

Ю. С. Первушин, П. В. Соловьев

## ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЙ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД ИЗ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Рассматривается влияние несбалансированности структуры пера композитной лопатки компрессора, вызванной технологическими отклонениями углов укладки слоев, нарушением последовательности их укладки, на ее напряженно-деформированное состояние. Влияние несбалансированности анализируется на рабочей и направляющей лопатках компрессора. Приведены результаты деформационного поведения и напряженного состояния в наиболее нагруженных слоях. *Композит; слой; несбалансированность; лопатка; компрессор; напряжение; деформация*

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Структура слоистых композиционных материалов обуславливает их механическое поведение под нагрузкой.

В большинстве случаев слоистые композиты имеют 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.

Практически удовлетворить вышеуказанным требованиям сбалансированности можно лишь в случае укладки слоев под углами  $0$  и  $90^\circ$ . При укладке слоев под углами, отличными от вышеупомянутых, удовлетворение требованию симметричности исключает удовлетворение второму условию. Поэтому уже на этапе проектирования большинство композитных конструкций имеет несбалансированную структуру.

Изменение расчетной геометрии пера композитной лопатки в результате деформации из-за отклонений углов укладки слоев приводит к снижению аэродинамических характеристик ступени, изменению напряженного состояния лопатки и снижению КПД ступени.

Этап определения допустимых отклонений углов укладки должен входить в комплексное решение многочисленных разноплановых задач при проектировании лопаток из композитных материалов.

## 2. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Напряженно-деформированное состояние естественно-закрученных металлических лопаток подробно рассматривается в работах [1, 2]. Применение этого подхода к расчету лопаток из КМ требует учета различия в упругих и прочностных свойствах слоев, т.е. слоистости материала, что приводит к необходимости использования послойного анализа напряженного состояния лопатки, зависящего от структуры и свойств каждого слоя [3].

Расчетная схема лопатки представлена на рис. 1.

Нормальное напряжение, действующее в точках поперечного сечения, равно

$$\sigma = E\varepsilon = E\left(\varepsilon_0 - \chi_\eta \eta - \chi_\xi \xi - s^2 \theta \frac{d\varphi}{dr}\right). \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  – деформация растяжения оси лопатки;  $\chi_\eta$  и  $\chi_\xi$  – составляющие кривизны;  $\frac{d\varphi}{dr}$  – относительный угол упругой раскрутки.

Отметим, что второе и третье слагаемые уравнения (1) характеризуют линейно изменяющиеся (в силу гипотезы плоских сечений) деформации, связанные с изгибом лопатки, а четвертое слагаемое – деформацию за счет раскрутки профиля при растяжении лопатки под действием сосредоточенной силы.

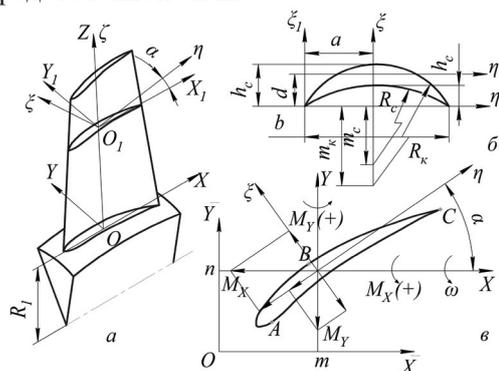


Рис. 1. Система координат лопатки (а), аппроксимация профиля (б) и действующие в сечении лопатки компрессора изгибающие моменты (в)

Неизвестные параметры  $\varepsilon_0$ ,  $x_\eta$ ,  $x_\xi$  и  $\frac{d\varphi}{dr}$  определяются из условий равновесия. Используя приведенные главные оси  $\eta$ ,  $\xi$  и учитывая что  $\frac{d\varphi}{dr} = \frac{M_{kp}}{T}$ , можно получить следующие выражения [1]:

