

УДК 539.374.519.8

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

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

<sup>1</sup>zhvs@rb.ru, <sup>2</sup>pcomposit@mail.ru, <sup>3</sup>paulnightingale@mail.ru

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

Поступила в редакцию 08.12.2017

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние изменений структуры пера композитной лопатки центробежного компрессора, вызванных технологическими отклонениями углов укладки слоев, а также нарушением последовательности их укладки на этапе изготовления, на ее напряженное состояние и деформационное поведение. Результаты моделирования позволяют определить границы допустимых технологических отклонений структуры композитной лопатки от расчетной, при которых влияние отклонений на напряженно-деформированное состояние лопатки находится в допустимых пределах.

**Ключевые слова:** композит; слой; напряжение; деформация; центробежный компрессор; лопатка; структура; волокно; матрица; укладка.

### ВВЕДЕНИЕ

Физико-механические характеристики многослойного композиционного материала (КМ) полностью зависят от его структуры. Структура композита обуславливает его упругие, прочностные, теплофизические свойства и т.д.

При практической реализации изделия из многослойных КМ проектировщики стремятся создать так называемую сбалансированную структуру.

Под *сбалансированной* понимается структура слоистого композита, отвечающая следующим требованиям:

- симметрии слоев относительно срединной поверхности слоистого пакета;
- каждому слою с углом укладки  $+\varphi$  должен соответствовать слой с углом  $-\varphi$ ,

расположенный на одинаковом расстоянии от срединной поверхности.

Фактически удовлетворить вышеуказанным требованиям сбалансированности можно лишь в двух случаях: при однонаправленной укладке слоев (все слои под  $0^\circ$ ) и при укладке слоев исключительно под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . При использовании в структуре слоев с углами укладки, отличными от вышеупомянутых, удовлетворение требованию симметричности исключает удовлетворение условию обратной укладки ( $\pm\varphi$ ). Поэтому уже на этапе проектирования большинство композитных конструкций имеют заведомую несбалансированность структуры.

Изменение расчетной геометрии пера композитной лопатки компрессора (центробежного или осевого) в результате неучтенных деформаций, вызванных отклонением структуры укладки слоев от заданной, приводит к снижению аэродинамических характеристик ступени, изменению

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Башкортостан в рамках научного проекта № 17-48-020978 p\_a.

напряженного состояния лопатки и снижению КПД ступени.

Этап определения допустимых технологических отклонений структуры композита (углов укладки, последовательности укладки, наличия разнотолщинности слоев и т.д.) должен входить в комплексное решение задачи при проектировании лопаток центробежных и осевых компрессоров из композитных материалов.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теоретические основы расчета лопаток компрессоров центробежного типа, а также анализ граничных условий и  $S$  силовых факторов, действующих на них, представлены в работах [1, 2].

В качестве материала лопатки выбран композит на основе однонаправленной углеродной ленты УОЛ-300Р и полиимидного термореактивного связующего СП-97.

Механические характеристики углеродной ленты УОЛ-300Р: плотность  $\rho_b = 1,7 \text{ г/см}^3$ ; прочность на растяжение  $\bar{\sigma}_{b1}^+ = 2750 \text{ МПа}$ ; модуль упругости вдоль волокон  $E_{b1} = 210 \text{ ГПа}$ ; модуль упругости поперек волокон  $E_{b2} = 8 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu_{b12} = 0,15$ ; коэффициент термического расширения вдоль волокон  $\alpha_{b1} = -0,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ; коэффициент термического расширения поперек волокон  $\alpha_{b2} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ; предельное удлинение при растяжении  $\bar{\epsilon}_{b1}^+ = 1$ .

Механические характеристики связующего СП-97: плотность  $\rho_b = 1,2 \text{ г/см}^3$ ; прочность на растяжение,  $\bar{\sigma}_m^+ = 114 \text{ МПа}$ ; модуль упругости  $E_m = 4,2 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu_m = 0,3$ ; коэффициент термического расширения  $\alpha_m = 50,4 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ; предельное удлинение при растяжении  $\bar{\epsilon}_m^+ = 5$ .

Температурные испытания образцов из данного композиционного материала проводились при  $T=285^\circ\text{C}$ . Упругие и прочностные свойства КМ, полученные на основании теоретических зависимостей [3] и

механических испытаний при нормальной и повышенной температуре, представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Свойства композитного углепластика при нормальной и повышенной температурах

упругие характеристики однонаправленного слоя			
Характеристика	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 285^\circ\text{C}$	Единицы измерения
$E_1$	127,7	119	ГПа
$E_2$	6,2	3,7	ГПа
$G_{12}$	4,3	3,2	ГПа
$\nu_{12}$	0,226	0,226	
$\nu_{21}$	0,011	0,011	
$\rho$	1,5	1,5	$\text{г/см}^3$

### теплофизические свойства однонаправленного слоя

Характеристика	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 285^\circ\text{C}$	Единицы измерения
$\alpha_1$	$-2,8 \cdot 10^{-8}$	$-2,8 \cdot 10^{-8}$	1/град
$\alpha_2$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1/град

