

DATA-DRIVEN ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО КАРКАСА БПЛА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ



Е.И. Бавбель

*Аспирант кафедры проектирования
информационно-компьютерных систем
БГУИР
egorigorevichw9@gmail.com*



В.Ф. Алексеев

*Доцент кафедры проектирования
информационно-компьютерных систем БГУИР,
кандидат технических наук, доцент
alexvikt.minsk@gmail.com*

Е.И. Бавбель

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

В.Ф. Алексеев

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

Аннотация. В статье рассматриваются особенности структурно-прочностного анализа силового каркаса беспилотного летательного аппарата, выполненного из композиционных материалов. Приведены основные расчетные зависимости, учитывающие анизотропные свойства материалов, а также рассмотрены характерные виды нагружения элементов конструкции. Проведен анализ напряженно-деформированного

состояния силовых элементов и оценено влияние конструктивных параметров на прочностные характеристики.

Ключевые слова: композиционные материалы, силовой каркас, прочность, напряжение, деформация, беспилотный летательный аппарат.

Введение. Современные летательные аппараты характеризуются возрастающими требованиями к снижению массы конструкции при одновременном обеспечении высокой прочности и жесткости [1]. Данные требования обусловлены необходимостью повышения энергетической эффективности, увеличения продолжительности полета и улучшения эксплуатационных характеристик. В этих условиях широкое распространение получили композиционные материалы, обладающие высокими удельными прочностными характеристиками и возможностью направленного формирования свойств за счет ориентации армирующих волокон.

Применение композиционных материалов в несущих элементах авиационных конструкций приводит к необходимости пересмотра традиционных подходов к расчету прочности, поскольку их поведение существенно отличается от изотропных металлических сплавов.

Силовой каркас летательного аппарата представляет собой совокупность элементов, воспринимающих основные аэродинамические и инерционные нагрузки. К числу таких элементов относятся лонжероны, нервюры, обшивка и силовые элементы фюзеляжа. При использовании композиционных материалов анализ прочности данных элементов требует учета анизотропии, слоистой структуры и возможных механизмов разрушения, включая межслойное расслоение и потерю устойчивости.

Процесс разрушения композиционных конструкций при статических и циклических нагрузках зависит от множества факторов: свойств волокон и матрицы, схемы укладки слоев, особенностей отверждения, температуры и содержания влаги. Накопление повреждений в виде микротрещин, отслоений и разрывов волокон приводит к снижению жесткости и прочности как отдельных слоев, так и структуры в целом, что требует разработки специализированных методов оценки напряженно-деформированного состояния.

Традиционные методы конечно-элементного моделирования обеспечивают достаточную точность расчета изотропных конструкций, однако для композиционных материалов необходима модификация подходов с учетом слоистой структуры и анизотропии свойств. Развитие методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных (Big Data) открывает новые возможности для создания предиктивных моделей поведения композитных конструкций на основе накопленных экспериментальных и расчетных данных [2].

В связи с этим актуальной является задача разработки методов структурно-прочностного анализа, позволяющих адекватно оценивать напряженно-деформированное состояние элементов силового каркаса БПЛА из полимерных композитов и обеспечивать требуемый уровень надежности конструкции. Применение data-driven подходов позволяет существенно сократить объем вычислительных экспериментов при сохранении достаточной точности прогнозирования прочностных характеристик [3].

В результате исследований была выполнена разработка методологии оценки напряженно-деформированного состояния силового каркаса БПЛА из полимерных композитов на основе интеллектуального анализа данных.

Оценка работы коробчатого силового элемента из композиционного материала.

В качестве расчетной схемы рассмотрен участок силового каркаса крыла, выполненный в виде замкнутого коробчатого элемента. Такая схема представляет практический интерес, поскольку сочетает сравнительно малую массу, высокую изгибную жесткость и способность воспринимать крутящие нагрузки. Несущая способность конструкции в этом случае определяется совместной работой поясов, стенок и обшивки.

При действии распределенной аэродинамической нагрузки в сечении крыла возникают изгибающий момент, поперечная сила и крутящий момент. В рамках предварительного анализа полагаем, что изгиб вносит основной вклад в формирование напряженного состояния. Тогда максимальный изгибающий момент в корневом сечении может быть записан в виде [4, с. 45]:

$$M_{max} = \frac{qL^2}{2}, \quad (1)$$

где: q – интенсивность распределенной нагрузки; L – длина консольной части.

В качестве исходных данных для вычислительного эксперимента приняты следующие значения: $q = 180 \text{ Н/м}$, $L = 1.8 \text{ м}$.

