

Структурно-функциональный анализ как основа проектирования структуры массоэффективных силовых элементов конструкций из композиционных материалов

П.В. Соловьев¹, Ю.С. Первушин¹, В.С. Жернаков¹, А.В. Ахмедьянов¹
¹ ФГБОУ ВО «УУНиТ», Уфа

В данной работе рассматривается применение структурно-функционального анализа (СФА) в качестве основного инструмента для проектирования структуры силовых элементов конструкций из композиционных материалов. Сформированные в результате СФА структуры обеспечивают удельную несущую способность композитных конструкций, близкую к максимальной. Практическое применение метода продемонстрировано на слоистой композитной пластине, закрепленной консольно и испытывающей сложное нагружение в виде косоугольного изгиба с кручением. Полученная в результате СФА структура пластины превосходит стандартные и подобранные исходя из типовых рекомендаций структуры с точки зрения несущей способности и жесткости.

Structural&functional analysis as a basis for designing the structure of mass-efficient load-bearing elements of constructions made of composite materials

P.V. Solovyev¹, Y.S. Pervushin¹, V.S. Zhernakov¹, A.V. Akhmedyanov¹
¹ FSBEE HE "UUST", Ufa, Russia

In this paper, we consider the use of structural-functional analysis (SFA) as the main tool for designing the structure of load-bearing elements of constructions made of composite materials. The structures formed as a result of SFA provide the specific bearing capacity of composite structures close to the maximum. The practical application of the method is demonstrated on a layered composite plate fixed as a cantilever and subjected to complex loading in the form of an oblique bending with torsion. The resulting plate structure after SFA outperforms typical and standardized structures in terms of load-bearing capacity and stiffness.

1. Введение

Применение композиционных материалов в авиационных конструкциях обусловлено их высокими удельными механическими характеристиками – в первую очередь удельной прочностью и удельной жесткостью, – а также направленной анизотропией механических свойств, что позволяет уменьшить массу конструкции при достижении требуемой несущей способности.

Тем не менее, вопрос выбора структуры композита, включающей в себя количество слоев и их углы укладки, не имеет однозначного ответа из-за геометрического многообразия форм композитных изделий и большого количества сочетаний нагрузок, действующих на них.

Несмотря на имеющиеся на данный момент вычислительные мощности, включая суперкомпьютеры, решение задачи подбора структуры композита методом перебора всех возможных вариантов даже для 10-15-слойного изделия занимает достаточно много времени, наиболее массивные композитные изделия, например, лонжероны лопастей вертолета, включают

в себя более 100 слоев, таким образом делая задачу выполнимой исключительно на квантовых компьютерах следующего поколения.

В связи с этим разработка методики направленного поиска структуры композита в зависимости от его геометрии и характера действующих нагрузок, требующей адекватных временных затрат, является актуальной задачей, обладающей практической значимостью.

2. Методы и материалы

В классической и современной технической литературе, связанной с расчетом и проектированием изделий из композиционных материалов [1–5], имеются рекомендации для выбора структуры изделий конкретных типов (лопатка, пластина, балка и др.), однако при сложном напряженно-деформированном состоянии применимость данных рекомендаций существенно сужается. Суть структурно-функционального анализа заключается в том, чтобы с помощью метода конечных элементов выявить направления главных напряжений в слоях изделия и

произвести выкладку армирующей компоненты с учетом этих направлений.

Первоначальное количество слоев может быть определено исходя из аналитических формул сопротивления материалов без учета слоистости и анизотропии композита либо на основе уже имеющегося прототипа. В дальнейшем количество слоев может быть скорректировано исходя из нагруженности каждого слоя при послойном анализе прочности.

Таким образом, на первом этапе проектирования выкладка слоев осуществляется квазиизотропным материалом, имеющим упругие характеристики, близкие к элементарной композитной ячейке со структурой укладки 0/45/90/-45. Определяются направления главных напряжений в каждом из слоев композита.

Далее производится выкладка слоями уже требуемого ортотропного однонаправленного композита с учетом направлений главных напряжений.

Если основной целевой функцией является максимизация жесткости, то достичь этого можно с помощью выкладки всех слоев в соответствии с направлениями главных напряжений, что было продемонстрировано в работах [6–7].

