

УДК 539.374.519.8

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. С. ЖЕРНАКОВ¹, Ю. С. ПЕРВУШИН², П. В. СОЛОВЬЕВ³

¹zhvs@rb.ru, ²pcomposit@mail.ru, ³paulnightingale@mail.ru

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

Поступила в редакцию 31.10.2019

Аннотация. Приведены результаты структурно-функционального анализа морфологии и напряженного состояния элементов конструкций из слоистых композиционных материалов (лопатки компрессора ГТД). Функциональный анализ состоит из анализа однонаправленного слоя и анализа слоистого композита, который включает анализ параметров слоев (толщину, угол и последовательность укладки, гибридность). Очень важно выявить функциональность каждого слоя – каким напряженным состоянием он будет нагружен. Эти функции предлагается определять из послойного анализа напряженного состояния проектируемого элемента из изотропного слоистого материала. Приведены результаты исследования влияния технологических отклонений структуры пера рабочей лопасти на ее напряженное состояние и деформационное поведение.

Ключевые слова: композит; слой; напряжение; деформация; адаптивность; структурно-функциональный анализ; лопасть; структура; волокно; матрица.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании элементов конструкций из слоистых композитов у конструктора возникает целый ряд вопросов и проблем. Имея технические требования к элементу конструкции, такие как его геометрия, граничные условия, действующие нагрузки, условия эксплуатации, – перед ним встают проблемы выбора армирующей и матричной компонент, коэффициентов армирования, морфологии композитной структуры (число слоев, углы и последовательность их укладки, ее сбалансированность, гибридность, функциональность). Для ответов на эти вопросы предлагается использовать структурно-функциональный анализ слоистых КМ.

Структурно-функциональный анализ слоистых КМ состоит из:

– функционального анализа однонаправленного слоя, который включает зависимости его физико-механических характеристик от упругих, прочностных, теплофизических и других свойств армирующей и матричной компонент, их объемных соотношений, а также от условий эксплуатации (температуры, среды, длительности воздействия внешних сил и др.). Этому посвящены работы [1–12].

– функциональный анализ слоистого композита включает зависимости его упругих, прочностных и других характеристик от свойств однонаправленных слоев, их толщин, углов и последователь-

ности укладки. Выбор расположения и углов укладки слоев проектируемого элемента предлагается определять по результатам исследования направлений главных максимальных напряжений в каждом слое модели проектируемого элемента, имеющего такое же количество слоев, их геометрию, толщину, но изготовленного из изотропного материала. Это позволяет укладывать армирующую компоненту в каждом слое по направлению главных максимальных напряжений соответствующего слоя модели. При проектировании структуры нужно стремиться к так называемому «ортотропному» материалу. Это уменьшает изгибно-крутильную связанность деформаций. Предлагаемый метод проектирования структуры слоистого композита в российской и зарубежной литературе отсутствует.

Структурно-функциональный анализ морфологии композитов позволяет:

- представить многослойную структуру композитного элемента в виде набора прочно соединенных между собой анизотропных слоев, где каждый слой имеет свое расположение, выполняет свою функцию, имеет свою геометрию, толщину, индивидуальные механические, теплофизические и другие характеристики;

- проводить послойный анализ напряженного состояния с использованием соответствующих критериев прочности [8];

- выявить наиболее напряженные слои;

- оптимизировать структуру за счет внутренней организации (изменять компоненты слоев, их геометрию, механические характеристики, положение в структуре) для получения заданного деформационного и напряженного состояний, вязкости разрушения, усталостной прочности и других эксплуатационных характеристик.

Ниже представлен структурно-функциональный анализ на примере проектирования пера рабочей лопатки компрессора низкого давления (КНД) ГТД.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

На основании требований к лопаткам КНД в качестве материала лопатки в данной

работе выбран углепластик на основе углеродной ровницы УОЛ–300Р и полиимидного связующего СП–97 с коэффициентом армирования $\psi = 0,6$; плотность углепластика $\rho_{KM} = 1500$ кг/м³; упругие характеристики однонаправленного слоя: $E_1 = 128$ ГПа; $E_2 = 6,2$ ГПа; $G_{12} = 4,3$ ГПа; $\nu_{12} = 0,23$.