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{\left( \frac{P\theta J_p}{\bar{F}} - \frac{M_\xi \theta J_{p\xi}}{J_\xi} + \frac{M_\eta \theta J_{p\eta}}{J_\eta} - M_{kp}^u \right)}{\left( q - \frac{\theta^2 J_p^2}{F} \right)},$$

$$\sigma = E \left[ \varepsilon_0 - \frac{M_\xi \eta}{J_\xi} + \frac{M_\eta \xi}{J_\eta} - \theta \frac{d\varphi}{dr} \left( s^2 - \frac{J_{p\eta} \xi}{J_\eta} - \frac{J_{p\xi} \eta}{J_\xi} \right) \right], \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_0 = \frac{\frac{qP}{\theta^2} - \frac{M_\xi J_p J_{p\xi}}{J_\xi} + \frac{M_\eta J_p J_{p\eta}}{J_\eta} - \frac{M_{kp}^u J_p}{\theta}}{\frac{qF}{\theta^2} - J_p^2}, \quad (3)$$

$$q = \bar{T} - \theta^2 \left( \frac{J_{p\xi}^2}{J_\xi} + \frac{J_{p\eta}^2}{J_\eta} - J_{4p} \right);$$

здесь  $J_p = \int_F Es^2 dF$  – физико-геометрический полярный момент инерции;  $J_{4p} = \int_F Es^4 dF$  – физико-геометрический полярный момент инерции 4-го ранга;  $J_\eta = \int_F E\xi^2 dF$ ,  $J_\xi = \int_F E\eta^2 dF$  – физико-геометрические моменты инерции относительно приведенных главных осей;  $J_{p\eta} = \int_F E\xi s^2 dF$ ,  $J_{p\xi} = \int_F E\eta s^2 dF$  – физико-геометрические полярно-осевые моменты инерции;  $\bar{T} = \int_F GTdF$  – физико-геометрическая жесткость на кручение;  $\bar{F} = \int_F EdF$  – физико-геометрическая площадь сечения.

Касательные напряжения тангенциального ( $\tau_{\eta\xi}$ ) и поперечного ( $\tau_{\eta\xi}$ ) сдвигов определяются по формулам

$$\tau_{\eta\xi} \approx 2G \frac{d\varphi}{dr} s, \quad \tau_{\eta\xi} \approx \sigma \theta s. \quad (4)$$

Одним из классических подходов к расчету лопаток из КМ является введение эффективных упругих свойств – свойств такого однородного

(эффективного) материала, которые обеспечивают при одинаковых нагрузках деформации, аналогичные деформациям в слоистом КМ. Эффективные упругие свойства при растяжении  $\langle E \rangle$  и изгибе  $\langle E_\xi \rangle$  и  $\langle E_\eta \rangle$  в этом случае определяются по формулам

$$\langle E \rangle = \frac{\bar{F}}{F}; \quad \langle E_\xi \rangle = \frac{J_\xi}{I_\xi}; \quad \langle E_\eta \rangle = \frac{J_\eta}{I_\eta}, \quad (5)$$

где  $I_\eta = \int_F \xi^2 dF$  и  $I_\xi = \int_F \eta^2 dF$  – осевые моменты инерции.

При анализе распределения модуля упругости по хорде данного сечения удобно использовать эффективный модуль в виде

$$\langle E_j \rangle = \sum_{i=1}^k E_i \bar{h}_i, \quad (6)$$

где  $\bar{h}_i = \frac{h_i}{C_j}$ ;  $C_j, k$  – относительная толщина  $i$ -го слоя, толщина профиля и число слоев в  $j$ -м сечении профиля соответственно.

Таким образом, напряжения в лопатке определяются действующими нагрузками и физико-геометрическими параметрами сечений, зависящими от упругих свойств слоев, их конфигурации и месторасположения [4, 5].