### прочность однонаправленного слоя

Характеристика	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 285^\circ\text{C}$	Единицы измерения
$\bar{\sigma}_1^+$	1,4	1,16	ГПа
$\bar{\sigma}_1^-$	0,95	0,47	ГПа
$\bar{\sigma}_2^+$	93,1	65,2	МПа
$\bar{\sigma}_2^-$	93,1	65,2	МПа
$\bar{\tau}_{12}$	52,4	26,3	МПа

### ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА

На лопатки компрессора центробежного типа действуют следующие силовые факторы:

1. Центробежные силы собственной массы лопатки от вращения компрессора со скоростью  $n$ , об/мин – 40000.
2. Давление воздуха в межлопаточном канале при степени повышения давления в центробежном колесе компрессора, равной  $\pi = 10$ .

Основные аспекты газодинамического расчета представлены в работе [2]. Для учета межлопаточного давления в качестве исходных данных для прочностного ана-

лиза были приняты следующие параметры: статическое давление на входе в рабочее колесо  $p_1 = 101325$  Па; статическое давление на выходе из рабочего колеса  $p_2 = 540$  кПа; избыточное статическое давление на спинке  $p_{сп}$  лопатки изменяется от 0 и до 405 кПа, избыточное полное давление на спинке  $p_{сп}^*$  изменяется от 0 до 1395 кПа; избыточное статическое давление на корыте  $p_{кор}$  лопатки изменяется от 0 и до 477 кПа, избыточное полное давление на корыте  $p_{кор}^*$  изменяется от 0 до 1620 кПа; максимальный перепад давления между корытом и спинкой лопатки составляет до  $\Delta p^* = 2,25$  атм.

#### РАСЧЕТ НДС КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Конечно-элементная модель лопатки центробежного компрессора, моделируемая в программном комплексе ANSYS Workbench 14.5, представлена на рис. 1. Непосредственно моделирование многослойных композиционных лопаток производилось в модуле ANSYS Composite Pre-Post. Количество элементов в модели – 5625, количество узлов в модели – 5928.

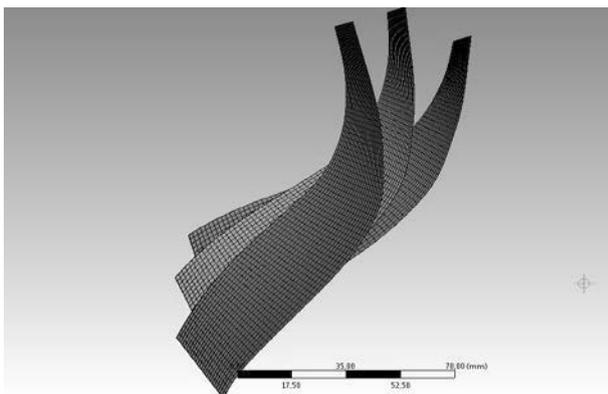


Рис. 1. Конечно-элементная модель центробежного колеса

Материалом лопаток является композитный материал на основе углеродной ленты УОЛ-300Р и связующего СП-97. Свойства данного материала при нормальной и повышенных температурах приведены выше в табл. 1.

Структура укладки слоев в лопатке –  $(90^\circ/0^\circ)_{11}/90^\circ$ . Количество слоев в лопатке  $n = 23$ .

Вопрос выбора структуры композитной лопатки обусловлен тем, что схема укладки должна обеспечивать оптимальное восприятие конструкцией внешней нагрузки. Для лопатки основными нагрузками являются центробежная и газовая силы, которые вызывают растяжение и изгиб лопатки соответственно. Для восприятия таких нагрузок наиболее благоприятна схема перекрестного армирования  $90^\circ/0^\circ$ . Здесь  $s$  обозначает симметрию структуры укладки.

Оценка несущей способности лопаток производилась с помощью коэффициента запаса, который вычисляется с использованием критерия Хилла в двухмерной постановке:

$$RF = (IRF)^{-1} = \left( \sqrt{H_{cr}} \right)^{-1} = \left( \sqrt{\left( \frac{\sigma_1}{X} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{XY} + \left( \frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2} \right)^{-1},$$

где  $X$ ,  $Y$  и  $S$  – предельные напряжения в условиях одноосного нагружения однонаправленного слоя в направлении параллельно и перпендикулярно волокнам и при сдвиге в плоскости слоя,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  действующие напряжения в направлении главных осей упругости однонаправленного слоя (см. табл. 1).

На рис. 2 показана деформационная картина лопаток центробежного компрессора под действием центробежных и газовых сил.

