

УДК 539.374.519.8

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЕРА КОМПОЗИТНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ЛОПАТКИ ГТД НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА

П. В. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, Ю. С. ПЕРВУШИН<sup>2</sup>, В. С. ЖЕРНАКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>paulnightingale@mail.ru, <sup>2</sup>pcomposit@mail.ru, <sup>3</sup>sm.ugatu@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12.12.2020

**Аннотация.** В статье рассматривается методология формирования структуры пера композитной лопатки вентилятора ГТД на основе функционального анализа. Проведен послойный анализ напряженного состояния и деформационного поведения пера лопатки с выявлением наиболее напряженных зон в каждом слое и оценкой направлений главных напряжений в них. Приведен прочностной и жесткостной анализ пера лопатки со структурой, сформированной на основе функционального анализа.

**Ключевые слова:** структурно-функциональный анализ; композит; структура; слой; укладка; волокно; матрица; напряжения; деформации; прочность; жесткость; лопатка; компрессор.

### ВВЕДЕНИЕ

Структурно-функциональный анализ (СФА) [1] включает выбор компонентов композитного материала (матричного и армирующего), параметров однонаправленного слоя (коэффициента армирования, упругих и прочностных характеристик), проектирование многослойной структуры пера лопатки (углов укладки слоев, последовательности выкладки, толщин слоев), исходя из действующих на нее внешних силовых и температурных воздействий. Этот этап является наиболее сложным при проектировании любых изделий из композитов (это отмечается во всех источниках по проектированию изделий из КМ [2–15]).

В работе [1] профессором Ю. С. Первушиным предложена методология проектирования композитных структур, позволяющая сформировать структуру первого приближения с дальнейшим уточнением (не более двух раз).

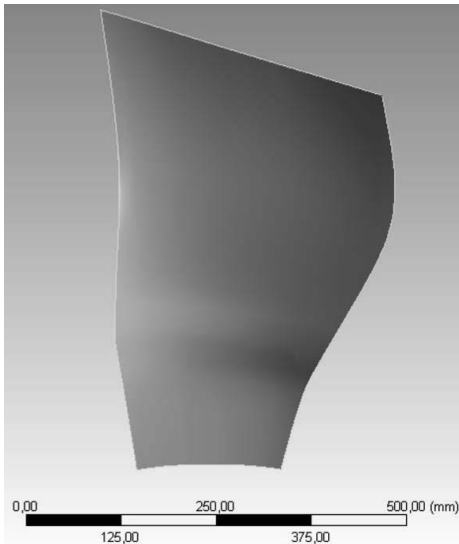
Суть этой методологии заключается в следующем: создается слоистая модель проектируемого изделия, состоящая только из квазиизотропных слоев материала, по форме и геометрии соответствующая исходному изделию. Далее эта модель подвергается силовым воздействиям, аналогичным испытываемым проектируемым изделием. На основе послойного анализа в программном продукте ANSYS Workbench с модулем ANSYS Composite Pre/Post определяются направления главных напряжений в каждом слое. Эти направления и являются основой укладки однонаправленных слоев выбранного композита с дальнейшим формированием ортотропной структуры. Это первая приближенная структура проектируемого изделия.

Вторым приближением является укладка однонаправленных слоев композита в направлении действия главных напряжений первого приближения.

Расчеты показывают, что дальнейших приближений не требуется.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается модельная лопатка вентилятора (рис. 1).



**Рис. 1.** Трехмерная модель рассчитываемой лопатки вентилятора

Параметры исследуемой модели:

– длина хорды в периферийном сечении  $b \approx 400$  мм;

– высота лопатки  $h \approx 560$  мм.

Вычислительный эксперимент реализуется в программном продукте ANSYS 19.2 Workbench Academic Research с использованием модулей для работы с композиционными материалами ACP Pre/Post.

Действующие нагрузки и граничные условия:

1) угловая скорость вращения лопатки  $\omega = 105$  рад/с;

2) диаметр втулки  $d_{вт} = 200$  мм;

3) жесткое защемление по корневому сечению fixed support;

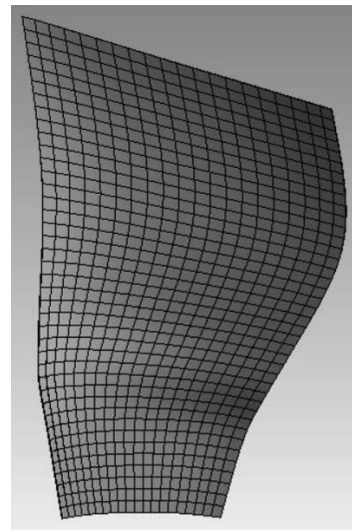
4) равномерно распределенное давление по корытцу лопатки, соответствующее перепаду давлений  $\Delta p = 20$  кПа.