Определение силовых факторов. Силовые факторы, действующие в сечении на радиусе  $r_i$ , вычисляются следующим образом (см. рис. 1, в):

$$P_i = \omega^2 \int_{r_i}^{R_2} \int_F \rho(x_1, y_1, r) r dF dr,$$

$$M_{kp,i}^u = \left| \omega^2 \int_{r_i}^{R_2} \int_F \rho(x_1, y_1, r) x_1 y_1 dF dr \right|,$$

$$M_\eta^i = M_X^i \cos \alpha_i + M_Y^i \sin \alpha_i, \quad (7)$$

$$M_{GX}^i = M_{GX}^i - M_X^i,$$

$$M_\xi^i = M_X^i \sin \alpha_i + M_Y^i \cos \alpha_i,$$

$$M_{GY}^i = M_{GY}^i - M_Y^i,$$

где  $M_{GX}, M_{GY}, M_{GX}, M_{GY}$  – изгибающие моменты относительно осей  $x$  и  $y$  от действия газовых и центробежных сил соответственно.

### 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Влияние несбалансированности на напряженное состояние и деформационное поведение оценивалось на моделях рабочей и направляющей лопаток из углерамина первой ступени КНД ГТД АЛ-31СТН (рис. 2).

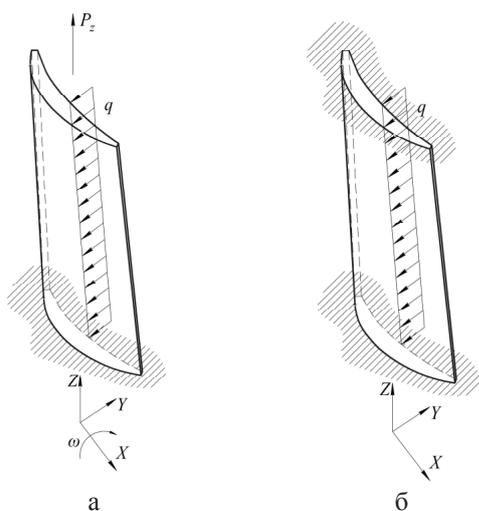


Рис. 2. Расчетные схемы рабочей (а) и направляющей (б) лопаток компрессора

**Исходные данные**

В качестве материала лопаток использовался углемагний со следующими характеристиками: число слоев  $n = 9$ , коэффициент армирования  $\psi = 0,65$ , плотность  $\rho = 1780 \text{ кг/м}^3$ , упругие характеристики однонаправленного слоя:  $E_1 = 211 \text{ ГПа}$ ;  $E_2 = 12,5 \text{ ГПа}$ ;  $G_{12} = 13,4 \text{ ГПа}$ ;  $\nu_{12} = 0,21$ .

Разность давлений на корытце и спинке среднего сечения лопатки  $\Delta P = 21000 \text{ Па}$ . Хорда в среднем сечении  $b_{cp} = 48,9 \text{ мм}$ . Величина распределенной по линии нагрузки  $q = P \cdot b_{cp} = 21 \cdot 10^3 \cdot 48,9 \cdot 10^{-3} = 1030 \text{ Н/м}$ .

Частота вращения рабочей лопатки  $\omega = 9300 \text{ об/мин} = 974 \text{ рад/с}$ .

**Структура слоев пера лопатки**  
(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / -45 / 45)°.

Данная схема является наиболее близкой к сбалансированной, однако для изделий достаточно сложной формы, таких как лопатки авиационных ГТД, получить полностью сбалансированную структуру практически невозможно.

При определении величины газовой нагрузки были проанализированы графики распределения давления по профилю лопатки в трех сечениях: корневом, среднем и периферийном, – полученные в результате газодинамического расчета КНД в программном комплексе ANSYS. В результате 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 принято постоянным;
- 3) давление  $q$  распределяется по линии и действует в плоскости, проходящей через центры инерции сечений лопатки.

Рассмотрим влияние отклонений углов укладки слоев на напряженно-деформированное состояние перьев рабочей и направляющей лопаток из композиционного материала.

Для этого укладки внешнего слоя (слой № 9) изменяется на  $\pm 3, \pm 5, \pm 10^\circ$ .