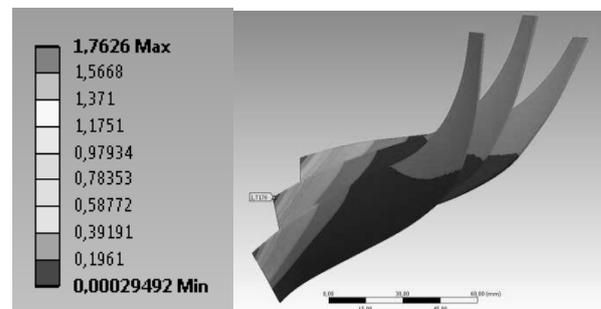
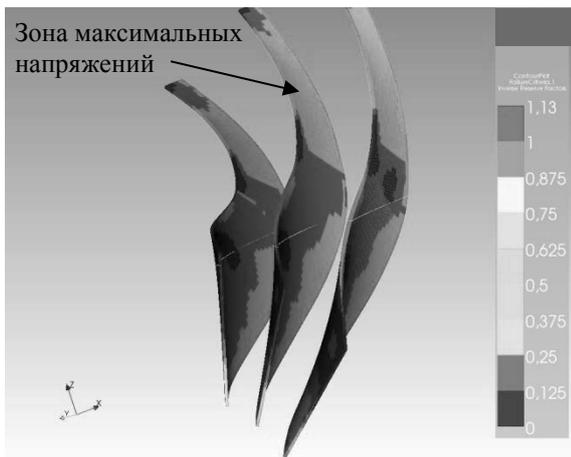


Рис. 2. Деформационная картина лопаток центробежного компрессора из композиционного материала

Максимальные перемещения имеют место на верхней кромке лопатки и составляют  $U_{sum} = 1,71$  мм. По величине обратного коэффициента запаса  $IRF$  можно установить расположение наиболее нагруженной зоны лопатки (рис. 3).

За исключением зон контакта лопатки с диском, где имеет место влияние граничных условий закрепления, величина обратного коэффициента запаса  $IRF$  не превышает 0,6, что соответствует запасу прочности  $RF$  не менее 1,67.



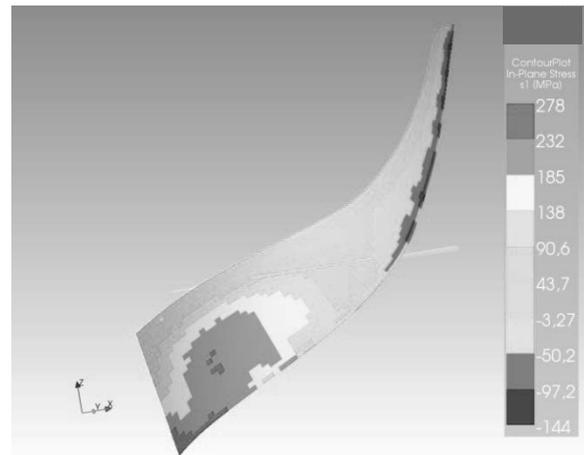
**Рис. 3.** Определение зоны максимальных напряжений по обратному коэффициенту запаса  $IRF$  в лопатке компрессора со структурой  $(90^\circ/0^\circ)_s$

При  $IRF \geq 1$  имеет место разрушение слоя. При  $IRF < 1$  прочность слоя обеспечивается. Механизм разрушения слоя определяется максимумом трех отношений:

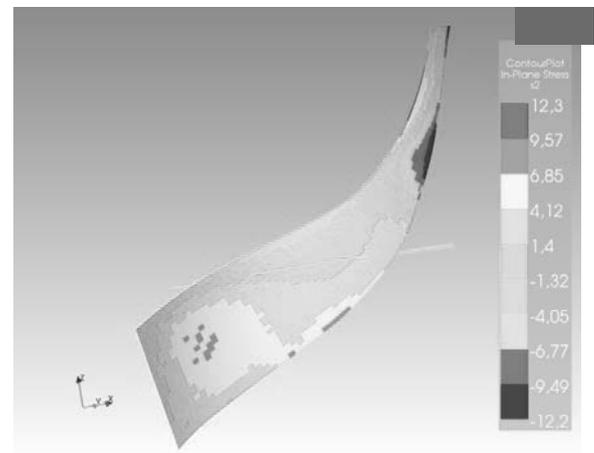
$$\max\left(\frac{\sigma_1}{X}; \frac{\sigma_2}{Y}; \frac{\tau_{12}}{S}\right),$$

если первое выражение максимальное, то происходит разрушение волокон, если второе – разрушение матрицы от поперечного воздействия, если третье – разрушение матрицы от сдвиговых напряжений.

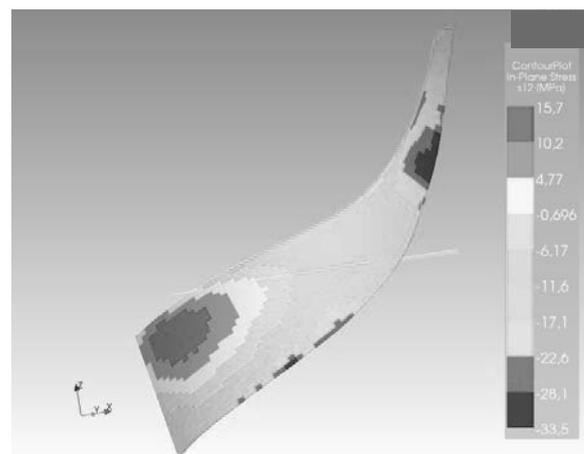
На рис. 4–6 представлены нормальные напряжения вдоль и поперек волокон, а также внутрислойные касательные напряжения в наиболее нагруженном внешнем слое (слой №1) лопатки с углом укладки  $90^\circ$ .