В качестве материала лопатки был принят углепластик на основе углеродной ровницы УОЛ-300Р и фталонитрильного связующего РН-3М с коэффициентом армирования  $\psi = 0,6$ ; плотность углепластика  $\rho_{км} = 1565$  кг/м<sup>3</sup>; упругие характеристики однонаправленного слоя:  $E_1 = 138$  ГПа;

$E_2 = 6,3$  ГПа;  $G_{12} = 4,6$  ГПа;  $\nu_{12} = 0,22$ ; прочностные характеристики материала однонаправленного слоя:  $\bar{\sigma}_1^+ = 1400$  МПа;  $\bar{\sigma}_1^- = 950$  МПа;  $\bar{\sigma}_2^+ = 64$  МПа;  $\bar{\sigma}_2^- = 92$  МПа;  $\bar{\tau}_{12} = 19$  МПа; толщина однонаправленного слоя  $h_c = 0,2$  мм.

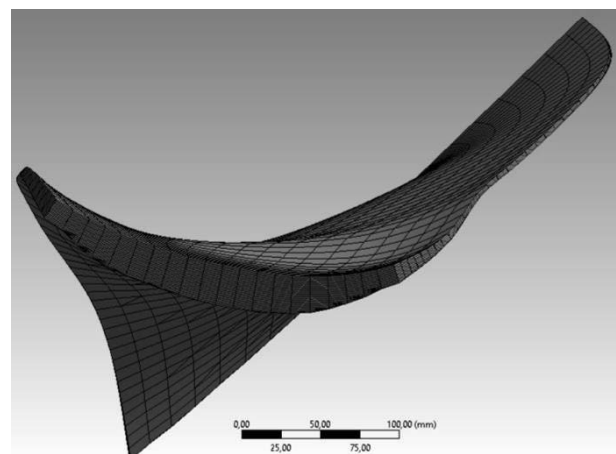
### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Конечно-элементная модель лопатки представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Конечно-элементная модель лопатки вентилятора

На основе данной конечно-элементной модели получена слоистая модель лопатки, сформированная на основе СФА в модуле ACP Pre (рис. 3).



**Рис. 3.** Слоистая модель лопатки

При выкладке слоев ( $h_c = 0,2$  мм) для достижения заданной толщины лопатки количество слоев лопатки равно 126. Для прове-

дения СФА при таком количестве слоев принято решение укладывать слои блоками по 5 слоев каждый. Ориентация слоев внутри блока одинакова. Толщина блока в этом случае составляет  $h_6 = 1$  мм. Таких блоков в структуре лопатки 26 шт.

Далее, согласно алгоритму СФА, произведем послойный анализ распределения главных напряжений в условном квазиизотропном материале. Основные физико-механические характеристики данного материала представлены далее:  $\rho_{\text{КИМ}} = 1565 \text{ кг/м}^3$ ; упругие характеристики:  $E = 69 \text{ ГПа}$ ;  $G_{12} = 27 \text{ ГПа}$ ;  $\nu_{12} = 0,26$ .

Программный комплекс Ansys Workbench (в частности, модуль Static structural) позволяет определить векторы главных напряжений в конечно-элементных моделях. Для извлечения результатов необходимо воспользоваться командами «User defined result → SVECTORS». После этого необходимо экспортировать файл результатов в формат MS Excel. В данном файле выводятся поузловые значения трех главных напряжений и углы поворота главных площадок относительно глобальной системы координат (углы Эйлера):  $\theta_{xy} (\alpha)$ ,  $\theta_{yz} (\beta)$ ,  $\theta_{zx} (\gamma)$ .

Для лопатки из условного квазиизотропного материала получены картины распределения главных напряжений для наиболее напряженных слоев лопатки (рис. 4–9).

