

УДК 621

doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-13

Исследование влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений в композиционных материалах лопастей квадрокоптеров

Е. Д. Карташова

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

katrina89@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Совершенствование конструкций, расширение номенклатуры и увеличение объемов производства квадрокоптеров являются устойчивыми мировыми трендами. В конструкциях квадрокоптеров используются прогрессивные технические решения, новые материалы, современная микроэлектроника. В силовых элементах квадрокоптеров широкое применение находят композиционные материалы. Так, для производства лопастей используют полимерные слоистые композиционные материалы (ПСКМ). Использование новых материалов требует развития методов расчетов изделий из них. Целью работы является анализ влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений, результаты которого учитываются во время оптимизации при проектировании лопастей квадрокоптеров, изготавливаемых из ПСКМ. *Материалы и методы.* В качестве исследуемых выбраны ПСКМ, состоящие из тканевых слоев углеродных волокон. При разработке методики использованы методы механики композитов, методы механики деформируемого твердого тела, методы оптимального проектирования. *Результаты.* Подготовлена методика исследования влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений, результаты которого учитываются во время оптимизации при проектировании лопастей квадрокоптеров, изготавливаемых из ПСКМ. Содержание методики раскрывается на примере. *Выводы.* Уровень нагруженности лопасти квадрокоптера определяется величиной номинальных нагрузок, проектными значениями характеристик сопротивления композита деформированию и их разбросом. Технологическими дефектами, оказывающими влияние на формирование статистических полей напряжений, являются отклонения толщины и массы, пористость, а также отклонение углов укладки тканевых слоев. В рамках методики проектирования основными решаемыми задачами являются анализ чувствительности и многокритериальная оптимизация, кроме того, необходимо провести оценку робастности.

Ключевые слова: полимерные слоистые композиционные материалы, тканый слой, лопасть, квадрокоптер, прочность, жесткость, оптимальное проектирование, математическая модель материала, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Карташова Е. Д. Исследование влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений в композиционных материалах лопастей квадрокоптеров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 173–185. doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-13

Research of the influence of technological defects on the reinforcement of statistical stress fields in composite materials of quadcopter blades

© Карташова Е. Д., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

E.D. Kartashova

Penza State University, Penza, Russia

katrina89@yandex.ru

Abstract. *Background.* Improving designs, expanding the range and increasing the production of quadcopters are stable global trends. Progressive technical solutions, new materials, modern microelectronics are used in the designs of quadcopters. Composite materials are widely used in power elements of quadcopters. So for the production of blades, polymeric layered composite materials are used. The use of new materials requires the development of calculation methods. The purpose of the research is to study the influence of technological defects on the formation of static stress fields, the results of which are used into account in the optimal design of quadcopter blades from polymer layered composite materials. *Materials and methods.* Polymer layered composite materials consisting of fabric layers of carbon fibers were selected as the studied ones. Methods of composite mechanics, methods of deformable solid mechanics, methods of optimal design were used in the development of the methodology. *Results.* A methodology has been prepared to study the effect of technological defects on the formation of statistical stress fields, the results of which are taken into account during optimization when designing blades of quadcopters made of polymer layered composite materials. The content of the methodology is revealed by an example. *Conclusions.* 1. The level of loading of the quadcopter blade is determined by the nominal loads, the design values of the characteristics of the resistance of the composite to deformation and their spread. 2. Technological defects have an affect on the formation of statistical stress fields. They are the deviation of thickness, mass and porosity, as well as the deviation of the laying angles of fabric layers. 3. The main tasks solved within the framework of the design methodology are sensitivity analysis, multicriteria optimization, robustness assessment.

Keywords: polymer layered composite materials, woven layer, blade, quadcopter, strength, rigidity, optimization, mathematical model of material, stress-strain state

For citation: Kartashova E.D. Research of the influence of technological defects on the reinforcement of statistical stress fields in composite materials of quadcopter blades. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(3):173–185. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-13

Введение

Совершенствование конструкций, расширение номенклатуры и увеличение объемов производства квадрокоптеров являются устойчивыми мировыми трендами. В конструкциях квадрокоптеров используются прогрессивные технические решения, новые материалы, современная микроэлектроника. В силовых элементах квадрокоптеров широкое применение находят композиционные материалы. Так, для производства лопастей используют полимерные слоистые композиционные материалы (ПСКМ). Использование новых материалов требует развития методов расчетов изделий из них. Методика проектирования изделий из ПСКМ существенно отличается от методики проектирования пластиковых лопастей, прежде всего большим количеством факторов, которые должны быть учтены при проектировании. Одним из таких факторов является появление в ПСКМ технологических дефектов. Целью работы является анализ влияния технологических дефектов на формирование статистических полей напряжений, результаты которого учитываются при оптимальном проектировании лопастей квадрокоптеров из ПСКМ.