Исходя из геометрии лопатки по хорде и длине и толщине однонаправленного слоя, было определено количество слоев (25 слоев в самом широком месте лопатки). В расчете были приняты следующие допущения:

- 1) распределение давления по высоте лопатки было принято постоянным и равным давлению в среднем сечении лопатки;

- 2) распределение давления по хорде лопатки изменяется по линейному закону;

- 3) изгибающий момент, действующий на лопатку, создается разностью давлений на спинке и корытце;

Разность давлений на корытце и спинке среднего сечения лопатки в среднем составляет 21 кПа. Хорда в среднем сечении ≈ 50 мм.

Для рабочей лопатки частота вращения 11 000 об/мин (1150 рад/с).

Для проектирования структуры лопатки в программном комплексе ANSYS Workbench с использованием модуля ACP Pre/Post была смоделирована лопатка (рис. 1) из изотропного слоистого композита, состоящего из такого же количества слоев, такой же толщины и геометрии.

Модельная лопатка была подвергнута нагружению подобно проектируемой, и был проведен послойный анализ напряженного состояния, который выявил направления максимальных главных напряжений в каждом слое. На рис. 2 представлены направления максимальных главных напряжений в слоях. Белыми стрелками показаны основные направления главных напряжений в слоях.

На основе картины послойного распределения главных напряжений в изотропной лопатке была выбрана следующая структура проектируемой лопатки с учетом правил создания ортотропных композитных структур: $-30/30/-25/25/-20/20/-15/15/-10/10/-5/5/0/0/5/-5/10/-10/15/-15/20/-20/25/-25$.

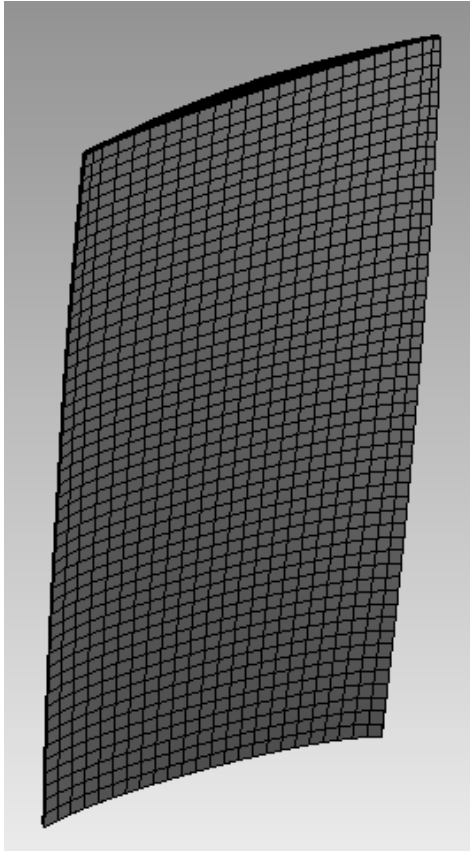
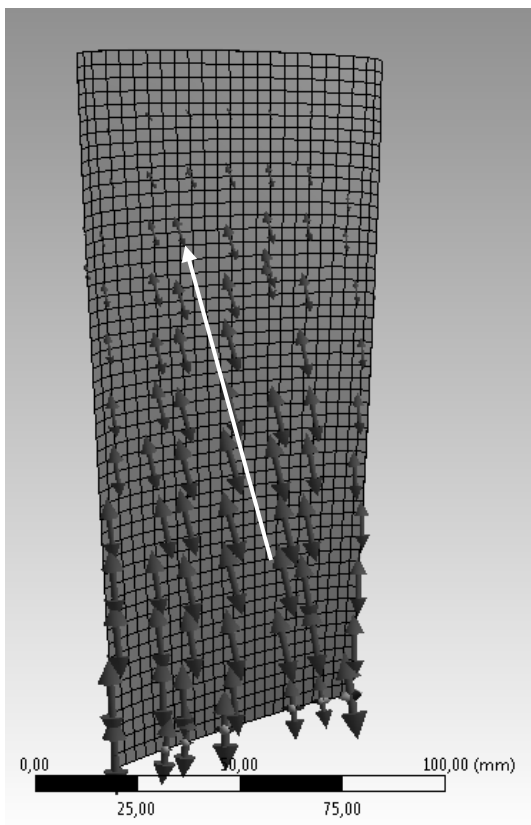
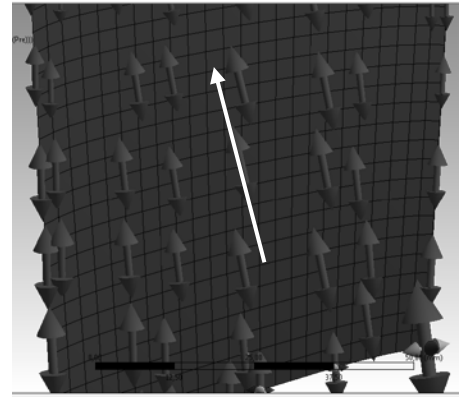