Анализ распределения главных напряжений показывает, что в каждом слое имеют место обширные зоны с отличной друг от друга ориентацией главных напряжений. В связи с этим простая выкладка композита по главным напряжениям может не дать результата, потому что внутри каждого слоя будут зоны, ориентация армирующей компоненты в которых не соответствует направлению главных напряжений. Углы главных напряжений по отношению к главной оси армирования (глобальная ось  $Y$ ) для каждого слоя в разных зонах представлены в табл. 1.

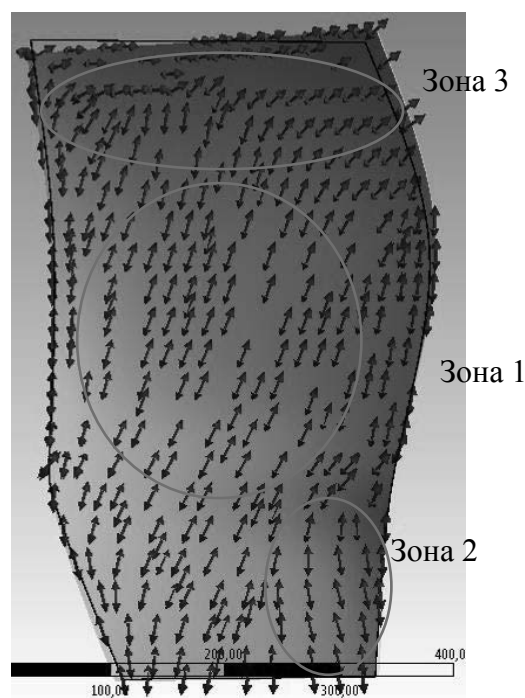


Рис. 4. Распределение главных напряжений в слое № 1 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)

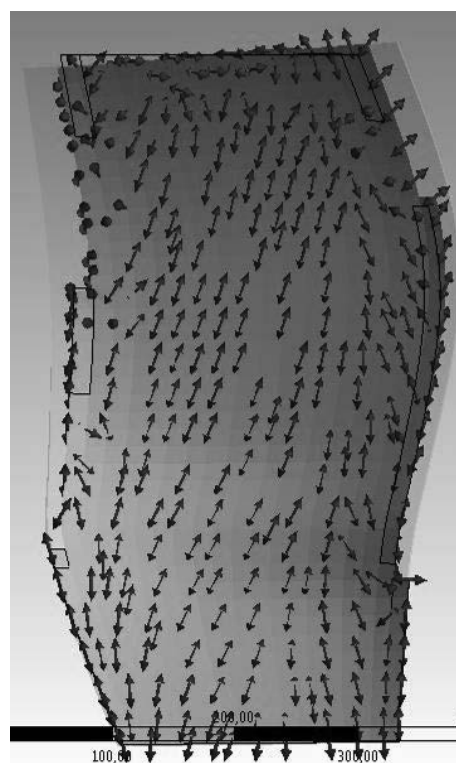
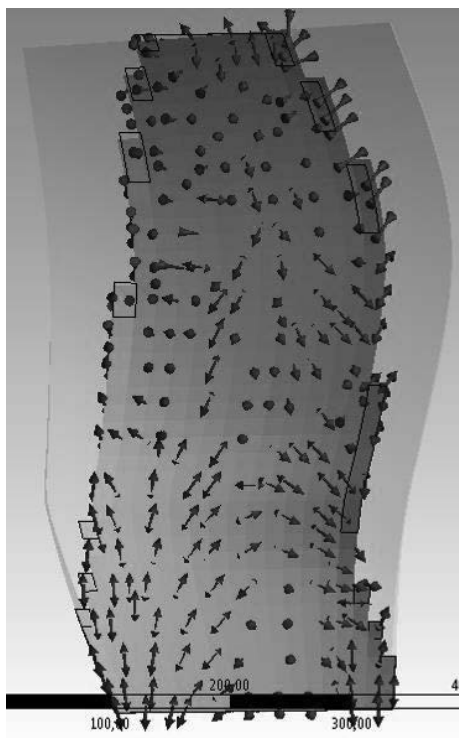
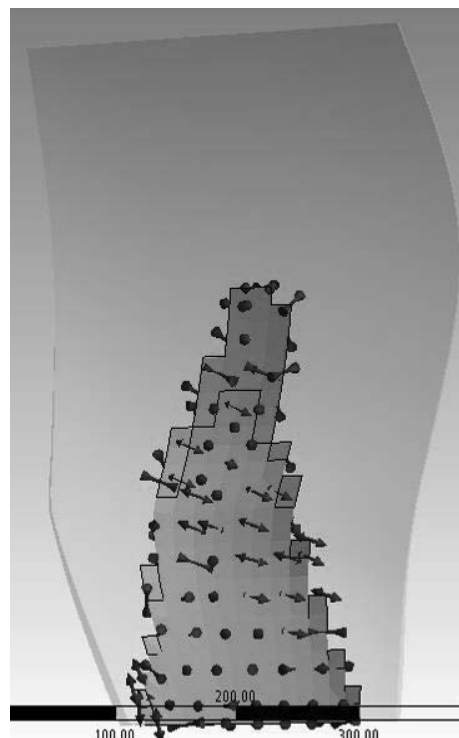