При проектировании лопастей необходимо установить, с одной стороны, зависимости между их эксплуатационными и техническими характеристиками, а с другой – зависимости между техническими параметрами, характеристиками механических свойств и условиями эксплуатации. Компьютерные модели могут являться основой для установления этих связей. В работах [1–3] рассмотрены вопросы компьютерного моделирования изделий из ПСКМ.

При создании компьютерных моделей изделий из ПСКМ необходимо изучить, как влияют структуры материалов на их сопротивление деформированию и разрушению. В работах [4–6] рассмотрены вопросы создания моделей композиционных материалов.

При проектировании лопастей необходимо учитывать и технологию изготовления ПСКМ. Факторами, определяющими характеристики механических свойств ПСКМ и величину их разброса, являются технология изготовления и физико-механические характеристики компонентов. Величина разброса характеристик механических свойств определяется уровнем дефектности ПСКМ.

Работы [7–11] посвящены вопросам создания компьютерных моделей изделий из ПСКМ, в которых учитываются технологии их производства.

1. Конструкция лопасти квадрокоптера

В качестве примера рассмотрим типовую лопасть квадрокоптера, состоящую из оболочки 1 и цилиндрического крепления 2 (рис. 1). Оболочка имеет сложную пространственную форму. Толщина оболочки равна 0,4 мм. Крепление представляет собой полый цилиндр. Оно предназначено для правильного позиционирования оболочки, высоких нагрузок не несет и при моделировании не рассматривается. Прототип лопасти изготовлен из пластика.

Лопасть вращается с угловой скоростью $523,5 \text{ с}^{-1}$. На нижнюю поверхность лопасти действует давление 246 Па. Эти нагрузки считаются номинальными.

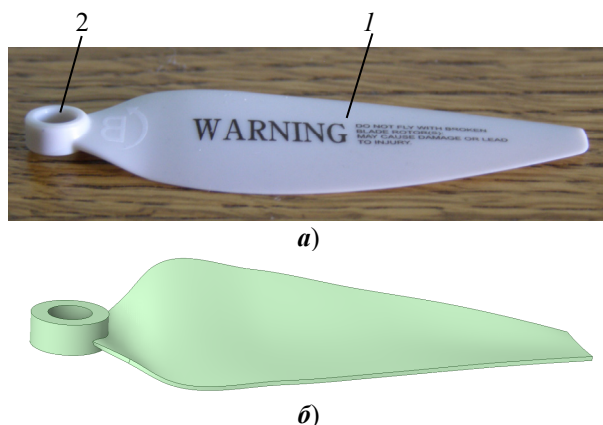


Рис. 1. Внешний вид (а) и геометрическая модель лопасти (б)

Оболочка проектируемой лопасти изготовлена из ПСКМ, состоящего из двух тканевых слоев. Каждый слой состоит из армирующего – углеродной ткани, и связующего – эпоксидной смолы.

Внешний вид тканевого слоя показан на рис. 2,*а*, геометрическая модель репрезентативной ячейки – на рис. 2,*б*.

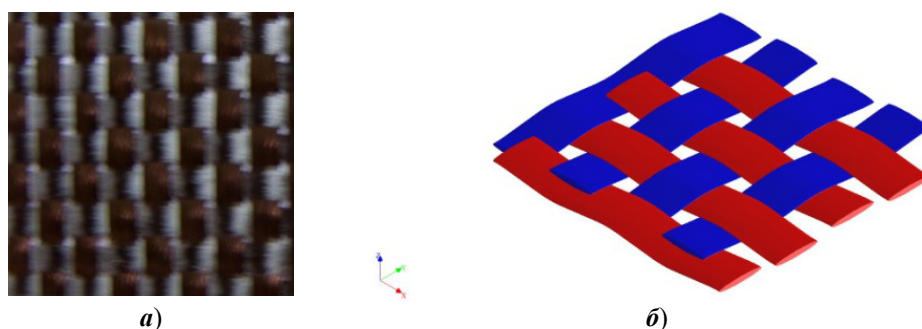


Рис. 2. Внешний вид тканевого слоя (*а*) и геометрическая модель (*б*) репрезентативной ячейки (без связующего)

Предполагается, что при изготовлении лопасти используется технология вакуумной инфузии. На характеристики сопротивления деформированию и разрушению, а также эксплуатационные свойства лопасти влияние оказывают следующие технологические дефекты: относительные отклонения массы и толщины, пористость, отклонения углов ориентации тканевых слоев. Определенные экспериментально статистические характеристики дефектности ПСКМ приведены в табл. 1 [7–9]. Гистограммы распределений характеристик технологических дефектов показаны на рис. 3.

