

УДК 539.3

Численное исследование температурных полей в тонкостенных конструкциях на основе конечно-элементного анализа

Лобачев Валерий Павлович

val4562820@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена трехмерная задача линейной теории упругости и термоупругости для математической модели конструкции, состоящей из наборов разных типов и пластин. С помощью отечественного и зарубежного программных комплексов численно исследуется влияние давления и конвективного теплообмена на тонкостенную конструкцию. Проведено сравнение результатов моделирования. Показано, что наличие внешнего давления и температурного режима при численном моделировании в различных комплексах конечно-элементного анализа приводит к малым погрешностям в результатах. С учетом полученных данных сделано заключение о возможности применения отечественной среды многомасштабного моделирования для решения подобных задач.

Ключевые слова: моделирование элементов конструкций, слоистые композиционные материалы, численное моделирование, конечные элементы, конвективный теплообмен, эффективные характеристики композитов, линейная теория термоупругости

Numerical study of temperature fields in thin-walled structures based on finite-element analysis

Lobachev Valerii Pavlovich

val4562820@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A three-dimensional problem of the linear theory of elasticity and thermoelasticity is considered for a mathematical model of a structure consisting of ribs of different types and plates. The influence of pressure and convective heat transfer on a thin-walled structure is numerically investigated using national and foreign software systems. The simulation results are compared. It is shown that the presence of external pressure and temperature conditions during numerical modeling in various finite element analysis complexes leads to small errors in the results. Based on the data obtained, a conclusion is made about the possibility of using the national multiscale modeling environment to solve such problems.

Keywords: modeling of structural elements, layered composite materials, numerical modeling, finite elements, convective heat exchange, effective characteristics of composites, linear theory of thermoelasticity

Введение. В современной инженерии композиционные материалы играют важную роль из-за своих уникальных свойств. Данные материалы широко применяются при производстве авиационной техники и летательных аппаратов. Наиболее широкое применение в современном самолетостроении нашли композиты на основе углеродных волокон, особенностью которых является их

высокая прочность, находящаяся наравне с прочностью титана, и чаще всего, применяются для изготовления сильно- и средненагруженных конструкций [1]. Однако при использовании композиционных материалов в конструкциях, работающих при высоких температурах, могут возникать сложности, связанные с изменением их механических свойств при нагреве. Нагрев может серьезно повлиять на эффективные характеристики композиционных материалов. В связи с этим, такие изменения могут привести к деформациям, напряжениям и даже разрушению конструкций, что требует подробного и глубокого анализа, а также моделирования поведения подобных материалов. Целью настоящей работы является численное исследование деформированных состояний и температурных полей тонкой конструкции из ортотропного слоистого композиционного материала в различных средах многомасштабного моделирования.

Материалы и методы. Рассматриваемый элемент конструкции представляет собой тонкую пластину из слоистого тканевого композиционного материала (рис. 1). Общие размеры конструкции: длина 10 см, ширина 5 см и толщина 5 мм. Для нервюр, которые находятся между пластин, используется материал титан. Общая толщина конструкции h постоянна. В качестве характерного размера L выберем длину конструкции. Пусть $\frac{h}{L} \ll 1$.

