

УДК 629.7.023.4

*Хонг Фонг Нгуен¹, В. И. Бирюк^{1,2}*¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского

Исследования по оптимизации конструктивно-силовой схемы самолета с прямым крылом из композиционных материалов

В работе рассмотрено крыло беспилотного летательного аппарата из композиционных материалов. Исследована возможность снижения расчетных нагрузок на крыло за счет использования анизотропии композиционного материала. Проведены исследования для различных вариантов анизотропии и получены оптимальные соотношения углов ориентации композиционных слоев. Применены различные критерии прочности композиционной обшивки и проведено сравнение оптимальных вариантов.

Ключевые слова: оптимизация, композиционные материалы, конструктивно-силовая схема, прямое крыло, кессон крыла, беспилотный самолет.

1. Введение

В настоящее время авиационные конструкторы уделяют внимание созданию беспилотных летательных аппаратов. Для этих летательных аппаратов характерным является малая скорость и большое время барражирования в воздухе, исчисляемое сутками. Это приводит к необходимости значительного уменьшения веса конструкции. Одним из способов снижения веса является использование композиционных материалов. Они обладают существенно меньшим удельным весом. Однако в настоящее время композиционные материалы имеют ряд недостатков, снижающих эффект от их применения. К недостаткам относятся значительная хрупкость, слабая эксплуатационная живучесть (ударные воздействия) и влияние климатических факторов на снижение свойств композиционных материалов. Поэтому при использовании композиционных материалов эффект от их применения снижается за счет уменьшения допускаемых напряжений, что приводит к росту веса конструкции. Анизотропные свойства конструкции из композиционных материалов уже использовались при создании самолетов с крылом обратной стреловидности. Эти свойства позволяют, связав изгиб крыла с кручением, минимизировать деформации, влияющие на нагрузки. Для крыла обратной стреловидности использование анизотропных свойств композиционного материала позволило бороться с таким явлением аэроупругости, как дивергенция. Беспилотные летательные аппараты имеют, как правило, прямое крыло большого удлинения, в котором не действует положительный эффект прямой стреловидности для снижения расчетных моментов от уменьшения углов атаки концевых сечений за счет упругости. Использование автоматических систем снижения нагрузок в этих аппаратах тоже затруднено из-за отсутствия необходимых органов управления. В работе проведено исследование влияния анизотропии на распределение углов крутки прямого крыла за счет изгиба и найдено оптимальное распределение ориентации монослоев композиционного материала. Показано, что выбор оптимальной ориентации позволяет использовать анизотропию в качестве пассивной и практически бесплатной системы снижения расчетных нагрузок при деформации за счет оптимальной связи деформаций изгиба с деформациями кручения.

2. Постановка задачи

Если моделировать упругие свойства крыла большого удлинения балкой с прямой осью жесткости, то коэффициент подъемной силы равен

$$C_y = C_y^\alpha (\alpha + \Delta\alpha),$$

где в случае стреловидного крыла самолета приращение угла атаки поточного сечения крыла за счет упругости определяется следующим образом [1]:

$$\Delta\alpha = \theta \cos \chi - w' \sin \chi. \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое отвечает за кручение, а второе – за изгиб конструкции крыла. И за счет этого второго слагаемого для прямой стреловидности крыла угол атаки поточного сечения уменьшается. Для беспилотного аппарата чаще всего применяется прямое крыло, при котором изгиб крыла не изменяет поточный угол атаки, и это приводит к тому, что угол атаки за счет упругости не уменьшается, соответственно при деформациях крыло не сбрасывает нагрузку с концов. В данной статье предлагается использовать анизотропные свойства композиционного материала для рациональной связи изгиба крыла и кручения при нагружении, что позволяет уменьшить угол атаки, перераспределить нагрузку по размаху крыла, чтобы уменьшить изгибающий момент за счет перемещения центра давления к борту крыла и минимизировать вес конструкции.

2.1. Моделирование кессона

В работе был рассмотрен кессон крыла большого удлинения беспилотного аппарата и проведено его исследование с использованием комплексной программы MSC/Patran и MSC/Nastran при моделировании кессона крыла методом конечных элементов [2].

Данный кессон жестко закреплен по корневой хорде и находится под действием равномерной нагрузки (рис. 1).