Таблица 1
Статистическая характеристика дефектности ПСКМ

Характеристика дефектности ПСКМ	Статистическая характеристика	
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение
1. Относительное отклонение массы ПСКМ, %	$37,2 \pm 0,44$	2,0
2. Относительное отклонение толщины ПСКМ, %	$54,0 \pm 0,606$	2,85
3. Пористость ПСКМ, %	$10,95 \pm 0,37$	1,73
4. Отклонение углов ориентации тканевых слоев, град	$1,6 \pm 0,45$	3,4

По определенным экспериментально размерам репрезентативной ячейки (рис. 2,*а*), известным характеристикам физико-механических свойств компонентов (углеродных волокон и эпоксидной системы) так, как показано в работах [1–7], было осуществлено прогнозирование значений характеристик сопротивления деформированию тканевых слоев. При этом поведение тканевого слоя считалось упругим ортотропным. Значения упругих констант тканевого слоя приведены в табл. 2.

Проектные значения упругих констант соответствуют представлениям о тканевом слое как бездефектной структуре. При вычислении действительных значений учитывались перечисленные выше технологические дефекты.

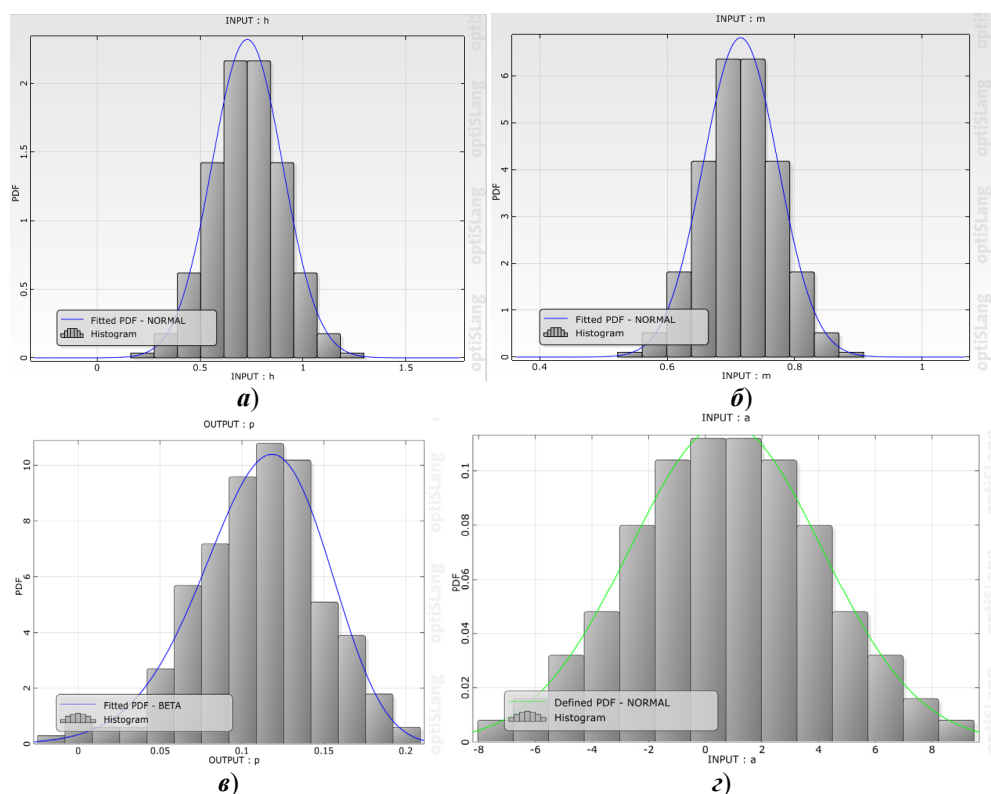


Рис. 3. Гистограммы распределений характеристик технологических дефектов:
a – отклонение толщины; **б** – отклонение массы; **в** – пористость;
г – отклонение угла ориентации тканевых слоев

Таблица 2

Инженерные константы тканевого слоя

Инженерная константа	Значение инженерной константы	
	проектное	действительное
Модуль упругости в плоскости E_p , ГПа	83,6	$54,5 \pm 1,89$
Модуль поперечной упругости E_t , ГПа	5,42	$3,48 \pm 0,101$
Модуль сдвига вне плоскости ламината G_{tp} , ГПа	2,01	$1,29 \pm 0,101$
Коэффициент Пуассона в плоскости, ν_p	0,278	$0,303 \pm 0,00183$
Коэффициент Пуассона вне плоскости, ν_{pt}	0,348	$0,349 \pm 4,53 \cdot 10^{-5}$

2. Напряженно-деформированное состояние лопасти квадрокоптера при номинальных нагрузках

При проектировании решается задача создания легкой, прочной и надежной лопасти. Это достигается за счет изменения структуры субламина-та, включая изменение направления укладки каждого тканевого слоя.