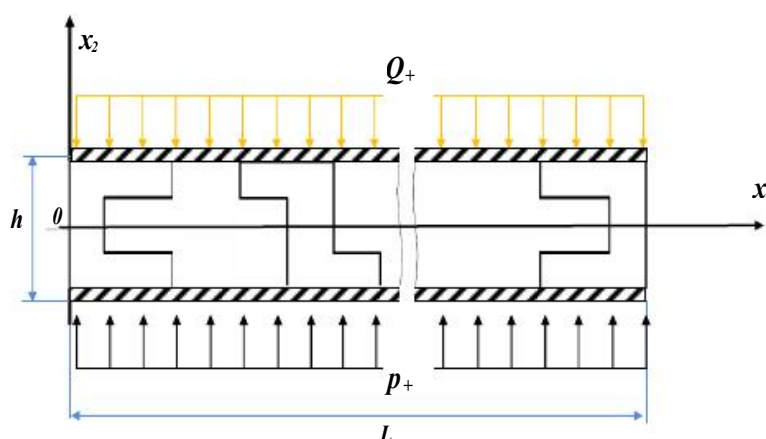


Рис. 1. Конструкция из слоистого тканевого композиционного материала

Общая постановка рассматриваемой задачи линейной теории термоупругости для тонкой композитной конструкции с температурно-зависящими свойствами представлена следующей системой, состоящей из пяти уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0; \\ \sigma_{ij} = C_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^T); \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \\ C \frac{\partial \theta(x)}{\partial t} = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}; \\ q_i = -\lambda_{ij} \frac{\partial \theta(x)}{\partial x_j}. \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; x_j — глобальные координаты; C_{ijkl} — компоненты тензора модулей упругости четвертого ранга 4C ; ε_{ij} — компоненты тензора малых деформаций; ε_{ij}^θ — компоненты тензора тепловой деформации; u_i — компоненты вектора перемещений; C — теплоемкость; λ_{ij} — компоненты тензора теплопроводности; θ — температура; t — время; q_i — плотность теплового потока.

Система (1) включает в себя уравнение равновесия, обобщенный закон Гука, соотношения Коши, нестационарное уравнение теплопроводности и закон Фурье. На поверхности раздела слоев пластины выполняются условия идеального контакта. Торцы будем считать теплоизолированными. Тогда граничные условия на верхней плоскости пластины Σ_{2+} , на торцевой поверхности Σ_T будут иметь следующий вид:

$$p_{22} = \text{const}; \quad u_i|_{\Sigma_{x=0}} = 0; \quad Q_+ = \alpha(\theta - \theta_0)S. \quad (2)$$

Для системы (1) предполагаем, что на расстояниях порядка h изменения теплового потока и давления малы.

Результаты. Для численного решения были использованы следующие комплексы конечно-элементного анализа: Ansys и Manipula/SMCM — разработка научно-образовательного центра «Симплекс» и кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана [2]. Для проведения расчетов была смоделирована упрощенная конструкция элемента крыла в программном комплексе SOLIDWORKS. При решении поставленной задачи были использованы специализированные модули в соответствующих средах многомасштабного моделирования. На непосредственных этапах вычисления были использованы встроенные генераторы сеток программных комплексов, которые проводили разбиение разными типами (линейный и квадратичный) и размерами конечного элемента (0,005; 0,003; 0,002; 0,001; 0,0008 м). Для всех комплексов был использован один и тот же метод разбиения на конечные элементы — тетраэдрами. При моделировании были взяты следующие числовые значения, с учетом [3, 4], для граничных условий (2): $p_{22} = 250000$ Па — давление; $\alpha = 350 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$ — коэффициент теплообмена; $\theta_0 = 300$ К — начальная температура; $\theta = 500$ К — конечная температура. В результате были получены следующие график-зависимости (рис. 2–4).

Общее время воздействия процесса конвективного теплообмена на исследуемую тонкую конструкцию составляло 30 секунд. Результаты генерации различных типов сеток стремились соответствовать требованиям [5]. Для анализа результатов не учитывались зависимости по осям OX и OZ в связи с тем, что результаты свидетельствовали об определении нулевого значения (машинного нуля) и малой информативностью. На представленных график-зависимостях (рис. 2–4) легенда имеет структуру: комплекс конечно-элементного анализа (Ansys, Manipula, Manipula+Ansys) — тип разбиения (L — линейный; Q — квадратичный). Обозначение Manipula+Ansys в легенде

подразумевает, что при численном решении в программном комплексе Manipula/SMCM была использована сторонняя сетка, сгенерированная в среде многомасштабного моделирования Ansys.