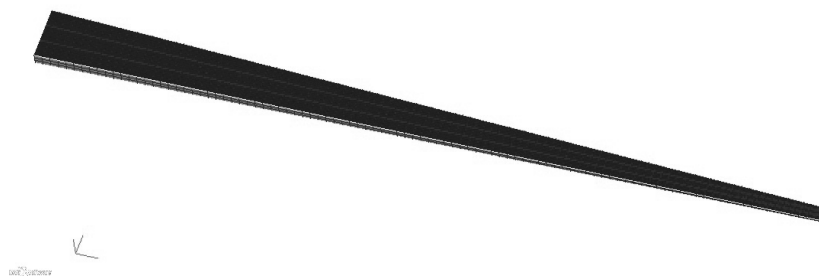


Рис. 1. Модель кессона прямого крыла самолета

Кессон состоит из компонентов: пояса лонжеронов, стенки лонжеронов, нервюры, стрингеры, обшивки. Пояса лонжеронов моделируются стержневым элементом (Rod). Стенки лонжеронов и нервюры моделируются плоским элементом (Shell), Стрингеры – изгибным элементом (Beam), имеющим прямоугольное поперечное сечение. Обшивки моделируется элементом (Shell).

3. Материалы

В работе были использованы алюминиевый сплав и композиционный материал, характеристики которых представлены ниже.

Алюминиевый сплав:

- модуль упругости: 70 000 Н/мм²,
- плотность: $2.7 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³,
- модуль сдвига: 25 000 Н/мм²,
- коэффициент Пуассона: 0.3.

Композиционный материал:

- модуль упругости вдоль направления волокна: $181\,000\text{ Н/мм}^2$,
- модуль упругости в перпендикулярном направлении волокна: $10\,300\text{ Н/мм}^2$,
- модули сдвига: 7170 Н/мм^2 , 5000 Н/мм^2 , 7170 Н/мм^2 ,
- коэффициент Пуассона: 0.28 ,
- плотность: $1.6 \cdot 10^{-6}\text{ кг/мм}^3$,
- предельно допустимое напряжение растяжения: 1500 Н/мм^2 и 40 Н/мм^2 ,
- предельно допустимое напряжение сжатия: 1500 Н/мм^2 и 246 Н/мм^2 ,
- предельно допустимое сдвиговое напряжение: 68 Н/мм^2 .

Для всех случаев расчета кессон загружался равномерно распределенной нагрузкой, соответствующей расчетным значениям, то есть максимальная эксплуатационная нагрузка множилась на соответствующий коэффициент безопасности.

3.1. Критерии разрушения композита

Количество критериев разрушения композиционных материалов в сравнении с количеством критериев разрушения для металлов значительно выше, что объясняется анизотропией композитов, большим количеством видов и сложностью механики разрушения композитов. В поставленной задаче оптимизации углов ориентации композиционного материала для кессона крыла прямого удлинения исследовалось влияние выбранных критериев разрушения на результаты оптимизации.

В работе были применены три основных критерия разрушения композита для сравнения их эффективности: Хилл (Hill), Хоффман (Hoffman) и Тсай-Ву (Tsai Vu) [3].

4. Результаты расчетов

4.1. Обшивки из алюминиевого сплава

Обшивки кессона моделируются элементом shell. Обшивка (нижняя и верхняя) разделяется на 10 элементов по размаху (всего 20 элементов). Варьируя толщины каждого элемента, оптимизируется вес конструкции и анализируется распределение углов поворота поточного сечения кессона. Ограничение по напряжению 400 Н/мм^2 . В результате процесса оптимизации получены следующие результаты (рис. 2):

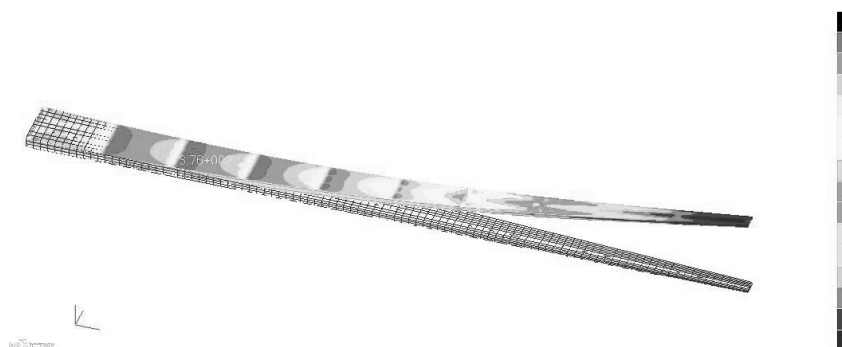


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние (НДС) кессона с обшивками из алюминиевого сплава

- минимальный вес конструкции: 61.2 кг ,
- максимальный прогиб: 3 м ,

- максимальное напряжение: 376 Н/мм^2 (рис. 3).