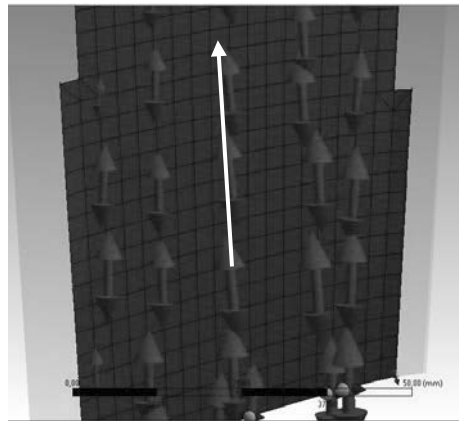
Рис. 1. Модель исследуемой лопатки КНД из изотропного слоистого материала



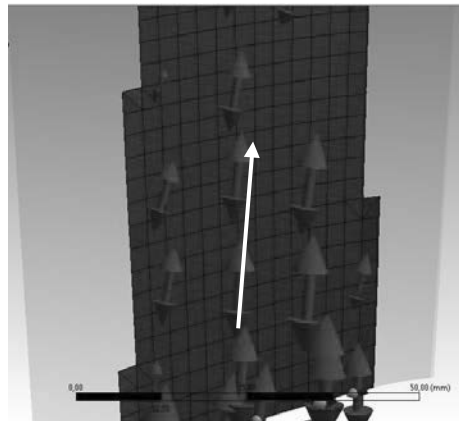
a



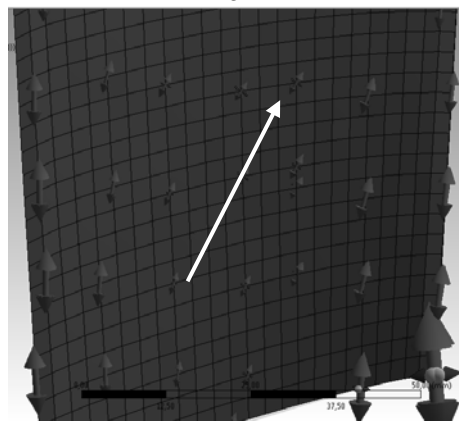
б



в



г



д

Рис. 2. Направления максимальных главных напряжений в слоях изотропной лопатки: *a* – слой № 1 (от спинки корыта); *б* – слой № 5; *в* – слой № 9; *г* – слой № 16; *д* – слой № 24

Далее был выполнен прочностной и деформационный расчет слоистой лопатки (рис. 3).

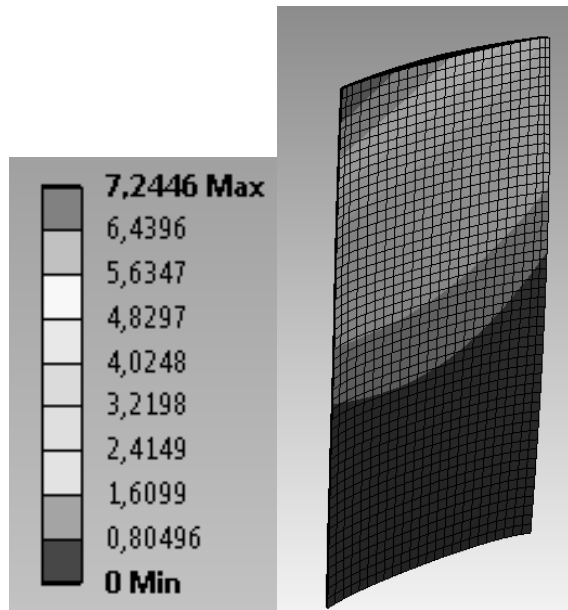


Рис. 3. Картина распределения деформаций по лопатке со структурой, соответствующей близко к симметричной структуре