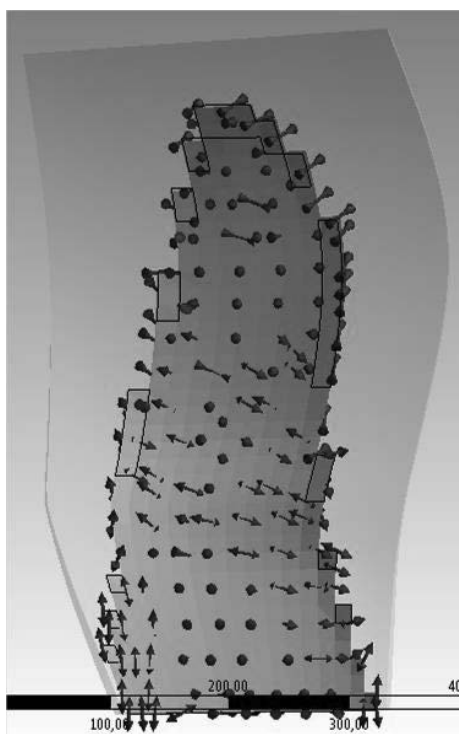
Рис. 5. Распределение главных напряжений в слое № 5 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)



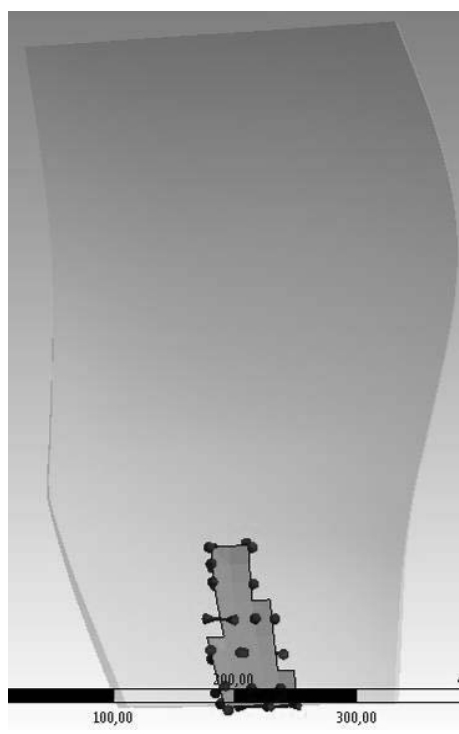
**Рис. 6.** Распределение главных напряжений в слое № 10 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)



**Рис. 8.** Распределение главных напряжений в слое № 20 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)



**Рис. 7.** Распределение главных напряжений в слое № 15 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)



**Рис. 9.** Распределение главных напряжений в слое № 26 композитной лопатки вентилятора (квазиизотропный материал)

Таблица 1  
Углы главных напряжений по отношению к главной оси армирования для каждого слоя в разных зонах

Номер слоя	Преимущественный угол ориентации главных напряжений в зоне 2, градусы	Преимущественный угол ориентации главных напряжений в зоне 1, градусы
1	29	30
2	32	27
3	17	24
4	-20	21
5	-33	18
6	-30	15
7	-36	14
8	-47	13
9	-47	12
10	-48	10
11	-53	0
12	-58	-10
13	-63	-20
14	-66	-30
15	-69	-50
16	-69	-52
17	-69	-54
18	-70	-56
19	-70	-58
20	-70	-60
21	-72	-63
22	-74	-65
23	-76	-67
24	-78	-69
25	-79	-70
26	-80	-70

Далее производится выкладка углепластиковой структуры пера лопатки по главным напряжениям в соответствии с зоной 2, которая является наиболее напряженной зоной в лопатке. Результаты представлены на рис. 10–11.