В исходной конструкции лопасти укладка тканей в слоях была такой, что направление укладки нитей основы было параллельным левому краю поверхности (рис. 4,а).

Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния лопасти показаны на рис. 4.

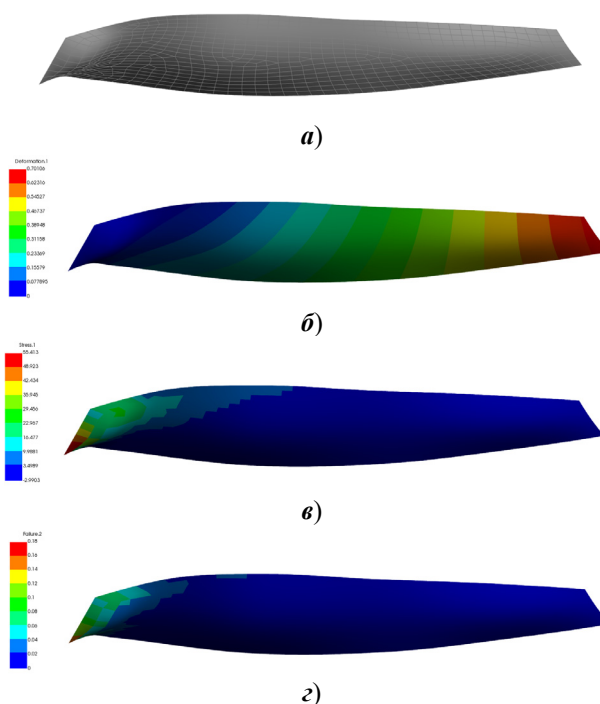


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования:
 а – используемая при компьютерном моделировании конечно-элементная сетка;
 б – распределение модуля вектора перемещений (мм);
 в – распределение первого главного напряжения в первом слое оболочки (МПа);
 г – распределение обратного коэффициента запаса прочности

Представленные результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о том, что минимальное значение обратного коэффициента запаса прочности лопасти равно 0,193.

Следует заметить, что при номинальных нагрузках уровень нагруженности лопатки низкий – обратный коэффициент запаса прочности не превышает 0,2. Лопатка находится в сложном деформированном состоянии, испытывая изгиб и кручение. Распределение напряжений характеризуется неравномерностью и по длине – в месте крепления уровень напряжений выше, и по толщине оболочки. Уровни нагруженности каждого тканевого слоя также различны и зависят от угла укладки слоя.

3. Оптимизация углов укладки тканевых слоев

При решении задачи оптимизации критерием проектирования является минимальное по объему лопатки значение обратного коэффициента запаса прочности [12]. При этом решается задача поиска минимума.

Параметрами проектирования являются направления укладки тканевых слоев. Интервал углов укладки слоев находился в границах от минус 45° до 45°.

Задача решалась методом оптимизации по адаптивной поверхности прогноза (ARSM) [13].

При решении оптимизационной задачи были получены следующие результаты:

– оптимальные значения углов укладки слоев находятся в интервале от минус $22,46^\circ$ до минус $14,26^\circ$, в данном случае значение целевой функции составляет 0,0997;

– для используемой адаптивной поверхности прогноза коэффициент прогноза составил 85 % (рис. 5,*а*), потребовалось 1123 вычислений целевой функции для нахождения оптимума (рис. 5,*б*).