Распределение углов поворота в направлении увеличения угла атаки (на 1 градус) показано на рисунке 3.

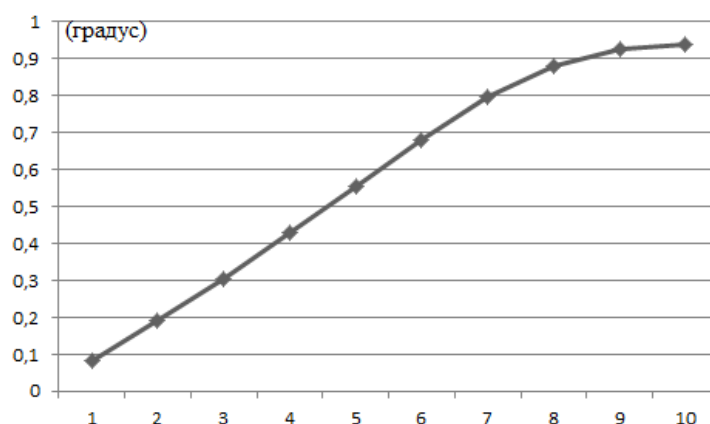


Рис. 3. Распределение углов поворота сечений кессона по размаху

Далее рассматривается обшивка кессона из композиционных материалов. Варьируются толщины каждого элемента, оптимизируется вес конструкции и анализируется распределение углов поворота поточных сечений кессона при различных углах ориентации волокон композита (от -40 до $+40$ градусов) и при использовании различных критериев разрушения композитов. Рассматривались как композиты из однонаправленных монослоев, так и композиты с квазиизотропной укладкой.

Ниже представлены координаты и положительный угол ориентации волокон композита для кессона (рис. 4).

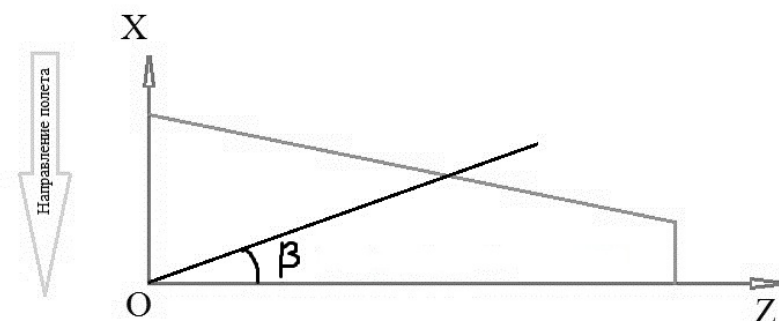


Рис. 4

4.2. Обшивки из однонаправленного композита с применением критерия Хилла

Ниже представлен результат оптимизации (рис. 5). Здесь верхняя линия соответствует случаю обшивки из алюминиевого сплава, а нижняя — композиту с углом ориентации волокон -30 градусов. В этом случае (рис. 6):