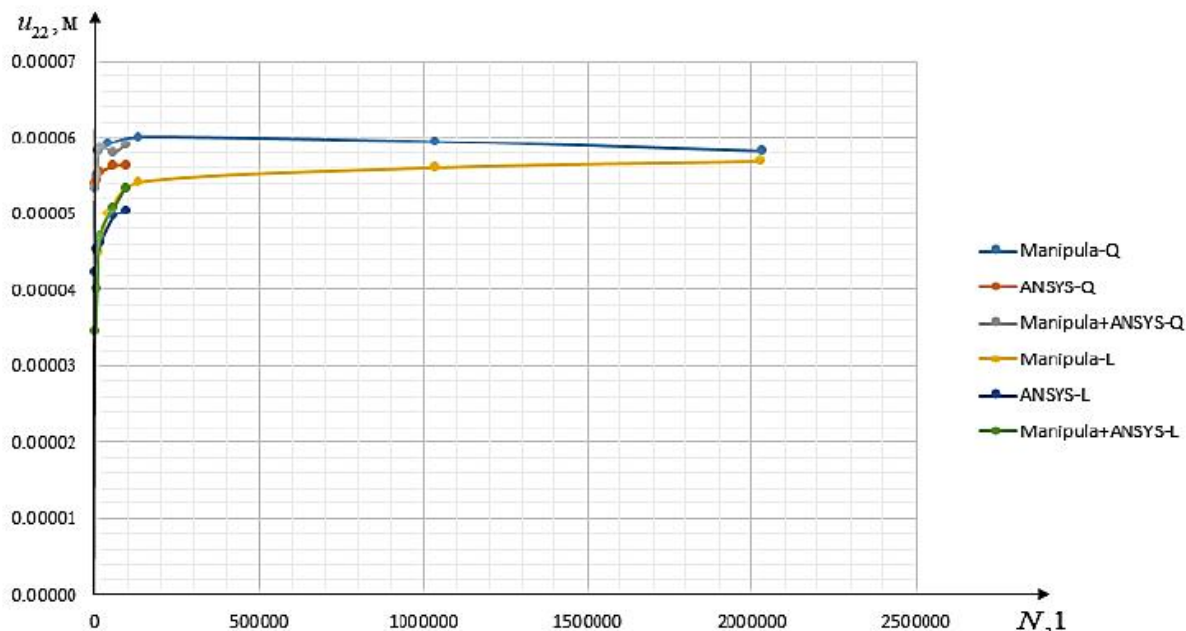


Рис. 2. Зависимость перемещения по оси OY от количества конечных элементов N до воздействия температурных полей

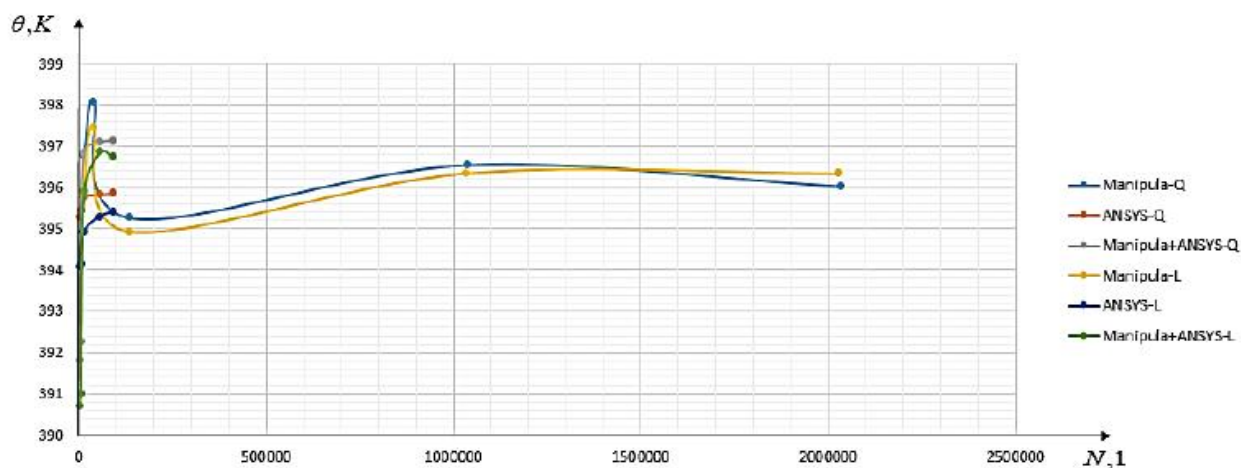


Рис. 3. Зависимость температуры θ от количества конечных элементов N

Обсуждение полученных результатов. Результаты расчетов показали, что перемещения по оси OY u_{22} до воздействия температурных полей (рис. 2) принимают близкие значения относительно друг друга, несмотря на большее количество конечных элементов в сетке. При анализе рис. 3 можно говорить о том, что результаты значения температур также находятся в допустимом диапазоне относительно друг друга. Результаты расчетов по перемещению

по оси OY u_{22}^{θ} после воздействия температурных полей (рис. 4) показывают существенные различия при использовании разных программных комплексов и типов сетки. Можно предположить, что такие отличия возможны из-за использования разных численных методов и методов решения систем уравнений или ошибки округления и аппроксимации, которые могут накапливаться и влиять на конечные результаты.