Напряжения и перемещения в рассматриваемых сечениях анализировались в узлах А, В и D (рис. 3).

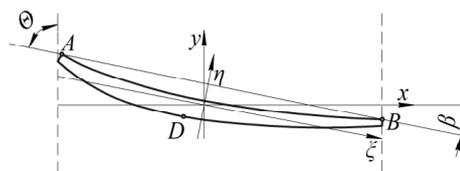


Рис. 3. Схема поперечного сечения лопатки компрессора

На рис. 4 представлен график зависимости относительного изменения перемещений узлов А, В и D перьев рабочей лопатки по отношению к сбалансированному состоянию. Для направляющей лопатки график имеет качественно схожий вид и потому не приводится.

Перемещения точек профиля рабочей лопатки рассматривались для периферийного сечения, напряжения – для корневого сечения, для лопаток направляющего аппарата перемещения и напряжения рассматриваются в срединном сечении.

Относительное изменение суммарных перемещений вычислялось по формуле

$$\Delta U_{XOY}^{\text{отн}} = \frac{|U_{XOY}^{\text{сбал}} - U_{XOY}^{\text{несбал}}|}{U_{XOY}^{\text{сбал}}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

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

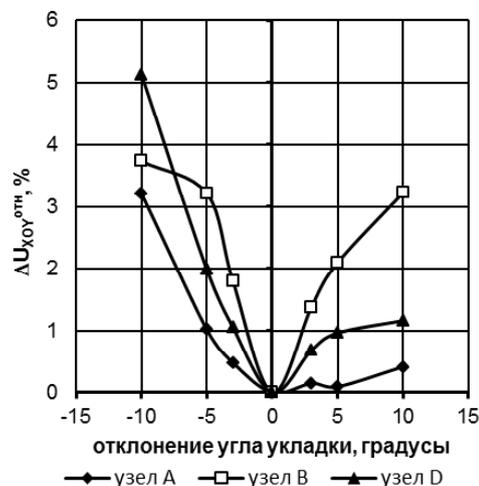


Рис. 4. Зависимость относительного изменения перемещений в плоскости XOY узлов пера рабочей лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя

Характер изменения нормальных напряжений вдоль волокон в окрестностях узла В наиболее напряженного (корневого) сечения пера рабочей лопатки представлен на рис. 5.

Напряжения вычислялись в локальных системах координат слоев. Оси упругости 1, 2, 3 локальной системы координат однонаправленного слоя ориентированы следующим образом:

- направление оси 1 совпадает с направлением армирования однонаправленного слоя;
- ось 2 направлена перпендикулярно направлению армирования и лежит в плоскости слоя;
- ось 3 перпендикулярна плоскости слоя.

Локальная система координат является правой.

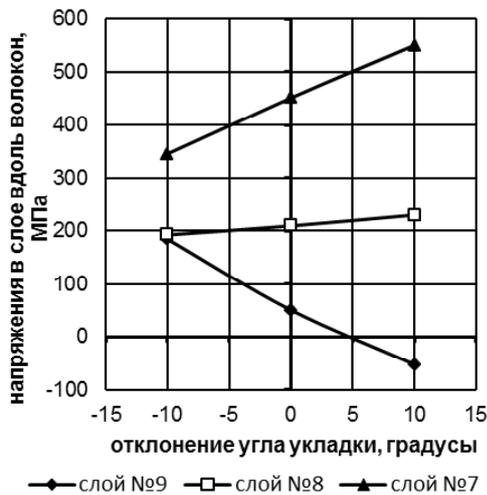


Рис. 5. Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях пера рабочей лопатки в окрестностях узла В от отклонения угла укладки внешнего слоя

На рис. 6 представлен график зависимости относительного изменения перемещений в плоскости  $XOY$  узла А периферийного сечения пера рабочей лопатки от отклонения угла укладки слоев №9, №8 и №7 по отношению к сбалансированному состоянию.