**Рис. 4.** Распределение нормальных напряжений вдоль волокон  $\sigma_1$  в слое №1 (МПа)



**Рис. 5.** Распределение нормальных напряжений поперек волокон  $\sigma_2$  в слое №2 (МПа)



**Рис. 6.** Распределение внутрислойных касательных напряжений вдоль волокон  $\tau_{12}$  в слое №1 (МПа)

Таким образом, нормальные напряжения вдоль волокон в наиболее нагруженном слое достигают  $\sigma_1=278$  МПа, напряжения поперек волокон  $\sigma_2=12$  МПа, внутрислойные касательные напряжения  $\tau_{12}=16$  МПа, минимальный запас прочности  $RF = \frac{1}{IRF}$  для структуры ( $90^\circ/0^\circ$ ) составляет около 1,7.

#### РАСЧЕТ НДС КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

На рис. 7 показана деформационная картина лопатки центробежного компрессора под действием центробежных и газовых сил с учетом влияния температуры на упругие и прочностные свойства материала и температурных деформаций. Данные по распределению температуры вдоль втулки рабочего колеса: температура на входе в колесо  $T=20^\circ\text{C}$ ; температура на выходе из колеса  $T=285^\circ\text{C}$ . Распределение температуры вдоль лопатки принято линейным.

Максимальные перемещения имеют место на верхней кромке лопатки и составляют  $U_{sum}=2,09$  мм. На рис. 8 приведено расположение наиболее нагруженных зон лопатки на основе обратного коэффициента запаса  $IRF$  в лопатке при структуре ( $90/0$ ) $^\circ$ .

На рис. 9–11 представлены напряжения вдоль волокон, поперек волокон и сдвиговые напряжения при внутрислойном сдвиге в наиболее напряженном внешнем слое №1 с укладкой  $90^\circ$ .

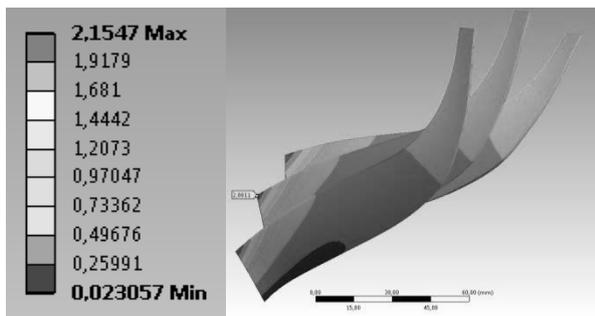


Рис. 7. Деформационная картина лопаток центробежного компрессора из композиционного материала  $t=285^\circ\text{C}$



Рис. 8. Определение зоны максимальных напряжений по обратному коэффициенту запаса  $IRF$  в лопатке центробежного компрессора со структурой ( $90^\circ/0^\circ$ ) при повышенной температуре

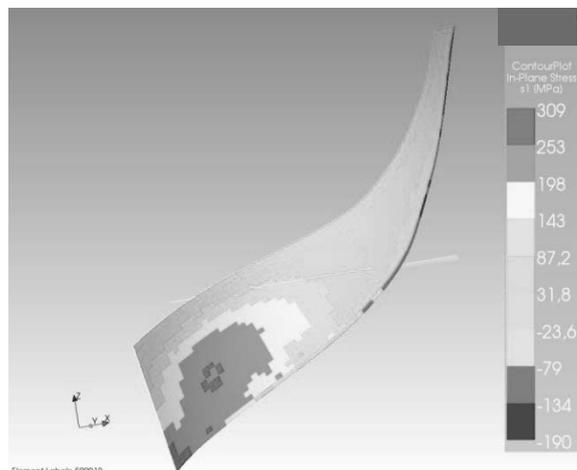


Рис. 9. Распределение нормальных напряжений вдоль волокон  $\sigma_1$  в слое №1 (МПа)