Максимальное перемещение периферийного сечения лопатки в этом случае составляет  $U_{\max} = 20,6$  мм. Минимальный коэффициент запаса прочности в этом случае составляет  $SF_{\min} = 0,77$  и соответствует слою № 1.

Запас прочности  $SF$  определяется в данном случае на основе критерия прочности Мизеса – Хилла, нашедшего широкое применение для оценки прочности слоистых композитов:

$$SF = \frac{1}{\sqrt{H_{cr}}}$$

$$H_{cr} = \left( \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2,$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$  – действующие в точке нормальные и касательные напряжения;  $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$  – предельные нормальные и касательные напряжения для материала соответственно.

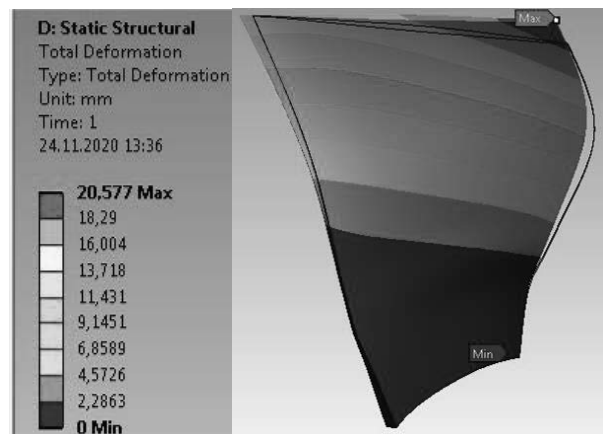


Рис. 10. Деформированное состояние лопатки вентилятора из КМ со структурой, соответствующей выкладке по главным напряжениям согласно зоне 2

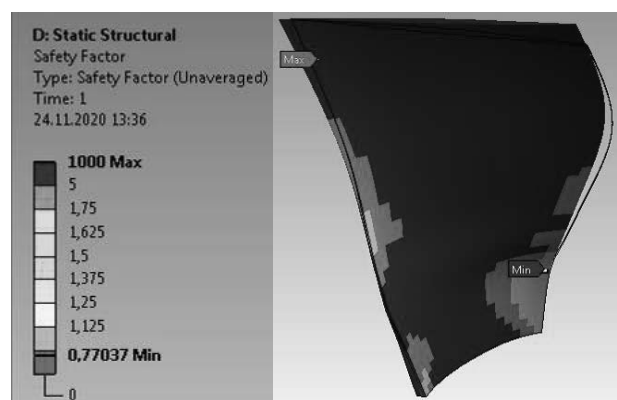


Рис. 11. Распределение запасов прочности лопатки вентилятора из КМ со структурой, соответствующей выкладке по главным напряжениям согласно зоне 2

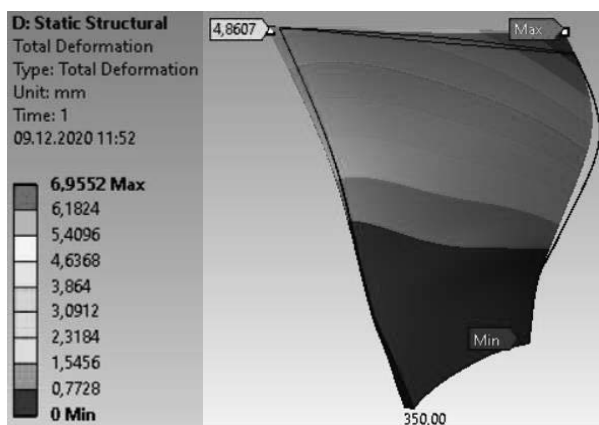
Как видно из рис. 10 и 11, при укладке исключительно по главным напряжениям имеет место неблагоприятное напряженное состояние и деформационное поведение ( $SF_{min} = 0,77$ ). Укладка по главным напряжениям в соответствии с зоной 1 показала чуть лучшие, но в целом также неудовлетворительные результаты.

Следующим шагом является определение на основе анализа полученных результатов условной срединной поверхности пера композитной лопатки, относительно которой будет формироваться структура, максимально соответствующая требованиям ортотропности.