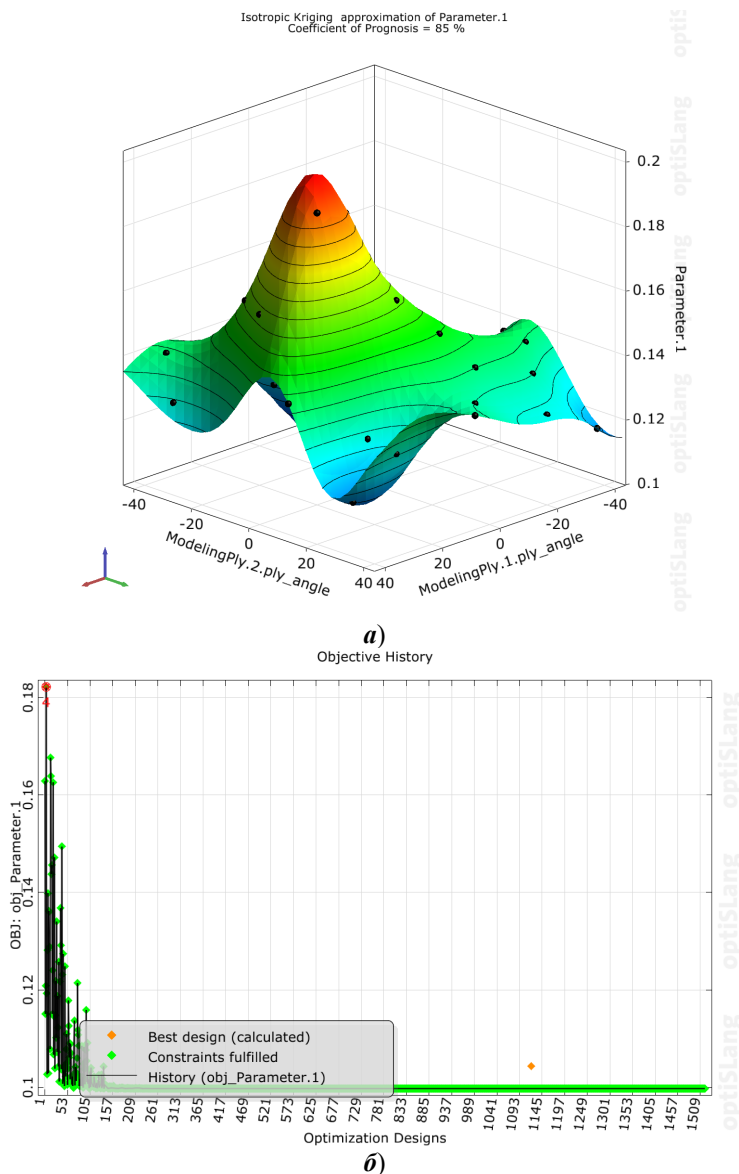


Рис. 5. Результаты решения оптимизационной задачи: *а* – 3D-поверхность оптимального прогноза; *б* – история изменения целевой функции

Следует заметить, что изменение углов укладки тканевых слоев, которое не требует изменения массы материала и его стоимости, приводит к существенному увеличению прочности изделия – значение обратного коэффициента запаса прочности уменьшается от 0,193 до 0,0997.

4. Оценка робастности

Для оценки робастности целевой функцией (выходной характеристикой) являлось минимальное значение обратного коэффициента запаса прочности (ОКЗП). Углы ориентации верхнего и нижнего тканевых слоев, а также отклонение массы ламината являлись параметрами проектирования, определяющими разброс выходной характеристики.

В работах [8–10] были определены статистические характеристики и функции распределения входных параметров, разброс которых был обусловлен наличием в ПСКМ технологических дефектов. На основе статистических характеристик технологических дефектов (табл. 1) был проведен анализ робастности, который позволил получить следующие результаты (рис. 6): поверхность оптимального прогноза; гистограмма распределения ОКЗП; коэффициенты прогноза; статистические характеристики распределения.

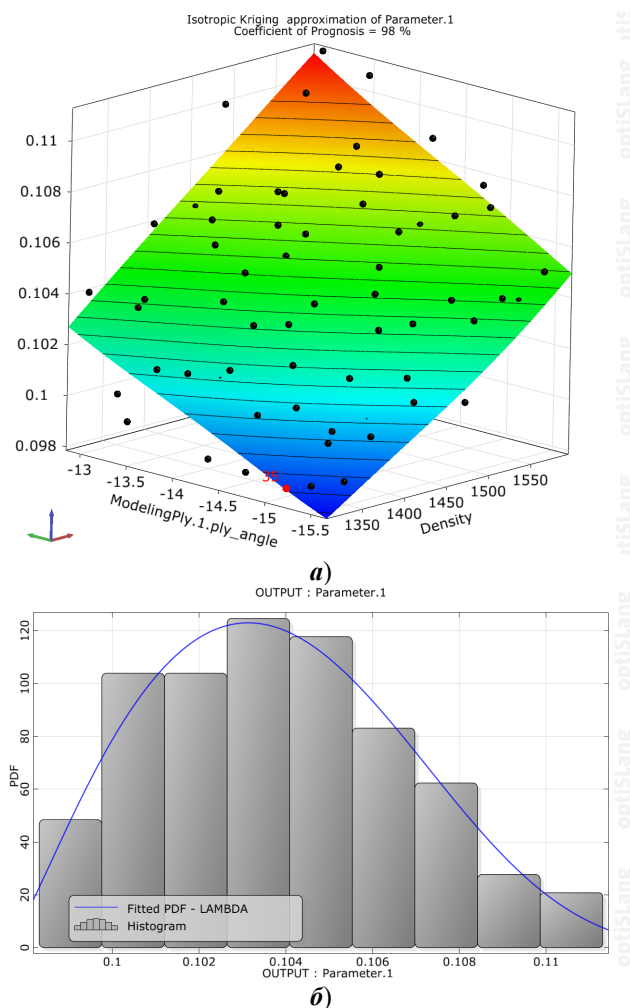


Рис. 6. Результаты анализа робастности: **a** – поверхность оптимального прогноза; **б** – гистограмма распределения ОКЗП; **в** – коэффициенты прогноза: отклонение массы, угол укладки 1-го и 2-го слоев ткани; **г** – статистические характеристики распределения