При выборе наибольшей несущей способности в качестве целевой функции вышеупомянутая структура обычно не дает значимых результатов, требуется другая структура композита, наиболее приближенная к ортотропной [7]. Истинно ортотропную структуру с симметрией физико-механических характеристик слоев относительно срединной поверхности изделия можно получить только для тел с относительно простой геометрией (балки, пластины и т.д.).

После такой выкладки необходимо повторно проверить направления главных напряжений, и, в случае существенного их отклонения от первоначально полученных данных ($\geq 3^\circ$), скорректировать выкладку и вновь оценить результаты. Обычно требуется не более 2–3 итераций для достижения совпадения углов укладки слоев с углами главных напряжений в них в пределах требуемой точности ($< 3^\circ$).

Если на данном этапе выясняется, что минимальный коэффициент запаса прочности в слоях изделия RF_{\min} не попадает в рекомендованный диапазон значений 2,0...3,0, то требуется соответствующая корректировка числа слоев изделия (уменьшение числа слоев при $RF_{\min} \geq 3$ и наоборот) и повтор всех предыдущих шагов.

Последним шагом данного метода является поворот всего слоистого пакета на $\pm 5^\circ$ с повторной оценкой жесткости и несущей способности слоев

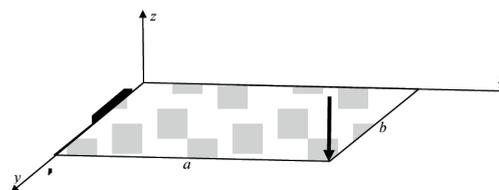


Рис. 1. Схема нагружения пластины

композита. В случае ухудшения НДС принимается решение о том, что искомая структура композита была достигнута. В случае улучшения НДС требуется корректировка углов укладки и повторное проведение предыдущих шагов.

Параллельно производится сравнение результатов напряженного и деформированного состояния полученной структуры с типовыми структурами укладки композита (например 0, 0/90, 0/45/90/-45, 45/0/-45 и др.), а также структурами, полученными исходя из предыдущего опыта проектирования подобных деталей или из имеющихся в технической литературе рекомендаций. Если полученная структура превосходит все остальные, то она окончательно принимается для данного изделия при данных качественных и количественных нагрузках.

Рассмотрим практическое применение структурно-функционального анализа для подбора структуры консольно закрепленной слоистой композитной пластины с габаритами 200×100 мм при косом изгибе с кручением под действием силы $F = 10$ Н, приложенной на свободном углу пластины (рис. 1). Количество слоев пластины – 9. Толщина слоя – 0,15. Материал слоя – углепластик на основе препрега с продольным модулем упругости $E_1 = 121$ ГПа.

Полученная в программном комплексе ANSYS Workbench конечно-элементная модель пластины представлена на рис. 2. Для создания композитной выкладки и анализа результатов применялись модули ANSYS ACP Pre/Post.