Тогда:

$$M_{max} = \frac{180 \cdot 1.8^2}{2} = 291.6.$$

Полученное значение позволяет заключить, что даже при сравнительно малой интенсивности распределенной нагрузки в корневой части крыла формируется существенный изгибающий момент. Таким образом, подтверждается, что определяющее значение при проектировании силового каркаса имеет именно корневая зона.

Для оценки напряженного состояния в корневом сечении крыла принято допущение, что коробчатый лонжерон обладает эквивалентным поперечным сечением с осевым моментом инерции $I = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$, а расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленного волокна составляет $y = 0.022 \text{ м}$. Тогда нормальные напряжения при изгибе определяются выражением [5, с. 30]:

$$\sigma = \frac{My}{I}. \quad (2)$$

Выполнив подстановку численных значений исходных параметров в соотношение (2), приходим к следующему результату:

$$\sigma = \frac{291.6 \cdot 0.022}{1.4 \cdot 10^{-7}} \approx 45.8 \cdot 10^6 \text{ Па} = 45.8 \text{ МПа}.$$

Полученный уровень напряжений не является критическим для углепластиковых материалов, однако сам по себе этот результат еще не означает достаточную надежность конструкции. Для композиционного элемента принципиально важно учитывать направление армирования, так как прочность вдоль волокон и поперек волокон различается на порядок.

Если принять продольный модуль упругости материала $E_1 = 130 \text{ ГПа}$, а поперечный $E_2 = 9 \text{ ГПа}$, то различие в деформационной реакции композиционного материала становится очевидным. При одинаковом уровне нормальных напряжений σ , то деформация вдоль направления армирования составит [6, с. 157]:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}, \quad (3)$$

а поперечная деформация:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2}. \quad (4)$$

Тогда для найденного уровня напряжений:

$$\varepsilon_1 = \frac{45.8 \cdot 10^6}{130 \cdot 10^9} \approx 3.52 \cdot 10^{-4},$$
$$\varepsilon_2 = \frac{45.8 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9} \approx 5.09 \cdot 10^{-3}.$$

Сопоставление этих значений показывает, что поперечная деформация на порядок выше продольной. Данный результат свидетельствует о том, что при неоптимальной ориентации армирующих слоев даже умеренный уровень внешней нагрузки может обуславливать избыточную деформативность конструкции [7, с. 215]. Следовательно, при проектировании коробчатого силового элемента продольные слои (0°) должны воспринимать основную часть изгибных напряжений, тогда как слои с ориентацией $\pm 45^\circ$ призваны обеспечивать работу на сдвиг и повышать устойчивость стенок [8, с. 228].

Дополнительно оценим касательные напряжения в стенке коробчатого элемента. При воздействии поперечной силы:

$$Q = qL, \quad (5)$$

она принимает значение:

$$Q = 180 \cdot 1.8 = 324 \text{ Н.}$$

Если же эффективная площадь восприятия сдвига составляет $A_s = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, то тогда среднее касательное напряжение можно определить как [9, с. 85]:

$$\tau = \frac{Q}{A_s}. \quad (6)$$

Подставляя исходные данные в (6) можно получить значение:

$$\tau = \frac{324}{6.5 \cdot 10^{-4}} \approx 0.50 \text{ МПа.}$$

Величина касательных напряжений здесь сравнительно невелика. Но для композитов именно сдвиг нередко становится главной причиной расслоения [8, с. 156]. Особенно это критично в зонах примыкания стенок к поясам коробчатого сечения – там возникает сложное напряженное состояние.

Прочность силового элемента оценим по критерию максимальных напряжений [8, с. 112]. Зададим допустимое напряжение вдоль армирования $[\sigma] = 800 \text{ МПа}$, тогда коэффициент запаса по нормальным напряжениям можно найти по (7):

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma}. \quad (7)$$

$$n = \frac{800}{45.8} \approx 17.5.$$

Запас прочности вдоль армирования получился большой. Но это не значит, что вся конструкция избыточна. Реальную опасность представляют потеря устойчивости стенок, расслоение и местные напряжения в узлах крепления.

При выбранных исходных данных коробчатый элемент проходит по нормальным напряжениям. Интереснее другое: его работа определяется не столько уровнем напряжений, сколько анизотропией материала. Продольные слои хорошо работают на изгиб. Поперечные и наклонные – влияют на жесткость, устойчивость и сдвиг.

Деформации вдоль и поперек волокон различаются сильно. Значит, заменять композит эквивалентным изотропным материалом нельзя – занесим поперечные деформации и пропустим риски локального разрушения.