Также был проведен послойный анализ напряженного состояния на основе критерия прочности Хилла (1) [8, 10].

$$H_{cr} = \left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_1} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2} + \left(\frac{\sigma_2}{\bar{\sigma}_2} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 = 1, \quad (1)$$

здесь $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ – действующие напряжения в главной системе координат однонаправленного слоя; $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\tau}_{12}$ – предельные напряжения в главной системе координат однонаправленного слоя; если критерий Хилла $H_{cr} \geq 1$, то имеет место опасное напряженное состояние в слое.

Величина, обратная критерию Хилла, может служить в качестве расчетного коэффициента запаса прочности (рис. 4):

$$K_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{H_{cr}}}. \quad (2)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ УГЛОВ УКЛАДКИ ОТ РАСЧЕТНЫХ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛОПАТКИ

Рассмотрим влияние изменений углов укладки слоев на напряженно-деформиро-

ванное состояние перьев рабочей лопатки из композиционного материала.

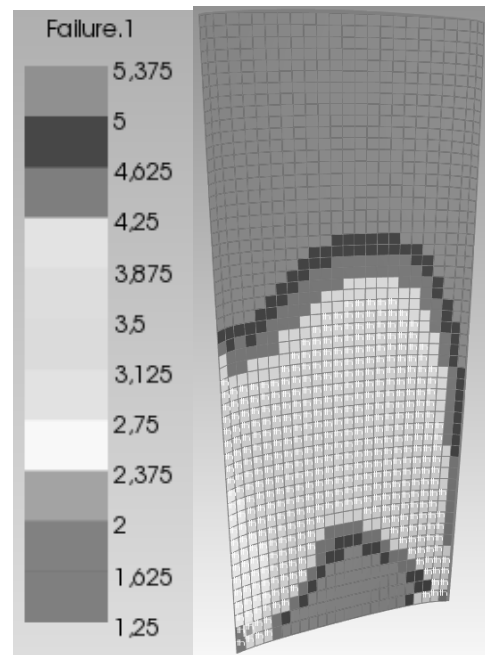


Рис. 4. Картина распределения запаса прочности на основе критерия Хилла по лопатке со структурой, соответствующей близко к симметричной структуре

Было проанализировано несколько моделей пера лопатки в зависимости от исходной геометрии (слоистая с переменной толщиной слоев, слоистая с постоянной толщиной слоев, многообъемная) и характера выкладки слоев (от спинки к корыту, от корыта к спинке, от центрального слоя к спинке и корыту), а также различные варианты материала однонаправленного слоя (композит на основе углеродных волокон и полимерной матрицы, композит на основе углеродных волокон и металлической матрицы) [13, 14].

Для вышеперечисленных моделей угол укладки внешнего слоя изменялся на $\pm 3^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ и анализировалось напряженно-деформированное состояние пера лопатки под действием вышеуказанных силовых факторов.

Напряжения и перемещения в рассматриваемых сечениях анализировались в узлах *A, B* и *D* (рис. 5).

Здесь и далее: суммарные перемещения точек профиля рабочей лопатки рассматривались для периферийного сечения, напряжения – для корневого сечения.

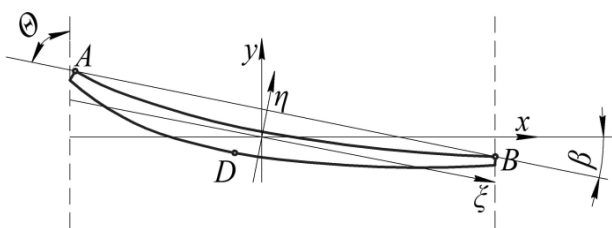


Рис. 5. Характерные точки пера лопатки для анализа напряженно-деформированного состояния

Относительное изменение суммарных перемещений вычислялось по формуле [13]

$$\Delta U_{XOY}^{\text{отн}} = \frac{|U_{XOY}^{\text{исх}} - U_{XOY}^{\text{изм}}|}{U_{XOY}^{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $U_{XOY}^{\text{исх}}$ – суммарные перемещения узла в исходном состоянии; $U_{XOY}^{\text{изм}}$ – суммарные перемещения узла в измененном состоянии.