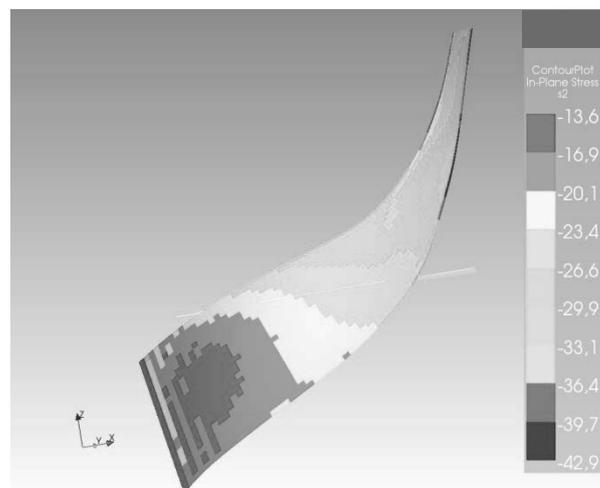
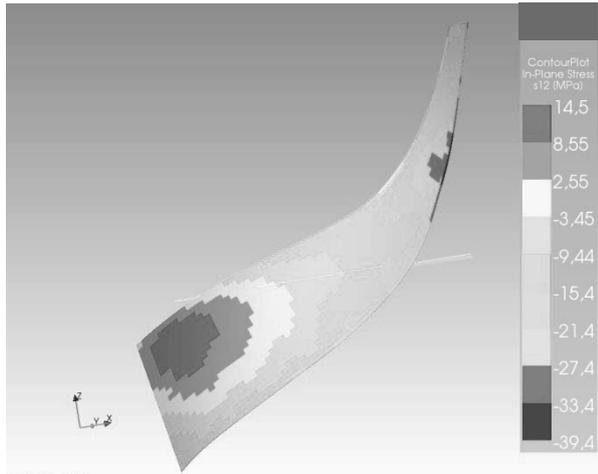


Рис. 10. Распределение нормальных напряжений поперек волокон  $\sigma_2$  в слое №1 (МПа)



**Рис. 11.** Распределение внутрислойных касательных напряжений вдоль волокон  $\tau_{12}$  в слое №1 (МПа)

Нормальные напряжения вдоль волокон достигают  $\sigma_1 = 309$  МПа, напряжения поперек волокон  $\sigma_2 = -36$  МПа, внутрислойные касательные напряжения  $\tau_{12} = 26$  МПа.

Минимальный коэффициент запаса прочности составляет  $RF = 1,42$ .

#### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСБАЛАНСИРОВАННОСТИ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА ЕЕ НДС

Рассмотрим влияние несбалансированности, вызванной технологическими отклонениями углов укладки слоев и нарушением последовательности их укладки на напряженное состояние и деформационное поведение лопатки центробежного компрессора из композиционного материала.

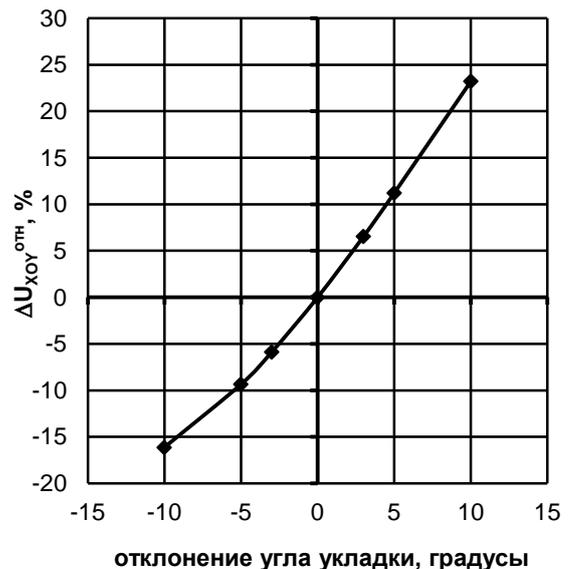
Проанализируем влияние несбалансированности, вызванной отклонениями угла укладки внешнего слоя лопатки (слой №1) на ее напряженно-деформированное состояние. Величины отклонения данного слоя:  $\pm 3^\circ; \pm 5^\circ; \pm 10^\circ$ .

На рис. 12 представлено относительное изменение суммарных перемещений входной верхней кромки лопатки (обозначим ее точкой А) в плоскости  $XOY$  [4].

Относительное изменение суммарных перемещений вычислялось по формуле [4]

$$\Delta U_{XOY}^{\text{отн}} = \frac{U_{XOY}^{\text{сбал}} - U_{XOY}^{\text{несбал}}}{U_{XOY}^{\text{сбал}}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{XOY}^{\text{сбал}}$  – перемещения узла лопатки в сбалансированном состоянии, а  $U_{XOY}^{\text{несбал}}$  – перемещения узла лопатки в несбалансированном состоянии.

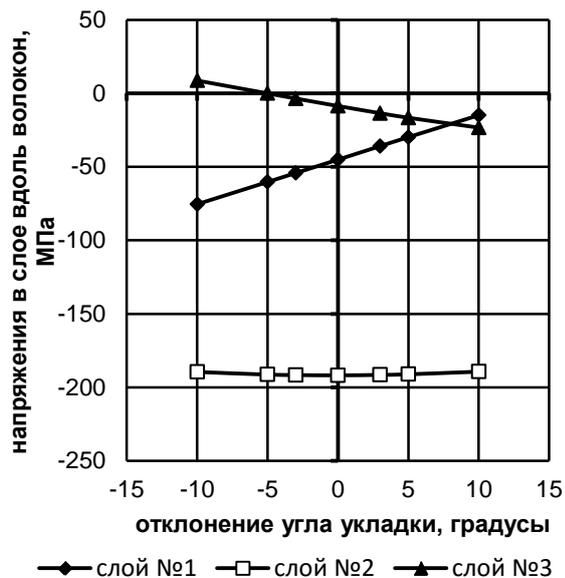


**Рис. 12.** Относительное изменение суммарных перемещений узла А лопатки центробежного компрессора из углепластика в зависимости от отклонения угла укладки слоя №1 от сбалансированного состояния ( $90^\circ$ )