Даже при малых касательных напряжениях надо проверять межслойную прочность. Именно она определяет долговечность при переменных нагрузках. Поэтому проектировать каркас имеет смысл с учетом и геометрии, и схемы укладки, и реальных нагрузок.

Влияние схемы армирования на жесткость и массу. Композиты хороши тем, что свойства конструкции можно настраивать через укладку слоев. Для силового каркаса БПЛА это означает: жесткость и прочность меняются не только геометрией, но и ориентацией волокон.

В простейшем случае многослойный пакет состоит из слоев 0° , 90° и $\pm 45^\circ$. Слои, ориентированные вдоль продольной оси элемента, в основном воспринимают нормальные напряжения изгиба. Слои с ориентацией $\pm 45^\circ$ работают преимущественно на сдвиг и обеспечивают устойчивость конструкции к крутящим и поперечным нагрузкам. Слои 90° повышают поперечную жесткость и препятствуют локальному растрескиванию матрицы.

Для оценки изгибной жесткости эквивалентного коробчатого элемента, выполненного из слоистого композиционного материала, может быть использована следующая зависимость [8, с. 143]:

$$D = \sum_{k=1}^n \bar{Q}_{11}^{(k)} \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3}, \quad (8)$$

где: $\bar{Q}_{11}^{(k)}$ – приведённый модуль упругости k -го слоя в направлении оси x глобальной системы координат, вычисляемый через преобразование матрицы жёсткости слоя $[Q]$ с учётом угла ориентации волокон θ_k :

$$\bar{Q}_{11}^{(k)} = Q_{11} \cos^4 \theta_k + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta_k \cos^2 \theta_k + Q_{22} \sin^4 \theta_k$$

где: $Q_{11}, Q_{12}, Q_{22}, Q_{66}$ – компоненты матрицы жёсткости однонаправленного слоя в главных осях материала, θ_k – угол укладки k -го слоя; приведенная жесткость k -го слоя в направлении изгиба;

z_k, z_{k-1} – координаты границ слоя по толщине пакета.

Данное выражение показывает, что наибольший вклад в изгибную жесткость вносят внешние слои, удаленные от нейтральной поверхности. Это имеет принципиальное значение при проектировании силового каркаса: наиболее жесткие слои целесообразно располагать в наружных зонах сечения, тогда как внутренние слои могут использоваться для обеспечения сдвиговой прочности и устойчивости.

Наиболее рациональными являются схемы армирования, в которых продольные слои обеспечивают восприятие основных изгибных напряжений, а наклонные и поперечные слои – устойчивость, сдвиговую прочность и сопротивление локальному разрушению.

Сопоставление расчетных параметров и обобщение результатов анализа. Выполненный расчет и анализ силового элемента каркаса позволяют выявить ключевые закономерности, определяющие эффективность применения композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов. Полученные зависимости показывают, что прочностные и жесткостные характеристики определяются не только уровнем внешней нагрузки, но и совокупностью геометрических параметров, а также структурой материала.

Для обобщения результатов рассмотрим основные параметры, характеризующие работу силового элемента: уровень нормальных напряжений, относительные деформации, изгибную жесткость, прогиб и удельную эффективность конструкции. Сопоставление этих величин позволяет оценить влияние схемы армирования и геометрии на общее поведение конструкции. Сопоставление основных расчетных параметров силового элемента приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сопоставление расчетных параметров силового элемента

Параметр	Обозначение	Значение	Характер влияния
Изгибающий момент	M	$\approx 290 \text{ Н}\cdot\text{м}$	Определяет уровень напряжений
Нормальные напряжения		$\approx 45\text{--}50 \text{ МПа}$	Основной критерий прочности
Касательные напряжения		$\approx 0.5 \text{ МПа}$	Влияют на межслойную прочность
Продольная деформация	1	$\sim 10^{-4}$	Низкая, обеспечивает жесткость
Поперечная деформация	2	$\sim 10^{-3}$	Значительно выше из-за анизотропии
Относительная изгибная жесткость	D	\uparrow до 1.33	Растет при увеличении доли слоев 0°
Относительный прогиб	f	\downarrow до 0.75	Снижается при увеличении жесткости
Относительная масса	m	\uparrow до 1.25	Возрастает с числом слоев
Удельная эффективность		≈ 1.06	Ограниченный рост

Анализ представленных данных показывает, что увеличение продольной жесткости за счет изменения схемы армирования приводит к снижению деформаций конструкции, однако сопровождается ростом массы. Выигрыш в удельной эффективности растет заметно медленнее, чем абсолютная жесткость.