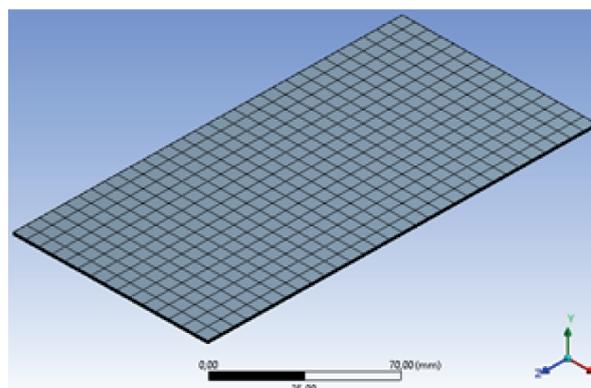


Рис. 2. Конечно-элементная слоистая модель пластины

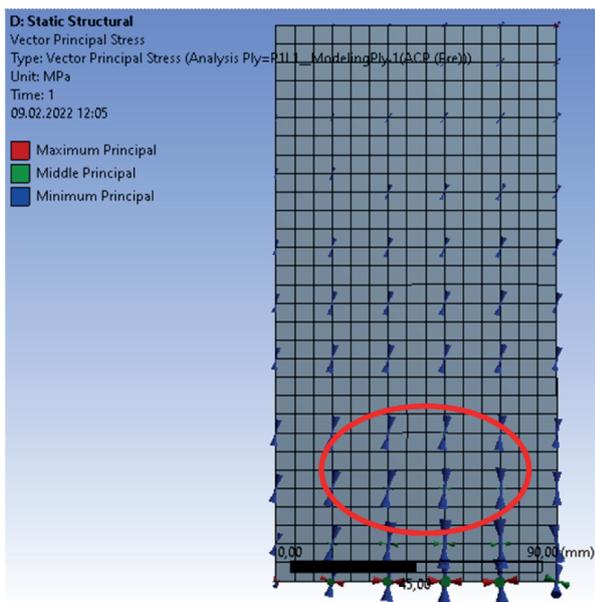


Рис. 3. Направления главных напряжений в 1-м (нижнем) слое пластины

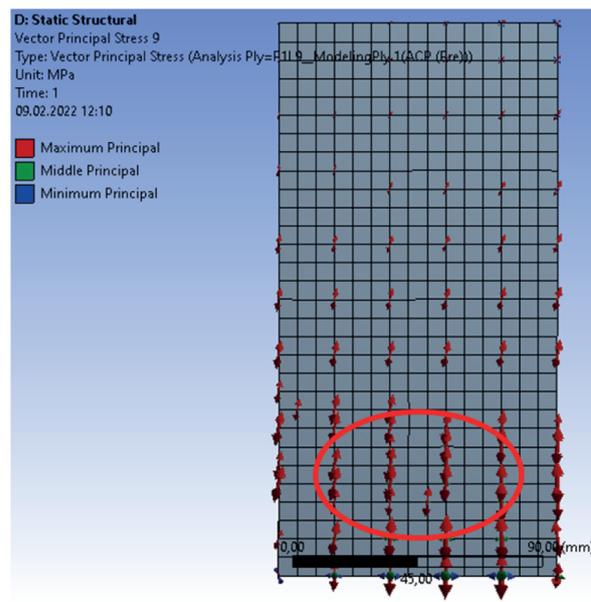


Рис. 5. Направления главных напряжений в 9-м (верхнем) слое пластины

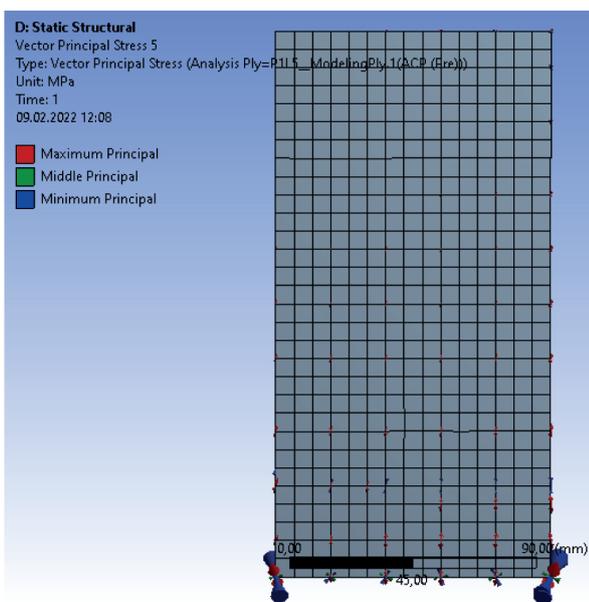


Рис. 4. Направления главных напряжений в 5-м (среднем) слое пластины

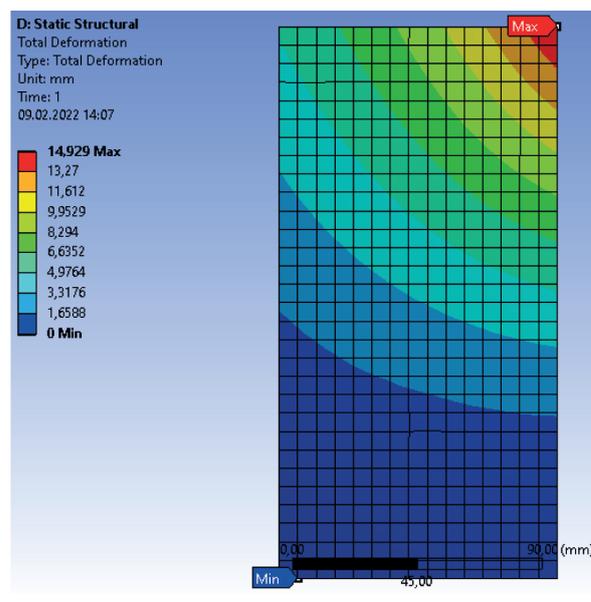


Рис. 6. Картина распределения деформаций пластины при выкладке по главным напряжениям

3. Обсуждение и результаты

На рис. 3 – 5 представлены направления главных напряжений в характерных слоях пластины.