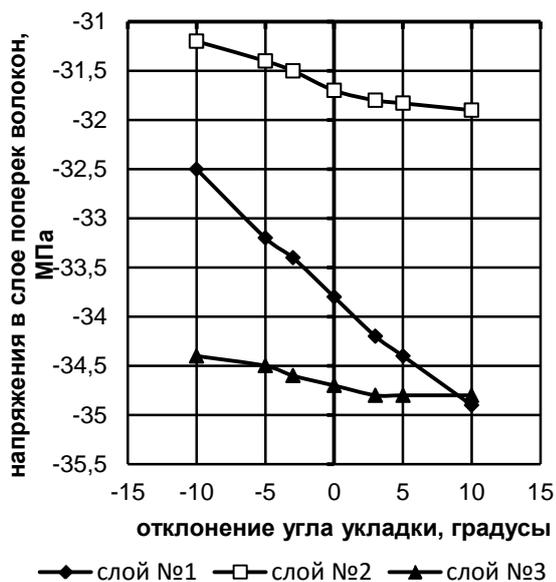
Из графика видно, что при отклонении угла укладки внешнего слоя на величину более  $5^\circ$  величина изменения деформированного состояния  $\Delta U_{XOY}^{\text{отн}}$  составляет до 24%.

На рис. 13–15 представлены изменения напряжений в главных осях упругости однонаправленных слоев при наличии отклонений угла укладки слоя №1 композитной лопатки.

Графики на рис. 13–15 свидетельствуют о существенном изменении напряженного состояния в слоях лопатки (до 60%) при наличии отклонений угла укладки внешнего слоя.



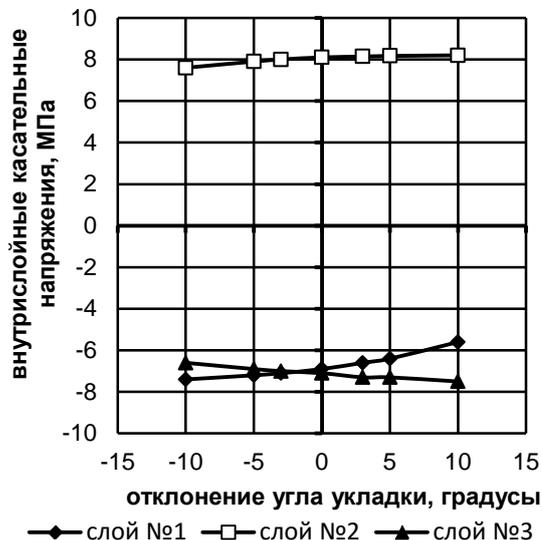
**Рис. 13.** Зависимость изменения нормальных напряжений вдоль волокон  $\sigma_1$  в слоях лопатки центробежного компрессора от отклонения угла укладки слоя №1



**Рис. 14.** Зависимость изменения нормальных напряжений поперек волокон  $\sigma_2$  в слоях лопатки центробежного компрессора от отклонения угла укладки слоя №1

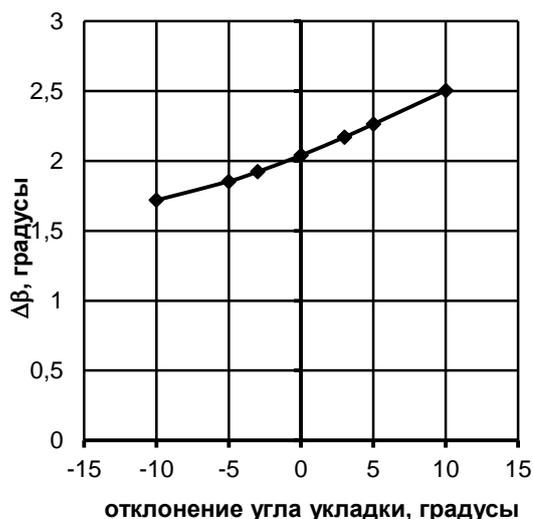
На рис. 16 представлено изменение угла установки  $\Delta\beta$  входной кромки лопатки в зависимости от величины отклонения угла укладки слоя №1; здесь  $\Delta\beta = \beta^{\text{расч}} - \beta^{\text{факт}}$  – изменение угла установ-

ки сечения лопатки,  $\beta^{\text{расч}}$  – расчетный угол установки сечения лопатки, заложенный проектировщиком,  $\beta^{\text{факт}}$  – фактический угол установки сечения лопатки в деформированном состоянии [4].