- вес конструкции: 39.13 кг ,
- прогиб: 2.17 м ,

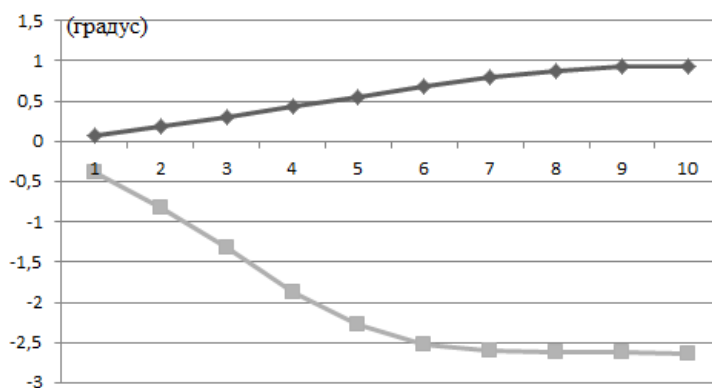


Рис. 5. Распределение углов поворота сечений кессона по размаху

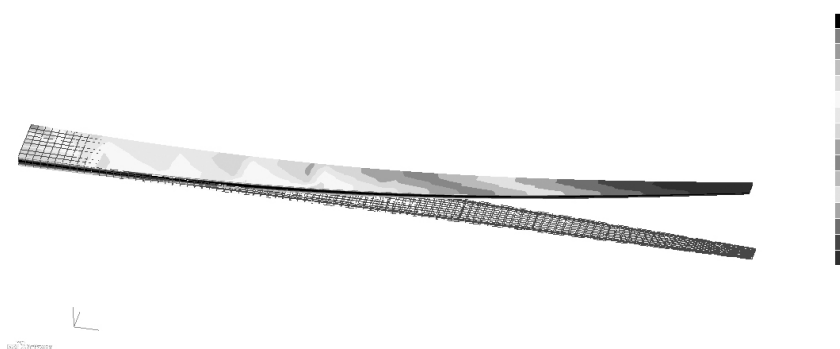


Рис. 6. НДС кессона с композиционными обшивками ориентации волокон минус 30°

- максимальное напряжение: 213 Н/мм².

4.3. Обшивки из однонаправленного композита с применением критерия Хоффмана

Результат оптимизации показывает, что при ориентации волокон -20 градусов угол поворота сечений конструкции будет оптимальным (-3.3 градусов) (рис. 7).

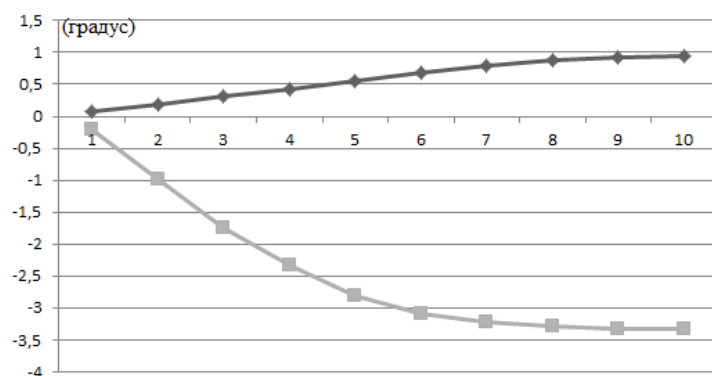


Рис. 7. Распределение углов поворота сечений кессона по размаху

Здесь верхняя линия соответствует случаю обшивки из алюминиевого сплава, а нижняя – композиту с углом ориентации волокон -20 градусов. В этом случае (рис. 8):

- вес конструкции: 39.12 кг,
- прогиб: 2.12 м,
- максимальное напряжение: 271 Н/мм².



Рис. 8. НДС кессона с композиционными обшивками ориентации волокон минус 20°

4.4. Обшивки из однонаправленного композита с применением критерия Тсай-Ву

Результат оптимизации показывает, что при ориентации волокон -2 градусов, угол поворота сечений конструкции будет оптимальным (-3.92 градусов) (рис. 9).

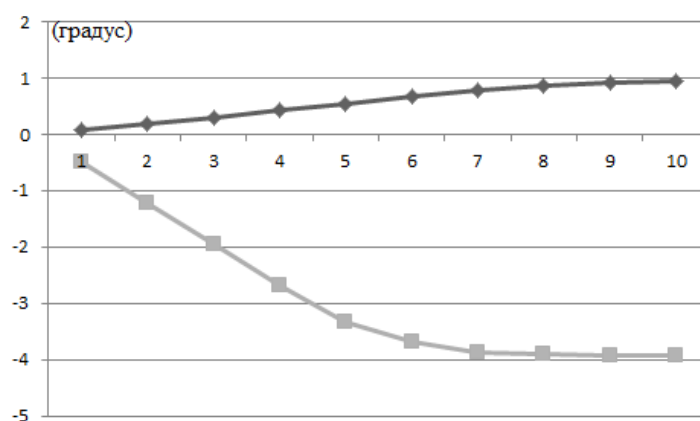


Рис. 9. Распределение углов поворота сечений кессона по размаху

Здесь верхняя линия соответствует случаю обшивки из алюминиевого сплава, а нижняя – композиту с углом ориентации волокон минус 20 градусов. В этом случае (рис. 10):



Рис. 10. НДС кессона с композиционными обшивками ориентации волокон минус 20

- вес конструкции: 39.12 кг,
- прогиб: 2.18 м,
- максимальное напряжение: 334 Н/мм².