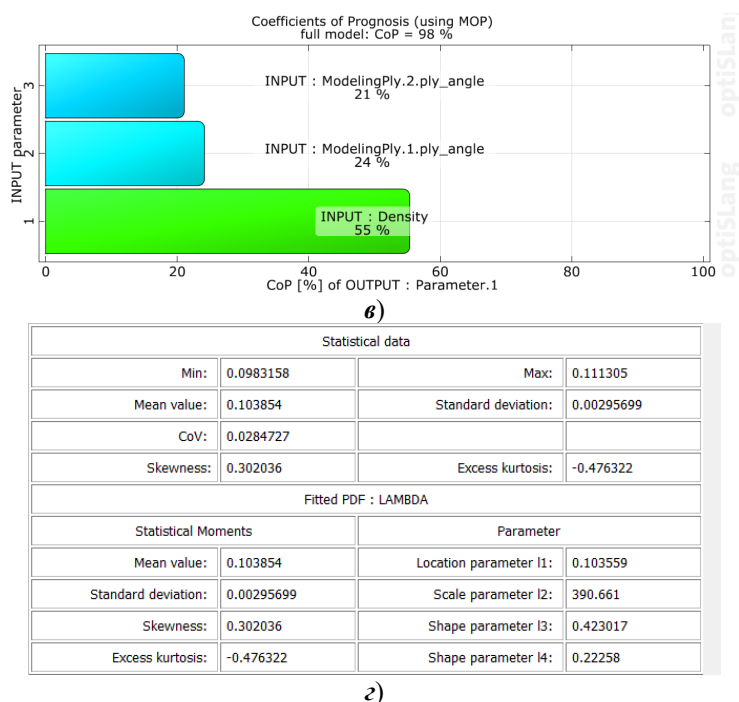


Рис. 6. Окончание

На основании полученных результатов можно заключить:

– наибольшие значения коэффициентов прогноза имеет отклонение массы ламината (55 %), меньшие значения коэффициента прогноза имеют угол укладки второго слоя (24 %) и первого слоя (21 %). Общий коэффициент прогноза равен 98 %, что свидетельствует об удовлетворительном качестве модели;

– распределение ОКЗП подчиняется лямбда-распределению, математическое ожидание максимального значения ОКЗП равно 0,104, среднеквадратическое отклонение – 0,00296, доверительный интервал составляет [0,0983 0,1113] при уровне 6-сигма;

– вероятность превышения ОКЗП своего предела (равного единице) можно считать удовлетворительной, так как разность между пределом минимального значения ОКЗП и его математическим ожиданием имеет уровень, значительно превышающий 6-сигма.

5. Статистические поля напряжений в лопасти квадрокоптера

Построение и анализ статистических полей, таких как поля напряжений, деформаций, перемещений, а также производных от них величин, например поля ОКЗП, можно рассматривать как некоторое расширение возможностей анализа робастности конструкции. Хотя возможности анализа статистических полей намного шире.

На рис. 7 показаны статистические поля, которые являются производными от поля напряжений. На рис. 7,а показано поле ОКЗП, на рис. 7,б – поле среднеквадратического отклонения ОКЗП, на рис. 7,в – поле величины $mean + 3 \cdot sigma$, на рис. 7,г – распределение $mean + 6 \cdot sigma$ (здесь $mean$ – среднее значение ОКЗП, $sigma$ – среднеквадратическое отклонение ОКЗП).