Из графика 6 видно, что наибольшее влияние на перемещения точек периферийного сечения рабочей лопатки (до 12%) оказывает отклонение угла укладки слоя №8 с углом укладки в сбалансированном состоянии  $\varphi_8^{\text{сбал}} = -45^\circ$ .

Графики изменения нормальных напряжений вдоль волокон в узлах наиболее напряженного (срединного) сечения пера направляющей лопатки имеют качественно схожий вид и не приводятся.

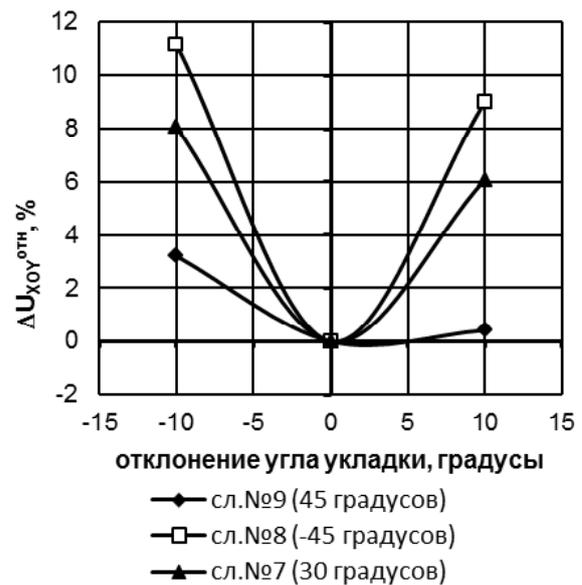


Рис. 6. Зависимость относительного изменения перемещений в плоскости узла А пера рабочей лопатки от отклонения угла укладки внешних слоев

Анализ результатов показывает, что имеющее место изменение нормальных напряжений в слоях вследствие отклонений углов укладки одного из слоев может быть весьма существенно (>100%). От того, в какую сторону относительно сбалансированного состояния имеется отклонение угла укладки, зависит знак изменения напряжений в слое.

Лопатки авиационных ГТД имеют естественную закрутку по высоте. Под действием центробежных сил происходит раскрутка профиля лопатки, что может повлиять на параметры обтекания профиля и коэффициент полезного действия ступени лопаточной машины. Несбалансированность структуры пера композитной лопатки также влияет на его угол установки в процессе эксплуатации.

Проанализируем, как влияет несбалансированность, вызванная отклонением угла укладки одного из слоев, на угол установки профиля лопатки. Для этого рассмотрим периферийное сечение пера рабочей лопатки. Примем следующие обозначения:  $\beta = 90^\circ - \Theta$  (см. рис. 3),  $\Delta\beta = \beta^{\text{сбал}} - \beta^{\text{несбал}}$  – изменение угла установки сечения лопатки.

На рис. 7 представлена зависимость изменения угла установки сечения лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя.



Рис. 7. Зависимость изменения угла установки сечения лопатки от отклонения угла укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния

Приведенная на графике зависимость для статорных лопаток свидетельствует, что угол установки лопаток направляющего аппарата практически не изменяется, так как направляющие лопатки не испытывают центробежных нагрузок и, следовательно, не имеют тенденцию к раскрутке профиля. Кроме того, они жестко закреплены.

График 7 свидетельствует о наличии изменения угла установки периферийного сечения рабочей лопатки вследствие несбалансированности структуры. При максимальном отклонении угла укладки ( $-10^\circ$ ) величина  $\Delta\beta$  достигает примерно  $42'$ . Для лопаток направляющего аппарата изменение угла установки срединного сечения незначительно ( $\Delta\beta < 1'$ ).

С другой стороны, график 7 показывает, что, введя изначальную искусственную несбалансированность структуры, можно уменьшить  $\Delta\beta$  (при угле укладки внешнего слоя  $\varphi_0 = 55^\circ$  величина  $\beta \approx 16'$ , при  $\varphi_0 = 68^\circ$   $\Delta\beta < 9'$ ). Таким образом, управляя несбалансированностью структуры, можно получить необходимые параметры работоспособности конструкции.