4.5. Сравнительный результат для обшивки из однонаправленного композита

На рисунках 11–12 показаны сравнительные результаты по распределению углов и по весам конструкции при применении различных критериев (рис. 11).

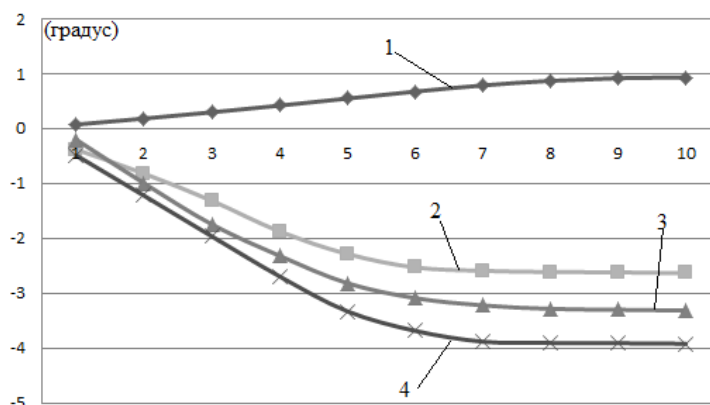


Рис. 11. Распределения углов поворота сечений кессона по размаху в разных случаях: 1 — обшивки из алюминиевого сплава, 2 — обшивки из композита с применением критерия Хилла, 3 — обшивки из композита с применением критерия Хоффмана, 4 — обшивки из композита с применением критерия Тсай-Ву

Вес конструкции кессона крыла уменьшается на 36% при переходе от обшивок из алюминиевого сплава к обшивкам из композиционного материала (рис. 12). Это известный факт, утверждающий преимущество композитов перед традиционными материалами. Причем использование различных критериев прочности практически не меняет результата по весу при оптимизации. Более интересный и важный результат заключается в том, что, несмотря на одинаковую тенденцию закручивания крыла в направлении уменьшения углов атаки при применении разных критериев разрушения композита, если оптимальный угол ориентации волокон для критерия Хилла -30° , то для других критериев Тсай-Ву и Хоффмана — -20° . Распределения углов закручивания также отличаются в 1,5 раза по максимальным значениям.

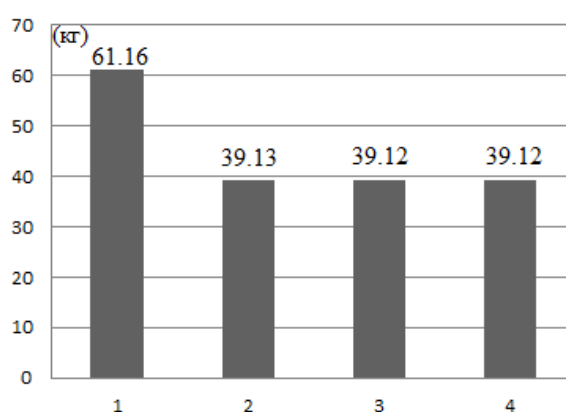


Рис. 12. Вес конструкции в разных случаях: 1 — обшивки из алюминиевого сплава, 2 — обшивки из композита с применением критерия Хилла, 3 — обшивки из композита с применением критерия Хоффмана, 4 — обшивки из композита с применением критерия Тсай-Ву

Теперь рассмотрим композиционную обшивку, традиционно используемую в типовых конструкциях. Число слоев составляет 10, исходная ориентация волокон $0/45/0/90/0/-45/0/45/0/-45$, то есть 50% слоев под 0° , 20% — под 45° , 20% — под -45° и 10% — под

90°. Исследование по оптимизации было проведено аналогично выше сказанному, различие заключается в том, что меняется угол ориентации (от минус 40 до 40°) только у тех слоев, которые изначально были под 0° и ограничение по напряжению будет 400 Н/мм², как для квазиизотропного материала.

4.6. Сравнительный результат для квазиизотропной обшивки

На рисунках 13–14 показаны сравнительные результаты по распределению углов и по весам конструкции для различных критериев (рис. 13).