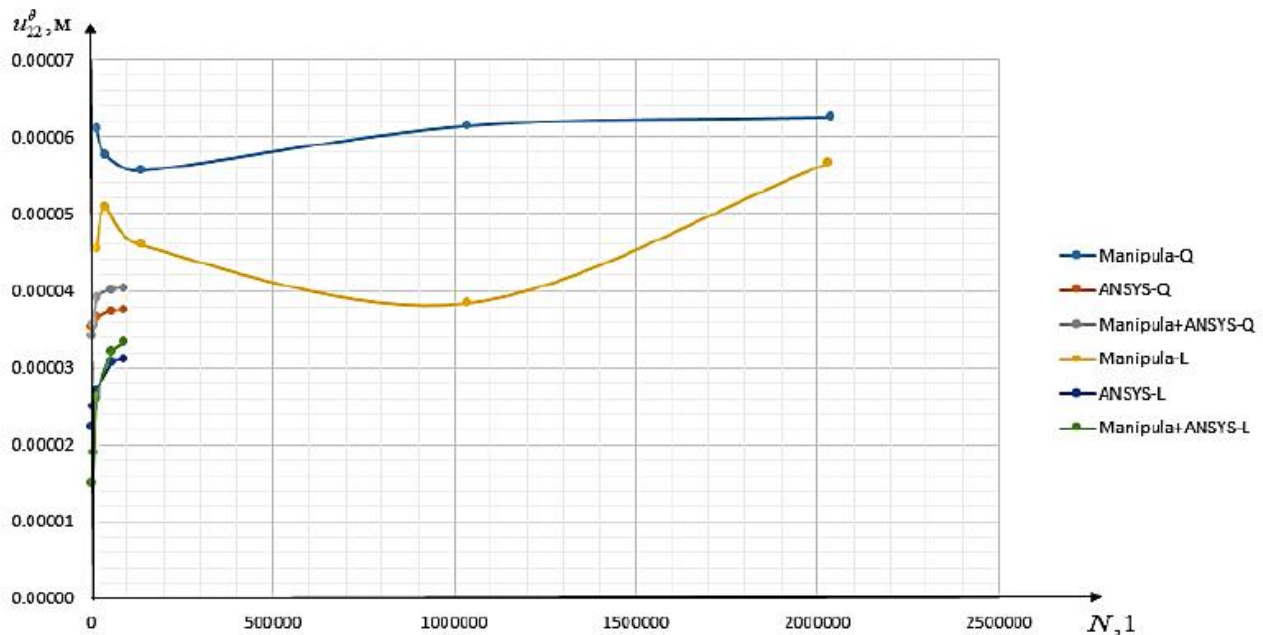


Рис. 4. Зависимость перемещения по оси OY от количества конечных элементов N после воздействия температурных полей

Закключение. Проведено численное исследование термоупругих характеристик многослойного композиционного материала при воздействии температурных полей, показывающие работоспособность разработанных математических моделей и численных алгоритмов в отечественной среде многомасштабного моделирования Manipula/SMCM. Высказаны предположения относительно возможных причин расхождений в некоторых полученных результатах. Результаты исследования могут быть использованы при анализе новых композиционных материалов с улучшенными термоупругими характеристиками в отечественном программном комплексе, что актуально для применения в авиационной и космической отраслях.

Список источников

- [1] Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2012, т. 14, № 4 (2), с. 1–4.
- [2] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Сборщиков С.В. *Многомасштабное моделирование упругопластических композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024, 228 с.

- [3] Победря Б.Е. *Механика композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГУ, 1984, 336 с.
- [4] Дмитриенко Ю.И. *Механика композиционных материалов при высоких температурах*. Москва, Машиностроение, 1997, 368 с.
- [5] ГОСТ Р 57700.10–2018. *Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области*. Москва, Стандартинформ, 2018.