Направления главных напряжений по всем слоям сведены в таблицу 1. Углы отсчитываются относительно продольной оси пластины. Знак «-» обозначает направление по часовой стрелке при взгляде на пластину сверху.

Распределение деформаций и коэффициентов запаса прочности по слоям согласно критерию Цая-

Хилла при выкладке слоев в направлении действия главных напряжений представлены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

В результате всех расчетов согласно вышеуказанной методике СФА была получена ортотропная структура пластины с углами укладки $(-14/14)_2/0/(-14/-14)_2$, которая имеет наивысшую несущую

Таблица 1. Направление главных напряжений в слоях пластины

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол главных напряжений,	-7	-7	-7	-8	-8	-8	-9	-9	-9

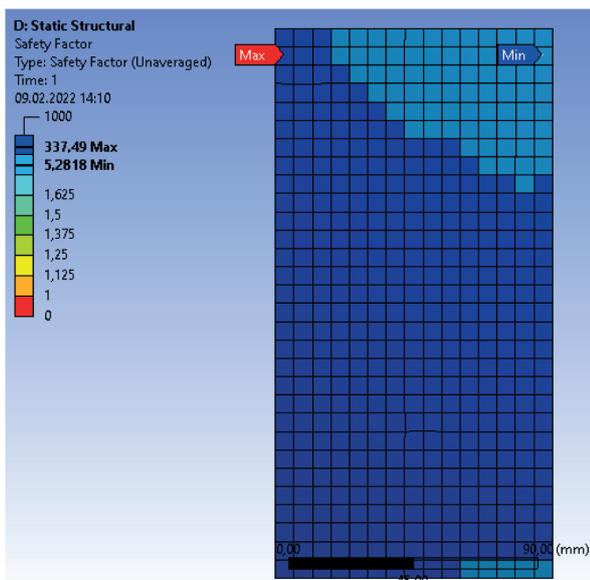


Рис. 7. Картина распределения коэффициентов запаса прочности слоев пластины при выкладке по главным напряжениям

способность по отношению ко всем остальным и на 112% лучше по отношению к однонаправленной структуре (0)₉. С точки зрения жесткости лучшей оказалась структура с выкладкой по главным напряжениям (-7)₃/(-8)₃/(-9)₃, превзошедшую однонаправленную структуру по жесткости на 25%, а выбранную ортотропную структуру на 3%, однако по несущей способности структура с выкладкой по главным напряжениям хуже выбранной ортотропной на 42%.

4. Заключение

Таким образом, структурно-функциональный анализ (СФА) представляет собой упорядоченную методику и инструмент для подбора структуры композитной конструкции в зависимости от ее геометрии и характера действующих нагрузок. Подобранная

структура удовлетворяет выбранным в ходе поиска критериям (максимизация несущей способности, жесткости и др.) и в целом обеспечивает максимально эффективное использование жесткости и несущей способности армирующих волокон композита.

Список использованных источников

- [1] Веселов С.И., Карташов Г.Г. Композиционные материалы в авиадвигателестроении: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – 122 с.
- [2] Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1978. 192 с.
- [3] Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
- [4] Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с., ил.
- [5] Михайлин, Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике : учебное пособие / Ю. А. Михайлин. — Санкт-Петербург : НОТ, 2013. — 720 с. — ISBN 978-5-91703-037-1.
- [6] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С. Функциональный анализ морфологии структуры и напряженного состояния конструкций из композиционных материалов. Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2019. Т.23, №4 (86). – С. 18–25.
- [7] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С. Формирование структуры пера композитной вентиляторной лопадки ГТД на основе функционального анализа. Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2020. Т.24, №4 (90). – С. 76–83.

Примечание: Орфография и пунктуация авторов сохранены без изменений и дополнений.