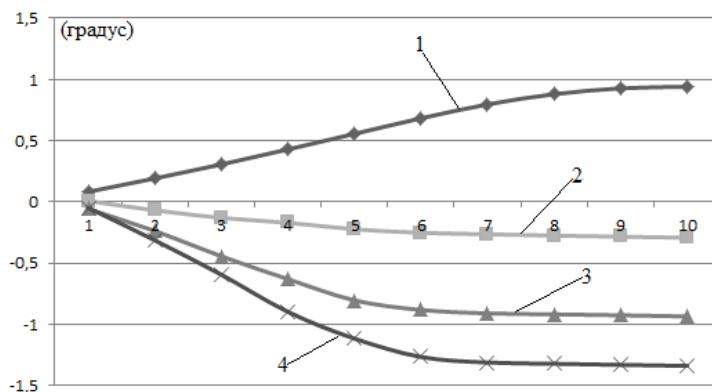


Рис. 13. Распределения углов поворота сечений кессона по размаху в разных случаях: 1 — обшивки из алюминиевого сплава, 2 — обшивки из композита с применением критерия Хилла, 3 — обшивки из композита с применением критерия Хоффмана, 4 — обшивки из композита с применением критерия Тсай-Ву

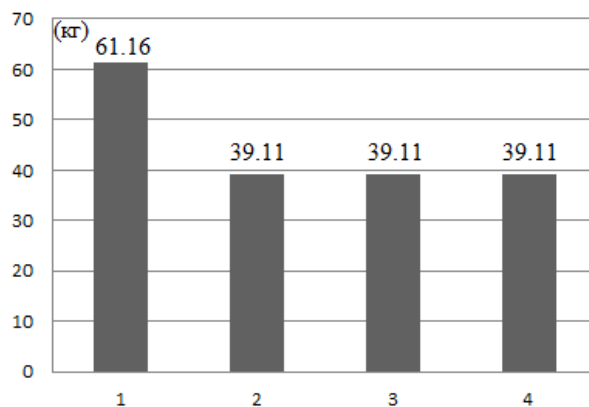


Рис. 14. Вес конструкции в разных случаях: 1 — обшивки из алюминиевого сплава, 2 — обшивки из композита с применением критерия Хилла, 3 — обшивки из композита с применением критерия Хоффмана, 4 — обшивки из композита с применением критерия Тсай-Ву

Из графика видно, что углы поворота сечений конструкции при применении критерия Тсай-Ву самые большие по абсолютным значениям, то есть кессон максимально закручивается в отрицательном направлении и угол атаки уменьшается, однако эффект от закручивания меньше, чем для монослойных структур.

Как и в случае однонаправленного композита, вес конструкции с квазиизотропной изначальной структурой композиционных обшивок на 36% меньше, чем для кессона из алюминиевого сплава, а оптимизация с использованием трех различных критериев приводит практически к одному результату (рис. 14).

5. Выводы

1. Проведенное исследование показывает, что для прямого крыла большого удлинения, которое, как правило, применяется для беспилотных летательных аппаратов, использование анизотропии композиционных обшивок позволяет закрутить крыло в направлении снижения нагрузок. Это является дополнительным фактором снижения веса конструкции, поскольку для беспилотных летательных аппаратов с большой продолжительностью полета требование снижения веса является наиболее критическим.
2. Для рассмотренного кессона крыла при углах ориентации волокон в композиционных обшивках от -20 до -30° (для однонаправленного композита) и от -35 до -40° (для квазиизотропного композита) в зависимости от применяемых критериев угол поворота конструкции будет оптимальным. Здесь надо иметь в виду, что для квазиизотропного композита меняются ориентации волокон только у тех слоев, которые изначально были под углом 0° , ориентация волокон других слоев сохраняется.
3. Применение трех различных критериев разрушения композитов: Хилла, Хоффмана и Тсай-Ву приводит практически к одинаковым результатам по весу. Но, несмотря на одинаковую тенденцию закручивания крыла в направлении уменьшения углов атаки при применении разных критериев разрушения композита, различие в распределении углов кручения и их величинах дает основание для проведения детальных экспериментальных исследований на конструктивных образцах с целью глубокого изучения этого вопроса.

Литература

1. *Дмитриев В.Г., Чижов В.М.* Основы прочности и проектирование силовой конструкции летательных аппаратов. — М.: ЦАГИ, 2005. — 416 с.
2. *Рыбников Е.К., Володин С.В., Соболев Р.Ю.* Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC.Patran–Nastran. Часть I. Учебное пособие. — М.: МИИТ, 2003. — 131 с.
3. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988. — 271 с.

Поступила в редакцию 29.04.2013.