**Рис. 15.** Зависимость изменения внутрислойных касательных напряжений  $\tau_{12}$  в слоях лопатки центробежного компрессора от отклонения угла укладки слоя №1

Рис. 16 свидетельствует о наличии изменения угла установки входной кромки лопатки центробежного компрессора вследствие несбалансированности структуры. При максимальном отклонении угла укладки  $+10^\circ$  величина  $\Delta\beta$  достигает  $2,5^\circ$ .

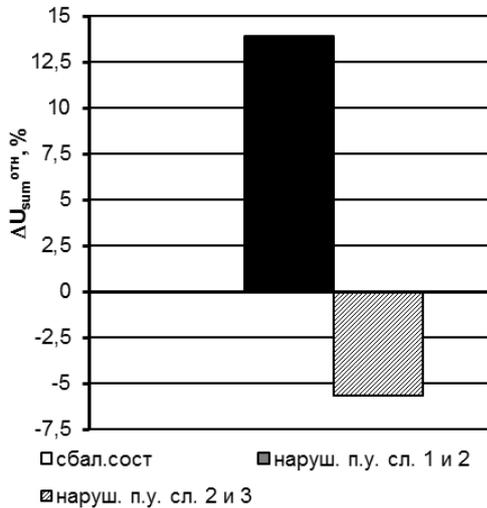


**Рис. 16.** Зависимость изменения угла установки входной кромки лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя №1

Рис. 16 также показывает, что, введя изначальную искусственную несбалансированность структуры ( $\leq -10^\circ$ ), можно уменьшить  $\Delta\beta$  ( $\leq 1,5^\circ$ ). Таким образом, управляя несбалансированностью структуры, можно получить требуемые эксплуатационные параметры конструкции.

Рассмотрим влияние несбалансированности структуры центробежной лопатки, вызванной *нарушением заданной последовательности укладки*, на НДС лопатки.

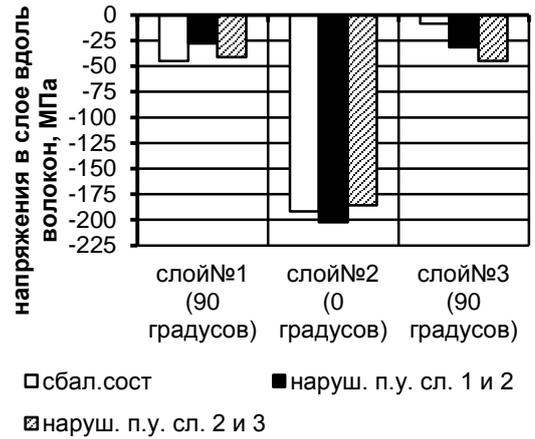
На рис. 17 представлено относительное изменение суммарных перемещений входной верхней кромки лопатки (точка А) в плоскости  $XOY$  [4]. Относительное изменение суммарных перемещений вычислялось по указанной ранее формуле.



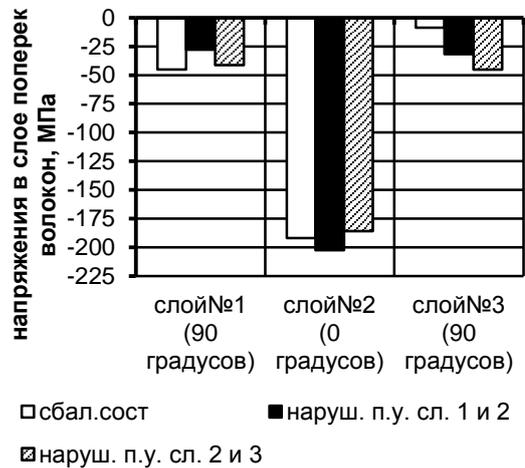
**Рис. 17.** Зависимость относительных суммарных перемещений узла А лопатки центробежного компрессора из углепластика от нарушения последовательности укладки

Из графика видно, что при нарушении последовательности укладки величина изменения деформированного состояния  $\Delta U_{XOY}^{отн.}$  составляет около 14%.

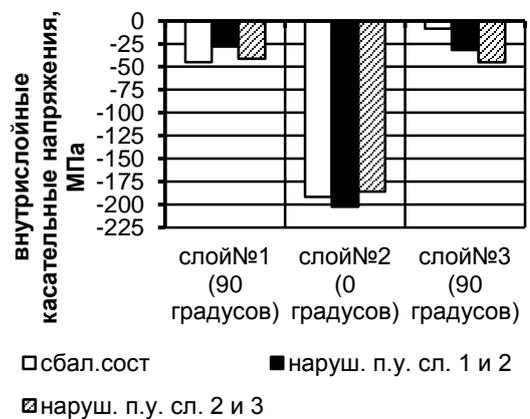
На рис. 18–20 представлены изменения напряжений в главных осях упругости однонаправленных слоев при нарушении последовательности укладки. Графики свидетельствуют о значительном изменении напряженного состояния в слоях лопатки (до 40%) при наличии нарушения последовательности укладки двух внешних слоев.