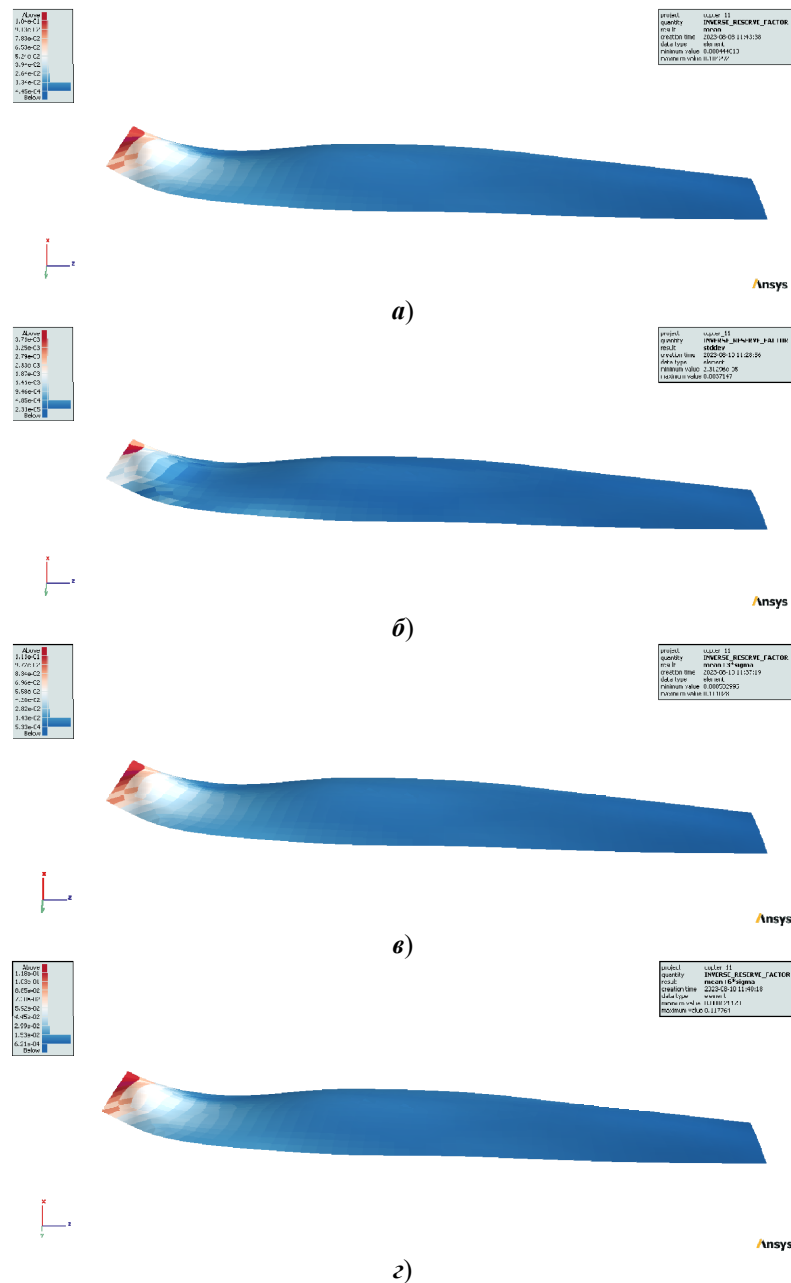


Рис. 7. Статистические поля напряжений: *a* – среднего значения ОКЗП; *б* – среднеквадратического отклонения ОКЗП; *в* – распределение $mean + 3 \cdot sigma$; *г* – распределение $mean + 6 \cdot sigma$

Все четыре распределения имеют похожий характер – максимальные значения рассматриваемых величин наблюдаются у места крепления оболочки в левой части. Однако имеются особенности. Так, распределение среднеквадратического отклонения имеет более выраженный экстремальный характер – максимальные значения величины сосредоточены в ограниченной области, расположенной у места крепления оболочки.

Сопоставление построенных статистических полей с результатами детерминированного расчета позволили сделать следующие выводы:

- распределения ОКЗП, рассчитанного при номинальных нагрузках, и распределения среднего значения коэффициента запаса прочности согласуются между собой. Максимальные значения величин в данных распределениях равны 0,0997 и 0,104 соответственно;
- максимальное значение распределения среднеквадратического отклонения ОКЗП равняется $3,71 \cdot 10^{-3}$. Статистический разброс этой величины вызван наличием технологических дефектов;
- распределения величин $mean + 3 \cdot sigma$ и $mean + 6 \cdot sigma$ позволили определить место расположения наиболее опасных мест конструкции с учетом случайного распределения технологических дефектов.

Заключение

Представлена методика оптимального проектирования лопасти квадрокоптера из ПСКМ, согласно которой были проведены: анализ чувствительности, многокритериальная оптимизация и оценка робастности.

Разработана компьютерная модель лопасти квадрокоптера из ПСКМ. Данная модель учитывает структуру ламината и действующие на нее нагрузки.

Анализ чувствительности позволил выявить основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние лопасти квадрокоптера – отклонение массы ламината, а также отбросить второстепенные – углы укладки второго слоя и первого слоя.

Оптимизация конструкции лопасти квадрокоптера привела к уменьшению ОКЗП с 0,197 до 0,0997 путем определения оптимальной структуры ламината.

Анализ робастности позволил установить, что распределение ОКЗП подчиняется лямбда-распределению, а также были определены вероятностные характеристики этого лямбда-распределения. Установлено, что вероятность отказа не превышает допустимое значение.