Качественный характер изменения нормальных напряжений вдоль волокон в узлах наиболее напряженного (корневого) сечения пера рабочей лопатки для одной из моделей представлен на рис. 6. Распределение напряжений в других характерных точках пера лопатки, а также по другим моделям имеет качественно схожий характер.

Рассмотрим влияние изменения структуры, вызванной нарушением последовательности укладки слоев, на перьях роторной композитных лопаток в зависимости от варианта нарушения последовательности укладки.



Рис. 6. Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пера рабочей лопатки в окрестностях узла А от отклонения угла укладки внешнего слоя от изначального состояния

В табл. 1 приведены значения относительного изменения суммарных перемещений в плоскости XOY рассматриваемых узлов перьев рабочей лопатки в зависимости от характера нарушения последовательности укладки слоев по отношению к исходному состоянию.

Также для роторных лопаток была проведена послойная оценка прочности.

В качестве критерия оценки прочности однонаправленного слоя используется критерий Хилла (1) [8, 10] и определяется вид потери несущей способности на основании следующих предположений.

Таблица 1

Относительное изменение суммарных перемещений в плоскости XOY узлов перьев РЛ в зависимости от характера изменения последовательности укладки

	узел	$\Delta U_{XOY}^{\text{отн}}, \%$	
		измен. п.у. сл. № 9 и № 8	измен. п.у. сл. № 8 и № 7
Рабочая лопатка	A	5,5	0,2
	B	2,5	3,5
	D	4,0	1,4

В случае выхода из строя связующего слой считается разгруженным от касательных напряжений и нормальных напряжений и сохраняет несущую способность только в направлении армирующих волокон. Формально это осуществляется присвоением E_2 и G_{12} значений, близких к нулю. Если разрушение слоя произошло по волокну, предполагается, что слой разрушен полностью и константам E_1 , E_2 и G_{12} присваивается практически нулевое значение.

Считается, что для полной потери несущей способности композитом достаточно, чтобы по крайней мере в двух слоях было достигнуто предельное напряжение (деформация) в направлении волокон [5]. Другими авторами указывается, что разрушение слоистой конструкции происходит при разрушении волокон в одном слое или связующего в двух слоях [7, 8].

Критерии Хилла при наличии в структуре отклонений углов укладки для рассматриваемых слоев, рассчитанные

по напряжениям в окрестностях точек A, B, D , для пера рабочей лопатки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка прочности слоев перьев рабочих лопаток по критерию Хилла при наличии в структуре отклонений углов укладки

Перо рабочей лопатки компрессора					
Отклонение угла укладки внешнего слоя	Точка	Критерий Хилла			
		слой			
		n	$n-1$	$n-2$	1
-10	A	0,45	0,62	0,59	0,16
	B	0,43	0,42	0,33	0,27
	D	0,13	0,10	0,10	0,02
0	A	0,33	0,57	0,61	0,26
	B	0,31	0,47	0,37	0,32
	D	0,13	0,11	0,12	0,03
10	A	0,22	0,49	0,59	0,42
	B	0,18	0,49	0,40	0,37
	D	0,11	0,12	0,14	0,03

Расчетные коэффициенты запаса прочности (2) при наличии в структуре отклонений углов укладки для рассматриваемых слоев приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетный коэффициент запаса прочности слоев перьев рабочих лопаток при наличии в структуре отклонений углов укладки

Перо рабочей лопатки компрессора					
Отклонение угла укладки внешнего слоя	Точка	Коэффициент запаса K_{σ}			
		слой			
		n	$n-1$	$n-2$	1
-10	A	1,49	1,27	1,31	2,51
	B	1,53	1,54	1,75	1,94
	D	2,74	3,21	3,13	6,89
0	A	1,73	1,32	1,28	1,95
	B	1,79	1,46	1,65	1,77
	D	2,79	3,00	2,87	6,22
10	A	2,14	1,42	1,30	1,55
	B	2,33	1,43	1,58	1,65
	D	3,00	2,90	2,70	5,87