В слоях, где имеются зоны с различной ориентацией главных напряжений, направление выкладки выбиралось в соответствии с наиболее обширной упорядоченной зоной (в большинстве случаев соответствующее зоне 1).

Данным требованиям соответствует структура укладки блоков (30/-30/24/-24/18/-18/14/-14/0/0/-14/14/-18/18/-24/24/-30/30)°.

Картина деформированного состояния лопатки вентилятора из КМ со структурой укладки, наиболее близкой к ортотропной, представлена на рис. 12.



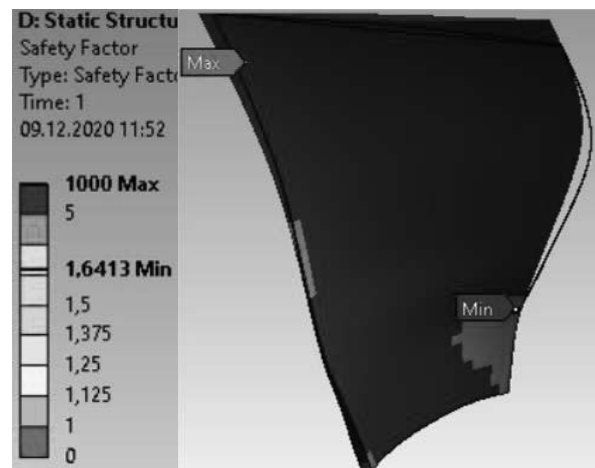
**Рис. 12.** Деформированное состояние лопатки вентилятора из КМ со структурой укладки, наиболее близкой к ортотропной

Картина распределения запасов прочности лопатки вентилятора из КМ со структурой укладки, наиболее близкой к ортотропной, представлена на рис. 13.

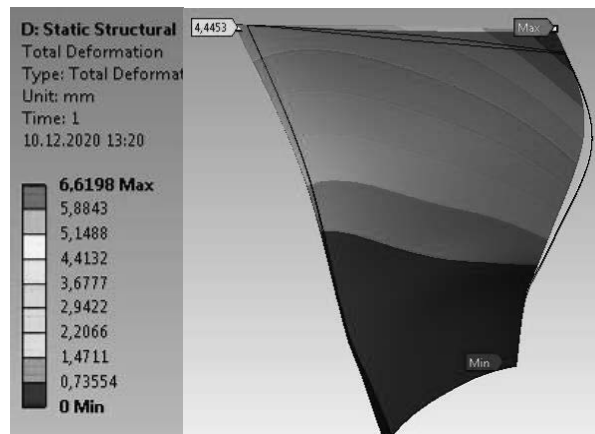
Как видно из рис. 12 и 13, напряженное и деформированное состояние (НДС) пера

лопатки в целом значительно улучшилось по отношению к укладке исключительно по главным напряжениям. Для дальнейшего улучшения НДС делается второе приближение.

Картина распределения деформаций и запасов прочности после второго приближения, когда укладка в слоях выбирается на основе направлений главных напряжений первого приближения, представлена на рис. 14 и 15.



**Рис. 13.** Распределение запасов прочности лопатки вентилятора из КМ со структурой укладки, наиболее близкой к ортотропной



**Рис. 14.** Деформированное состояние лопатки вентилятора из КМ со структурой на основе второго приближения

Второе приближение показало, что полученная структура пера лопатки уже отвечает типовым требованиям к прочности и жесткости. Дальнейшие приближения выкладки к направлениям главных напряжений к существенному улучшению результатов не привели.

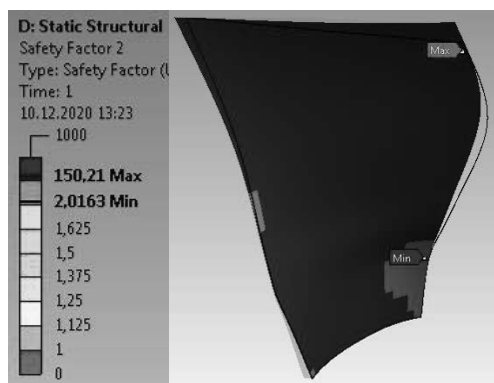


Рис. 15. Распределение запасов прочности лопатки вентилятора из КМ со структурой на основе второго приближения

Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты исследования напряженно-деформированного состояния типовых структур лопатки вентилятора из КМ**

Структура	$U_{max}$ , мм	$SF^{min}$
Выкладка в соответствии с зоной 2	20,6	0,77
Выкладка в соответствии с зоной 1	18,5	0,85
Первое приближение	6,9	1,6
Второе приближение	6,6	2
Третье приближение	6,55	2,05

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Методика структурно-функционального анализа, реализованная на примере пера композитной лопатки вентилятора, позволяет значительно сузить круг поиска структуры в соответствии с выбранными критериями (прочности, жесткости и др.).