При отклонении угла укладки слоя №8 ( $\varphi_8^{\text{сбал}} = -45^\circ$ ), наиболее существенно влияющего на деформационное поведение пера рабочей лопатки ( $\Delta U_{XOY}^{\text{отн}} \approx 12\%$ ), величина  $\Delta\beta$  достигает  $47'$ .

Влияние несбалансированности на деформационное поведение композитной лопатки существенно зависит от материала матрицы. Зависимость угла установки углепластиковой лопатки от отклонения угла укладки представлена на рис. 8. Здесь величина  $\Delta\beta$  достигает  $1^\circ 12'$ .

Рассмотрим влияние несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоев, на перьях статорной и роторной композитных лопаток в зависимости от варианта нарушения последовательности укладки. В сбалансированном состоянии структура пера композитной лопатки следующая:  $(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / -45 / 45)^\circ$ .

Варианты схем с нарушенной последовательностью укладки выглядят следующим образом:

а) нарушение последовательности укладки слоев №9 и №8:

$(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / 30 / 45 / -45)^\circ$ ;

б) нарушение последовательности укладки слоев №8 и №7:

$(45 / -45 / 30 / -30 / 0 / -30 / -45 / 30 / 45)^\circ$ .



Рис. 8. Зависимость изменения угла установки сечения лопатки из углепластика от отклонения угла укладки внешнего слоя от сбалансированного состояния

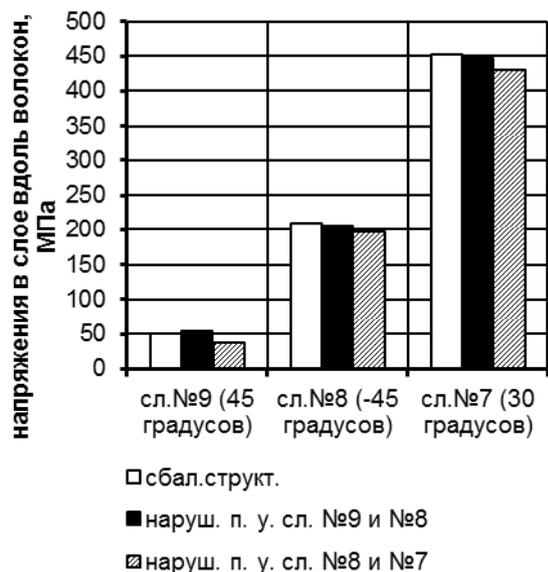
В таблице приведены значения относительного изменения суммарных перемещений в плоскости  $XOY$  рассматриваемых узлов перьев рабочей и статорной лопаток в зависимости от характера нарушения последовательности укладки слоев.

**Изменение прогибов несбалансированных структур композитных балок при нарушении последовательности укладки**

	узел	$\Delta U_{XOY}^{отн}, \%$	
		наруш. п.у. сл. №9 и №8	наруш. п.у. сл. №8 и №7
Рабочая лопатка	A	4,5	3,6
	B	1,1	1,9
	D	2,9	1,1
Лопатка НА	A	2,4	1,4
	B	1,8	0,2
	D	2,8	1,8

Из таблицы видно, что относительное изменение суммарных перемещений узлов статорных лопаток из композиционного материала вследствие несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоев, не превышает 4,5%.

На рис. 9 приведено изменение нормальных напряжений вдоль волокон в окрестностях узла В наиболее напряженных сечений перьев рабочей и направляющей лопаток.