Относительное изменение коэффициента запаса прочности при наличии отклонения структуры можно подсчитать по формуле:

$$\Delta K_{\sigma}^{\text{отн}} = \frac{|K_{\sigma}^{\text{исх}} - K_{\sigma}^{\text{изм}}|}{K_{\sigma}^{\text{изм}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $K_{\sigma}^{\text{изм}}$ – коэффициент запаса прочности в исходном состоянии; $K_{\sigma}^{\text{исх}}$ – коэффициент запаса прочности в измененном состоянии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Направление главных максимальных напряжений в каждом слое модельной лопатки является основанием для выбора углов укладки однонаправленных слоев в проектируемой лопатке. Для проектирования многослойной структуры лопатки желательно иметь симметричную структуру относительно поверхности лопатки, проходящей через приведенный центр тяжести сечения, а также обеспечить условие, что если в структуре есть слои с углом укладки $+\varphi$, то должны быть слои с углом укладки $-\varphi$. Но выполнить строго это условие для лопатки не представляется возможным из-за неодинаковости площадей слоев по толщине. Для компенсации деформации, возникшей из-за невозможности соблюдения вышеназванных условия, изменяют углы укладки одного или нескольких слоев в зависимости от структуры.

В среднем по различным моделям при максимальном отклонении угла укладки внешнего слоя на 10° относительное изменение суммарных перемещений составило $\Delta U_{\text{ХОУ}}^{\text{отн}} \approx 5 \div 6\%$.

Из рис. 6 видно, что отклонения угла укладки одного из слоев лопатки вызывают изменение напряженного состояния не только в слое с нарушенной ориентацией, но и в других располагающихся по соседству слоях. В некоторых случаях даже имеет место смена знака действующих напряжений (в данном конкретном случае, например, появление сжимающих напряжений вместо первоначальных растягивающих в слое №7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– Структурно-функциональный анализ внутренней организации композиционного

материала является важным инструментом при создании композиционных материалов и конструкций из них.

– Использование модельного элемента (лопатки) из изотропного слоистого материала, имеющего аналогичные геометрические параметры, позволяет спроектировать структуру (углы и последовательность укладки), отвечающую техническим требованиям. Путем изменения внутренней организации структуры (армирующей и матричной компонентов, числа слоев, углов и последовательности их укладки, толщин слоев, гибридности структуры) создаются возможности проектирования изделий с необходимыми с точки зрения эксплуатационных характеристик свойствами.