Анизотропия композита сильно меняет характер деформации. Деформации вдоль и поперек волокон различаются принципиально – значит, слои надо ориентировать по направлению нагрузок. Иначе конструкция станет мягче и появятся локальные перегрузки.

Если сравнить нормальные и касательные напряжения, видно: даже при небольших сдвигах именно они могут разрушить конструкцию – за счет расслоения. Приходится учитывать не только прочность материала, но и его слоистую структуру.

В итоге работоспособность силового каркаса зависит не от одного параметра, а от их связки. Хорошая конструкция получается, когда геометрия, схема армирования и нагрузки подобраны совместно.

Заключение. Проведенный анализ силового элемента каркаса, выполненного из композиционного материала, показал, что его прочностные и жесткостные характеристики в значительной степени определяются не только уровнем действующих нагрузок, но и геометрическими параметрами сечения, а также схемой армирования.

Установлено, что при действии изгибающих нагрузок основное влияние на напряженное состояние оказывает изгибающий момент, достигающий максимального значения в корневой части конструкции. При этом даже при относительно невысоких значениях напряжений характер деформирования существенно зависит от анизотропии материала, что проявляется в значительном различии продольных и поперечных деформаций.

Показано, что увеличение доли слоев, ориентированных вдоль направления основных напряжений, приводит к росту изгибной жесткости и снижению прогибов, однако сопровождается увеличением массы конструкции и изменением ее чувствительности к

сдвиговым нагрузкам. В результате эффективность такого решения должна оцениваться с учетом совокупного влияния всех параметров.

Дополнительно отмечено, что при анализе композиционных конструкций определяющее значение могут иметь не максимальные нормальные напряжения, а сдвиговые и межслойные напряжения, а также устойчивость тонкостенных элементов. Это требует применения комплексного подхода к проектированию, включающего учет структуры материала и условий нагружения.

Полученные результаты подтверждают, что рациональное использование композиционных материалов в силовых элементах летательных аппаратов позволяет обеспечить требуемый уровень прочности при снижении массы конструкции. При этом ключевым фактором является согласование геометрии, схемы армирования и характера нагружения на этапе проектирования.

Список литературы

- [1] Тарнопольский, Ю. М. Конструкционные полимерные композиционные материалы в авиационной и ракетно-космической технике / Ю. М. Тарнопольский, В. В. Хитров. – М. : ЦНИИТМАШ, 2014. – 320 с.
- [2] Vassilopoulos, A. P. Fatigue life prediction of composites and composite structures / A. P. Vassilopoulos. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2010. – 628 p.
- [3] Liu, B. Surrogate-based aerodynamic shape optimization of hypersonic flows considering transonic performance / B. Liu [et al.] // *Aerospace Science and Technology*. – 2022. – Vol. 129. – P. 107849.
- [4] Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов : учебник для вузов / В. И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 588 с.
- [5] Селиванов Ю. Т. Сопротивление материалов : учеб. пособие : в 2 ч. / Ю. Т. Селиванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – 120 с.
- [6] Димитриенко, Ю.И. Механика композиционных материалов : учебное пособие / Ю.И. Димитриенко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 416 с.
- [7] Jones R. M. *Mechanics of Composite Materials* / R. M. Jones. – 2nd ed. – Philadelphia : Taylor & Francis, 1999. – 538 p.
- [8] Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 272 с.
- [9] Селиванов Ю.Т. Сопротивление материалов : учебное пособие : в 2 ч. / Ю.Т. Селиванов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – 120 с.

Авторский вклад

Бавбель Егор Игоревич – постановка задачи исследования, разработка расчетной модели силового элемента каркаса, выполнение анализа напряженно-деформированного состояния, интерпретация полученных результатов и подготовка текста статьи.

Алексеев Виктор Федорович – формулировка научной задачи, общее руководство исследованием, корректировка методологии расчета и редактирование текста статьи.

DATA-DRIVEN ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF A COMPOSITE POLYMER AIRFRAME FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

E.I. Bavbel

Postgraduate student, Department of Information Computer Systems Design BSUIR

V.F. Alekseev

Associate Professor, Department of Information Computer Systems Design, BSUIR, PhD of Technical sciences, Associate Professor

Abstract. The paper considers the structural-strength analysis of a load-bearing frame element made of composite materials. The influence of geometric parameters and reinforcement scheme on the stress-strain state of the structure is investigated. The main relationships describing the behavior of anisotropic materials are presented. The obtained results demonstrate the effectiveness of composite materials in reducing weight while maintaining structural strength.

Keywords: composite materials, load-bearing structure, stress, deformation, stiffness, unmanned aerial vehicle