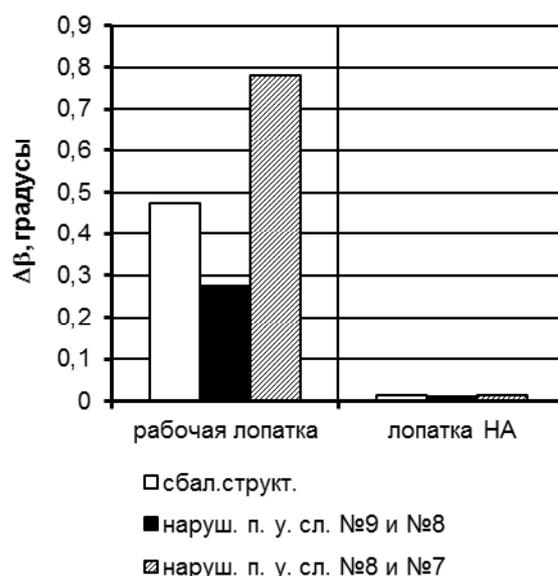


**Рис. 9.** Зависимость нормальных напряжений вдоль волокон в слоях рабочей лопатки в окрестностях узла В от нарушения последовательности укладки внешнего слоя

Анализ результатов напряженного состояния показывает, что имеющее место изменение нормальных напряжений в слоях вследствие нарушения последовательности укладки слоев может достигать 40%.

На рис. 10 представлена зависимость изменения угла установки сечения лопатки от характера нарушения последовательности укладки слоев рабочих и направляющих композитных лопаток.

Максимальное изменение угла установки сечения рабочей лопатки  $\Delta\beta$  в данном случае достигает примерно 47', что может повлиять на газодинамические режимы работы компрессора. Для лопаток направляющего аппарата изменение угла установки срединного сечения незначительно ( $\Delta\beta < 1'$ ).



**Рис. 10.** Зависимость изменения угла установки сечения лопатки от характера нарушения последовательности укладки слоев

## ВЫВОД

Нарушение сбалансированности структуры перьев слоистых композитных лопаток компрессоров ГТД, вызванное отклонениями углов укладки слоев от расчетных, приводит к изменению как деформационного поведения, так и напряженного состояния. Изменение зависит от величины отклонений углов укладки, числа слоев, вида нагружения и граничных условий закрепления лопаток. При максимальном отклонении угла укладки ( $-10^\circ$ ) изменение перемещений узлов периферийного сечения пера рабочей лопатки в плоскости  $XOY$  может достигать 12%. При отклонении углов укладки слоев в пределах  $\pm 5^\circ$  изменение деформационного поведения лопатки не превышает 5%. Максимальное изменение угла установки периферийного сече-

ния рабочей лопатки  $\Delta\beta$  из-за отклонения угла укладки внешнего слоя составляет  $<1^\circ$  ( $47'$ ). Влияние упругой раскрутки лопатки на изменение угла ее установки можно минимизировать путем введения искусственной несбалансированности структуры (при угле укладки внешнего слоя  $\varphi_0 = 35^\circ$   $\Delta\beta = 42'$ , при  $\varphi_0 = 68^\circ$  величина  $\Delta\beta < 9'$ ).

Влияние несбалансированности, вызванной нарушением последовательности укладки слоев, на деформационное поведение не превышает 5%, на напряженное состояние – 40%. С увеличением числа слоев в лопатке влияние несбалансированности уменьшается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биргер И. А.** Руководство для конструкторов по расчету на прочность газотурбинного двигателя. Расчет лопаток на прочность. М.: Оборонгиз, 1956. Вып. 2. С. 101–110.

2. **Вьюнов С. А.** Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебник /

под общ. ред. Д. В. Хронина. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.

3. **Горшков Л. А.** Особенности расчета напряженно-деформированного состояния естественно закрученных лопаток из композиционного материала // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении: тр. ЦИАМ, 1980. № 887. С. 77–88.

4. **Веселов С. И., Карташов Г. Г.** Композиционные материалы в авиадвигателестроении: учебное пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 122 с.

5. **Роценс К. А., Штейнерс К. Н.** Оценка податливости и жесткости несбалансированных моноклинных композиций // Механика полимеров, 1976. № 6. С. 1030–1035.

#### ОБ АВТОРАХ

**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 термомехки композиц. материалов.

**Соловьев Павел Владимирович**, аспирант каф. авиац. двиг. Дипл. инж. (УГАТУ, 2009).