**Рис. 18.** Зависимость изменения нормальных напряжений вдоль волокон  $\sigma_1$  в слоях лопатки центробежного компрессора от нарушения последовательности укладки



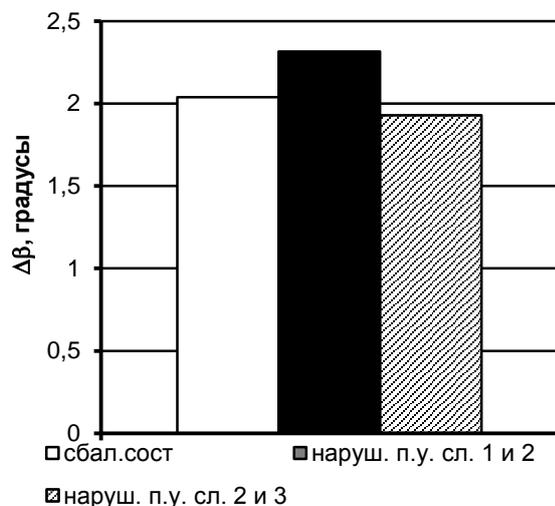
**Рис. 19.** Зависимость изменения нормальных напряжений поперек волокон  $\sigma_2$  в слоях лопатки от нарушения последовательности укладки



**Рис. 20.** Зависимость изменения внутрислойных касательных напряжений  $\tau_{12}$  в слоях лопатки центробежного компрессора от нарушения последовательности укладки

На рис. 21 представлено изменение угла установки  $\Delta\beta$  входной кромки лопатки в зависимости от варианта нарушения последовательности укладки.

Рис. 21 свидетельствует о наличии изменения угла установки входной лопатки центробежного компрессора вследствие несбалансированности структуры, вызванной нарушением заданной последовательности укладки слоев. В зависимости от характера нарушения последовательности укладки величина  $\Delta\beta$  может достигать до  $2,3^\circ$ .



**Рис. 21.** Зависимость изменения угла установки входной кромки лопатки от нарушения последовательности укладки

Таким образом, возможные нарушения структуры композитной лопатки (отклонения углов укладки, нарушение последовательности укладки) могут привести к изменению деформированного состояния до 20%, напряженного состояния до 50%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отклонение от первоначальной структуры лопаток центробежного компрессора, вызванное технологическими отклонениями углов укладки слоев от расчетных, вызывает изменение как деформационного поведения, так и напряженного состояния. Величина изменения НДС зависит от значений отклонений углов укладки, числа слоев, вида нагружения и граничных условий закрепления лопаток.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что при отклонении угла укладки внешнего слоя на величину

более  $5^\circ$  величина изменения деформированного состояния  $\Delta U_{x \text{ отн } oy}$  составляет до 24%. Изменение напряженного состояния в слоях лопатки в этом случае весьма существенно (до 60%).

Изменения угла установки на входе лопатки  $\Delta\beta$  центробежного компрессора вследствие изменения структуры достигает  $2,3^\circ$ .

Введя изначальную искусственную несбалансированность структуры (отклонение угла укладки наружного слоя на  $-10^\circ$ ), можно уменьшить  $\Delta\beta$  ( $< 1^\circ$ ), тем самым обеспечив требуемые газодинамические параметры обтекания лопатки на рабочем режиме.

Влияние изменения структуры, вызванного нарушением последовательности укладки слоев, на деформационное поведение составляет около 20%, на напряженное состояние – около 50%; изменение угла установки лопатки  $\Delta\beta$  в этом случае достигает  $2,3^\circ$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раер Г. А. Динамика и прочность центробежных компрессорных машин. Л.: Машиностроение, 1968. 260 с. [ G. A. Raer. *Dynamics and strength of centrifugal compressor machines*. L.: Mashinostroenie, 1968. ]
2. 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. Soloviev, "Influence of the centrifugal compressor composite blade structure on its stress-strain state", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 3 (77), pp. 19-25, 2017. ]
3. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Молодцов Г. А., [и др.] М.: Машиностроение, 2000. 352 с. [ G. A. Molodtsov, et al. *Form-stable and intelligent constructions from composite materials* / M.: Mashinostroenie, 2000. ]
4. 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. Soloviev, "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. ]

### 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, член-корр. 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. к.т.н. (УГАТУ, 2016) Иссл. в обл. мех-ки и технологии изгот. издел. из композиц. материалов.

#### METADATA

**Title:** influence of technological deviations in structure of centrifugal compressor composite blade on its stress-strain state.

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

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

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

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 1 (79), pp. 10-19, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article examines the influence of changes in structure of the centrifugal compressor composite blade caused by technological deviations in the ply stacking angles, as well as by violation of ply stacking sequence at the manufacturing stage, on its stress state and deformation behavior. The results of modeling allow to determine the limits of the acceptable technological deviations of composite blade structure in comparison with the calculated one, which provides deviations influence on the blade stress-strain state within acceptable limits.

**Key words:** composite; layer; stress; deformation; centrifugal compressor; blade; structure; fiber; matrix; stackup.

#### 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. Member-correspondent 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.