В изделиях сложной геометрии выявлены зоны с различной ориентацией главных напряжений в пределах одного слоя. В данном случае необходим комплексный подход к выбору структуры такого изделия, заключающийся в определении главных напряжений в наиболее напряженных и обширных зонах, создании на основе полученных данных структуры изделия, максимально близкой к ортотропной, а также проведении дополнительных мероприятий по корректировке полученной структуры с целью улучшения НДС в случае необходимости.

В целом методология СФА позволяет в пределах 2–3 приближений определить структуры элементов конструкций из КМ,

удовлетворяющие по условиям прочности и жесткости требованиям к проектируемому изделию.

*Статья подготовлена в рамках гранта Академии наук Республики Башкортостан по теме «Экспертная система для разработки конструкции и выбора материалов основных узлов современных авиационных двигателей и наземных энергетических установок на их базе».*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жернаков В. С., Первушин Ю. С., Соловьев П. В. Функциональный анализ морфологии структуры и напряженного состояния конструкций из композиционных материалов // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 4 (86). С. 18–25. [V. S. Zhernakov, U. S. Pervushin, P. V. Soloviev, "Functional analysis of the morphology of the structure and the stress state of structures made of composite materials", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 4 (86), pp. 18-25, 2019. ]
2. Первушин Ю. С., Соловьев П. В. Особенности напряженного и деформированного состояний лопатки компрессора ГТД из несбалансированных композитов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 17, № 3 (56). С. 253–259. [Yu. S. Pervushin, P. V. Soloviev, "Features of the stressed and deformed states of a GTE compressor blade made of unbalanced composites", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 3 (56), pp. 253-259, 2018. ]
3. Каримбаев Т. Д. Создание деталей и узлов авиационных двигателей с применением композиционных материалов на основе инновационных решений // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 33–43. [T. D. Karimbaev, "The creation of aircraft engines parts and components using composite materials based on innovative solutions", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 2 (84), pp. 33-43, 2019. ]
4. Шилько С. В., Плещачевский Ю. М. Механика адаптивных композитов и биоматериалов // Материалы, технологии, инструмент. 2003. Т. 8, № 4. С. 5–16. [S. V. Shilko, Yu. M. Pleskachevskiy, "Mechanics of adaptive composites and biomaterials", (in Russian), in *Materialy, tehnologii, instrument*, vol. 8, no. 4, pp. 5-16, 2003. ]
5. Басистов Ю. А., Яновский Ю. Г. Иерархически-адаптивная модель для идентификации уравнений состояния вязкоупругих сред // Механика композиционных материалов и конструкций. 1996. Т. 2, № 3-4. С. 24–57. [Yu. A. Basistov, Yu. G. Yanovskiy, "Hierarchically adaptive model for identifying the equations of state of viscoelastic media", (in Russian), in *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy*, vol. 2, no 3-4, pp. 24-57, 1996. ]
6. Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1972. 498 с. [A. K. Malmeyster, V. P. Tamuzh, G. A. Teters, *Resistance of rigid polymeric materials*, (in Russian). Riga: Zinatne, 1972. ]
7. Скудра А. М., Булавс Ф. Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с. [A. M. Skudra, F. Ya. Bulavs, *Structural theory of reinforced plastics*, (in Russian). Riga: Zinatne, 1978. ]

8. **Скудра А. М., Булавс Ф. Я., Роценс К. А.** Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1971. 238 с. [ A. M. Skudra, F. Ya. Bulavs, K. A. Rozens, *Creep and static fatigue of reinforced plastics*, (in Russian). Riga: Zinatne, 1971. ]

9. **Тарнопольский Ю. М., Жигун И. Г., Поляков В. А.** Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.: ил. [ Yu. M. Tarnopolsky, I. G. Zhigun, V. A. Polyakov, *Spatially reinforced composite materials. Handbook*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1987. ]