Список литературы

1. Муйземнек А. Ю., Савицкий В. Я., Нестеров С. А. Особенности подготовки исходных данных для построения микромеханических моделей слоистых пластиков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2015. № 1. С. 152–162.
2. Жуков И. Е., Миляев А. В., Муйземнек А. Ю., Котосов А. А. Компьютерное моделирование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек бронешлема при высокоскоростном ударе // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 3–4. С. 21–27.
3. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Расчет межслойных напряжений в композиционных оболочках с двоякой положительной кривизной // Актуальные проблемы науки и образования. 2017. № 2. С. 105–111.
4. Богомолов А. И., Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Модели сопротивления деформированию и разрушению дискретно-тканевых преград при ударном нагружении // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 2. С. 154–167.
5. Муйземнек А. Ю., Савицкий В. Я. Модели сопротивления деформированию и разрушения тканей из арамидных нитей при ударном нагружении // Модели, си-

- стемы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 3. С. 168–178.
6. Муйземнек А. Ю. Исследование сопротивления деформированию и разрушения дискретно-тканевых оболочек с двоякой положительной кривизной // Вестник Пензенского государственного университета. 2016. № 2. С. 100–116.
 7. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 3. С. 134–145.
 8. Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 79–89.
 9. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Влияние технологии изготовления на уровень дефектности полимерных слоистых композиционных материалов // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. IV Всерос. науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с международным участием / под общ. ред. В. В. Салмина. Пенза, 2018. С. 189–192.
 10. Карташова Е. Д., Косова М. А., Желудкова А. А., Муйземнек А. Ю. Компьютерное моделирование драпировки ткани в процессе производства слоистых композитов // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. Пенза, 2017. С. 325–327.
 11. Иванова Т. Н., Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Оптимизация конструкции трубчатой направляющей из полимерного слоистого композиционного материала // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 109–128.
 12. Муйземнек А. Ю., Карташова Е. Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. 77 с.
 13. Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis // Dynardo – Dynamic Software and Engineering GmbH. Weimar, 2018.

References

1. Muiyemnek A.Yu., Savitskiy V.Ya., Nesterov S.A. Features of preparing initial data for constructing micromechanical models of laminated plastics. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2015;(1):152–162. (In Russ.)
2. Zhukov I.E., Milyaev A.V., Muiyemnek A.Yu., Kotosov A.A. Computer modeling of resistance to deformation and destruction of discrete fabric shells of an armored helmet during a high-speed impact. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu = Issues of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism*. 2018;(3–4):21–27. (In Russ.)
3. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muiyemnek A.Yu. Calculation of interlayer stresses in composite shells with double positive curvature. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya = Current problems of science and education*. 2017;(2):105–111. (In Russ.)
4. Bogomolov A.I., Muiyemnek A.Yu., Kartashova E.D. Models of resistance to deformation and destruction of discrete tissue barriers under impact loading. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(2):154–167. (In Russ.)
5. Muiyemnek A.Yu., Savitskiy V.Ya. Models of resistance to deformation and destruction of fabrics made of aramid yarns under impact loading. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2016;(3):168–178. (In Russ.)

6. Muzyemnek A.Yu. Study of resistance to deformation and destruction of discrete tissue shells with double positive curvature. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2016;(2):100–116. (In Russ.)
7. Kartashova E.D., Muzyemnek A.Yu. The influence of technological deviations in the arrangement of reinforcement in a polymer layered composite material on the resistance to deformation and destruction. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(3):134–145. (In Russ.)
8. Muzyemnek A.Yu., Kartashova E.D. Technological defects of polymer layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(2):79–89. (In Russ.)
9. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muzyemnek A.Yu. The influence of manufacturing technology on the level of defects in polymer layered composite materials. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: sb. st. IV Vseros. nauch.-tekh. konf. dlya molodykh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem = Innovation of technical solutions in mechanical engineering and transport: proceedings of the 4th All-Russian scientific and engineering conference for young scientists and students with international participation*. Penza, 2018:189–192. (In Russ.)
10. Kartashova E.D., Kosova M.A., Zheludkova A.A., Muzyemnek A.Yu. Computer modeling of fabric draping during the production of layered composites. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy = Information technologies in science and education. Problems and prospects*. Penza, 2017:325–327. (In Russ.)
11. Ivanova T.N., Muzyemnek A.Yu., Kartashova E.D. Optimization of the design of a tubular guide made of polymer layered composite material. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(3):109–128. (In Russ.)
12. Muzyemnek A.Yu., Kartashova E.D. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya polimernykh sloistykh kompozitsionnykh materialov: ucheb. posobie = Mechanics of deformation and fracture of polymer layered composite materials: textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2017:77. (In Russ.)
13. Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis. *Dynardo – Dynamic Software and Engineering GmbH*. Weimar, 2018.

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Дмитриевна Карташова

ассистент кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: katrina89@yandex.ru

Ekaterina D. Kartashova

Assistant of the sub-department
of theoretical and applied mechanics
and graphics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.07.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.08.2023

Принята к публикации / Accepted 05.09.2023