, работающих в условиях переменных температурных нагрузок.

4. Экспериментальные методы исследования теплофизических свойств композитов

Несмотря на широкое использование численных методов, экспериментальные исследования остаются важнейшим этапом теплового анализа композитных конструкций. Экспериментальные данные необходимы для определения теплофизических характеристик материалов, а так же верификации расчётных моделей [11].

Одним из перспективных направлений является разработка экспериментальных методик определения коэффициента теплопроводности материалов непосредственно на элементах конструкций. В таких экспериментах используется локальный нагрев образца с одновременным измерением температурных полей при помощи термопар или инфракрасных датчиков.

В ряде работ описаны экспериментальные установки, позволяющие проводить испытания композитных элементов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Например, тепловые испытания могут проводиться как при атмосферных условиях, так и в вакуумных камерах, что особенно важно для космических конструкций [7].

При проведении таких экспериментов большое значение имеет оценка неопределённости измерений. На точность определения теплофизических параметров могут влиять следующие факторы:

- погрешности измерения температуры;
- неопределённость коэффициентов теплоотдачи;
- влияние теплового излучения;
- неоднородность структуры композитного материала.

Поэтому экспериментальные данные, как правило, обрабатываются с использованием методов решения обратных задач теплопроводности, позволяющих определить искомые параметры материала на основе измеренных температурных полей.

5. Заключение

Проведённый анализ литературных источников показывает, что тепловой расчёт композитных элементов конструкций является сложной многопараметрической задачей, требующей учёта анизотропии материалов, температурной зависимости физических свойств и особенностей теплового взаимодействия элементов конструкции.

Аналитические методы позволяют получить оценочные решения и используются на ранних этапах проектирования, однако их применение ограничено сложностью реальных конструкций. Численные методы, прежде всего метод конечных элементов, обеспечивают более точное моделирование тепловых процессов и позволяют учитывать достаточно сложные геометрические и эксплуатационные условия.

Экспериментальные исследования остаются важным инструментом для определения теплофизических характеристик композитов и проверки корректности расчётных моделей. Наиболее перспективным является комплексный подход, сочетающий аналитические методы, численное моделирование и экспериментальную верификацию результатов.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на разработку более точных моделей теплопереноса в анизотропных композитных материалах и совершенствование методов экспериментального определения их теплофизических свойств.

Список литературы

1. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // Progress in Aerospace Sciences. – 2005. – Vol. 41. – P. 143–151.
2. Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W. Composite Materials: Design and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2003. – 580 p.
3. Wang B., Zhong S., Lee T. L. Non-destructive testing and evaluation of composite materials and structures // Composites Part B. – 2020. – Vol. 200.

4. Kaw A. Mechanics of Composite Materials. – Boca Raton: CRC Press, 2006.
5. Gibson R. Principles of Composite Material Mechanics. – Boca Raton: CRC Press, 2016.
6. Лобанов Д. С., Зубова Е. М. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020.
7. Резник, С. В. Постановка и результаты тепловых испытаний элементов композитных стержневых космических конструкций / С. В. Резник, О. В. Денисов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2008. – № 4(73). – С. 81-89. – EDN JXLLMN.
8. Oskouei R. H., Soutis C. Finite element analysis of composite structures // Aeronautical Journal. – 2016.
9. Najafi, Ali. “Failure Analysis of Composite Bolted Joints in Tension.” 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2009. doi:10.2514/6.2009-2505.
10. McCarthy C. T., McCarthy M. A. Design and failure analysis of composite bolted joints // Polymer Composites in the Aerospace Industry. – 2019.
11. Camanho P. P., Matthews F. L. A progressive damage model for composite laminates // Journal of Composite Materials, 33, 2248-2280. – 1999.