10. **Браутман Л., Крок Р., Чамис К.** (ред.) Композиционные материалы. Т. 8: Анализ и проектирование конструкций. М.: Машиностроение, 1978. 264 с. [ L. Brautman, R. Krok, K. Chamis, *Composite materials. Vol. 8: Analysis and design of structures*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1978. ]

11. **Лехницкий С. Г.** Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. С. 416. [ S. G. Lekhnitsky, *Theory of elasticity of anisotropic body*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1977. ]

12. **Фокин А. Г., Шермергор Г. Д.** Эффективные модули упругости композита, составленного из анизотропных слоев // Механика полимеров. 1975. № 3. С. 408–413. [ A. G. Fokin, G. D. Shermergor, "Effective elastic moduli of a composite composed of anisotropic layers", (in Russian), in *Mekhanika polimerov*, no. 3, pp. 408-413, 1975. ]

13. **Павлов В. П., Нусратуллин Э. М., Филиппов А. А.** Прочность лопатки компрессора авиационного двигателя при замене титанового сплава на композиционный материал // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 98–106. [ V. P. Pavlov, E. M. Nusratullin, A. A. Filippov, "Strength of an aircraft engine compressor blade when replacing a titanium alloy by a composite material", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 4 (44), pp. 98-106, 2011. ]

14. **Павлов В. П., Нусратуллин Э. М., Филиппов А. А.** Влияние армирования на прочность композиционной лопатки компрессора ГТД // Вестник УГАТУ 2010. Т. 14, № 4 (39). С. 50–59. [ V. P. Pavlov, E. M. Nusratullin, A. A. Filippov, "Influence of reinforcement on durability of the composite blade of compressor GTD", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 14, no. 4 (39), pp. 50-59, 2010. ]

15. **Филиппов А. А., Павлов В. П., Никитин С. Н.** Вычисление эффективных упругих характеристик композиционного материала методом асимптотического осреднения // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 3 (73). С. 49–57. [ A. A. Filippov, V. P. Pavlov, S. N. Nikitin, "Calculation of the effective elastic characteristics of the method of asymptotic homogenization", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 20, no. 3 (73), pp. 49-57, 2016. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович**, доц. каф. материаловед. и физики металлов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2016). Иссл. в обл. механики и технологии изгот. издел. из композиц. материалов.

**ПЕРВУШИН Юрий Сергеевич**, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по динамике и прочности машин и аппаратов (Челяб. политехн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. механики и термомеханики композиц. материалов.

**ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич**, проф., зав. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1992). Засл. деятель науки РФ, академик АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

#### METADATA

**Title:** Formation of the blade airfoil structure of a composite GTE fan blade based on functional analysis.

**Authors:** P. V. Soloviev<sup>1</sup>, Yu. S. Pervushin<sup>2</sup>, V. S. Zhernakov<sup>3</sup>

#### Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>paulnightingale@mail.ru, <sup>2</sup>pcomposit@mail.ru, <sup>3</sup>sm.ugatu@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 76-83, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article discusses the methodology of forming the airfoil structure of the composite GTE fan blade based on functional analysis. A ply-by-ply analysis of the stress state and deformation behavior of the blade airfoil with the identification of the most stressed zones in each ply and an assessment of the directions of the principal stresses inside are provided. Strength and stiffness analysis of a blade airfoil with a structure formed on the basis of functional analysis is presented.

**Key words:** structural and functional analysis; composite; structure; layer; stacking; fiber; matrix; stresses; deformations; strength; stiffness; blade; compressor.

#### About authors:

**SOLOVIEV, Pavel Vladimirovich**, Assoc. Prof., Dept. of Materials Technology and Metals Physics. Dipl. Engineer (UGATU, 2009). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2016). Researches in area of mechanics and manufacturing technology of products made of composite materials.

**PERVUSHIN, Yury Sergeevich**, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Engineer (UAI, 1958). Dr. of Tech. Sci. (CPI, 1991). Researches in area of composite materials mechanics and thermomechanics.

**ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich**, Prof., Head of a Chair of Dept. of Strength of Materials. Dipl. Engineer (UAI, 1967). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 1992). Honored Science Worker of RF, Academician of Science Academy of Bashkortostan Republic. Researches in area of deformable body mechanics.