– Технологические отклонения структуры композитной лопатки могут существенно изменять ее напряженное состояние и деформационное поведение, что в свою очередь может ухудшить эффективность газодинамических процессов обтекания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веселов С. И., Карташов Г. Г.** Композиционные материалы в авиадвигателестроении: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 122 с. [S. I. Veselov, G. G. Kartashov, *Composite materials in aviation engine building industry*, (in Russian). Kuybyshev: KuAI, 1986.]
2. **Аболиньш Д. С.** Тензор податливости однонаправленно армированного упругого материала // *Механика полимеров*. 1965. № 4. С. 47–52. [D. S. Abolinsh, "Compliance tensor of unidirectional elastic material", (in Russian), in *Mehanika polimerov*, no. 4, pp. 47-52, 1965.]
3. **Ванин Г. А.** Микромеханика композиционных материалов. Киев: Наукова думка, 1985. 302 с. [G. A. Vanin, *Micromechanics of composite materials*, (in Russian). Kiev: Naukova dumka, 1985.]
4. **Васильев В. В.** Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с. [V. V. Vasylyev, *Mechanics of constructions made of composite materials*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1988.]
5. **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*. Riga: Zinatne, 1972.]
6. **Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А.** Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 144 с. [I. F. Obratsov, V. V. Vasilyev, V. A. Bunakov, *Optimal reinforcing of rotational shells made of composite materials*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1977.]
7. **Скудра А. М., Булавс Ф. Я.** Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с. [A. M. Skudra, F. Y. Bulavs, *Structural theory of reinforced plastics*. Riga: Zinatne, 1978.]
8. **Хилл Р.** Теория механических свойств волокнистых композиционных материалов // *Механика*. Сб. переводов. 1966. № 2. С. 131–149. [R. Hill, "Theory of mechanical properties of fibrous composite materials", (in Russian), in *Mehanika. Sb. Perevodov*, no. 2, pp. 131-149, 1966.]
9. **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, "Creation of parts and assemblies of aircraft engines using composite materials based on innovative solutions", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 23, no. 2 (84), pp. 33-44, 2019.]
10. **Жернаков В. С., Первушин Ю. С., Соловьев П. В.** Исследование упругих характеристик углепластиков с 3D структурой // *Письма о материалах*. 2019. № 9 (2). С. 185–190. [V. S. Zhernakov, Y. S. Pervushin, P. V. Solovyev, "The study of the elastic characteristics of carbon fiber with a 3D structure", (in Russian), in *Letters on Materials*, no. 9 (2), pp. 185-190, 2019.]
11. **Первушин Ю. С., Жернаков В. С.** Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2008. 303 с. [Y. S. Pervushin, V. S. Zhernakov, *Fundamentals of mechanics, design and fabrication technology of layered composite materials products*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2008.]
12. **Скудра А. М., Булавс Ф. Я.** Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 213 с. [A. M. Skudra, F. Y. Bulavs, *Strength of reinforced plastics*. Moscow: Himiya, 1982.]
13. **Первушин Ю. С., Соловьев П. В.** Особенности напряженного и деформированного состояний лопатки компрессора ГТД из несбалансированных композитов // *Вестник УГАТУ*. 2013. Т. 17, № 3 (56). С. 253–259. [Y. S. Pervushin, P. V. Solovyov, "Features of the stressed and deformed states of the GTE compressor blade from unbalanced composites", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 3 (56), pp. 253-259, 2013.]
14. **Жернаков В. С., Первушин Ю. С., Соловьев П. В.** Влияние структуры композитной лопатки компрессора центробежного типа на ее напряженно-деформированное состояние // *Вестник УГАТУ*. 2017. Т. 21, № 3 (77). С. 19–25. [V. S. Zhernakov, Y. S. Pervushin, P. V. Solovyov, "Centrifugal type compressor composite blade structure influence on its stress-strain state", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 3 (77), pp. 19-25, 2017.]

ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, проф., зав. каф. сопр. материалов. Дипл. инженер-механик (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.

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. мех-ки и термомех-ки композиц. материалов.

СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович, доц. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009), дипл. канд. техн. наук (УГАТУ, 2016) Иссл. в обл. мех-ки и технологии изгот. издел. из композиц. материалов.

METADATA

Title: Functional analysis of the structure morphology and the stress state of the constructions made of composite materials.

Authors: V. S. Zhernakov¹, Y. S. Pervushin², P. V. Soloviev³.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹zhvs@rb.ru, ²pcomposit@mail.ru,
³paulnightingale@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 4 (86), pp. 18-25, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article presents the results of structural and functional analysis of the morphology and stress state of structural elements made of layered composite materials (GTE compressor blades). Functional analysis consists of an analysis of a unidirectional layer and an analysis of a layered composite, which includes an analysis of the layers parameters (thickness, angle and sequence of laying, hybridity). It is very important to identify the functionality of each layer – by what stress state it will be loaded. It is proposed to determine these functions from a stress state layer-by-layer analysis of the designed element made of an isotropic layered material. The results of the study of the blade structure technological deviations influence on its stress state and deformation behavior are presented.

Key words: composite; layer; stress; deformation; adaptability; structural and functional analysis; blade; structure; fiber; matrix.

About authors:

ZHERNAKOV, Vladimir Sergeevich, Prof., Head of a Chair of Dept. of Strength of Materials, Dipl. Engineer (Ufa Aviation Institute, 1967). Dr. of Tech. Sci. (Ufa State Aviation Technical, 1992). Honored Science Worker of RF. Academic of Science Academy of Bashkortostan Republic. Researches in area of deformable body mechanics.

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

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