

В. П. Павлов, Э. М. Нусратуллин, А. А. Филиппов

ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНОЙ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГТД

В работе излагаются результаты теоретического исследования влияния армирования высокомодульными волокнами хвостовой части лопатки осевого компрессора авиационного двигателя на концентрацию напряжений в местах перехода от пера лопатки к ее хвостовой части, изготовленной в форме «ласточкин хвост». Показано, что определенным образом выбранная схема армирования позволяет уменьшить напряжения в местах их концентрации не менее, чем в два раза по сравнению с напряжениями в лопатке, изготовленной из изотропного материала. Результаты получены расчетным путем на основе метода конечных элементов. *Авиационный двигатель; компрессор; лопатка; хвостовая часть; концентрация напряжений; армирование; высокомодульные волокна*

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проектировании рабочих лопаток авиационных двигателей особое внимание уделяется концентрации напряжений [1, 2], особенно сильно проявляющей себя в местах перехода от пера лопатки к ее корневой части. Несущая способность и прочность лопатки во многих случаях определяется напряженным состоянием в местах концентрации, поскольку именно там наступает предельное состояние и разрушение.

Одним из основных традиционных способов снижения концентрации напряжений является увеличение радиусов поверхности перехода от наружной поверхности пера лопатки к поверхности ее хвостовой части [1, 2], но такой способ снижения концентрации имеет свои пределы и не всегда позволяет обеспечить требуемую прочность лопатки.

В данной работе излагается новый способ снижения концентрации напряжений, основанный на армировании хвостовика лопатки высокомодульными и высокопрочными борными и углеродными волокнами.

Для оценки эффективности предлагаемого способа снижения концентрации напряжений решались следующие задачи:

- разработка методики расчета напряжений в корневой части лопатки компрессора, армированной борными и углеродными волокнами;
- расчет напряженного состояния для модели корневой части лопатки в форме «ласточкин хвост» при различных схемах армирования и оценка степени влияния различных схем армирования на напряжения в зонах концентрации напряжений;

- разработка рекомендаций по снижению концентрации напряжений в наиболее опасных зонах деталей армированием высокомодульными волокнами.

2. МОДЕЛЬ ХВОСТОВИКА ЛОПАТКИ

В осевых компрессорах широко применяется схема пазового соединения лопатки с диском замком, имеющим трапециевидный профиль «ласточкин хвост» [3]. Одной из расчетных схем ножки лопатки в этом случае является пластина, имеющая в плане форму сечения хвостовика плоскостью, перпендикулярной оси паза, которая нагружена осевой силой R , приложенной к поперечному сечению пера лопатки, на некотором достаточно большом расстоянии от хвостовика лопатки (рис. 1).

При этом, согласно принципу Сен-Венана [4], на удалении от нагруженного верхнего участка области определения (рис. 1) порядка наибольшего поперечного размер (длины верхней границы области) особенности распределения нагрузки в пределах верхней границы не существенны, важна только величина равнодействующей.

Точное решение о распределении нормальных и касательных напряжений при растяжении и изгибе компрессорной лопатки представляет собой сложную проблему [4]. Поэтому в расчетах перьевого части лопатки на прочность и жесткость при первом приближении принимается «гипотеза плоских сечений» [1], согласно которой точки поперечного сечения лопатки, лежащие до нагружения в одной плоскости, после нагружения также лежат в общей плоскости [1]. Физически это означает, что сечение лопатки можно представить как тонкую абсолютно жесткую пластинку, получающую в результате деформации стержня линейное смещение и углы поворота [4].

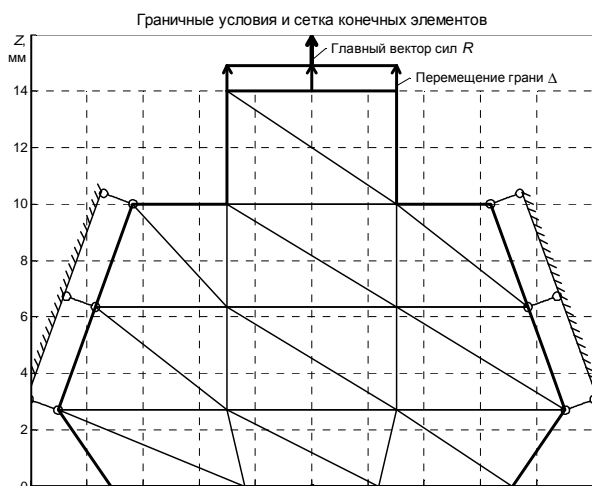


Рис. 1. Сечение корневой части лопатки, связи наложенные на тело, перемещение Δ верхней грани и главный вектор R сил, приложенных к верхней грани

Гипотеза плоских сечений является важнейшим приближенным методом описания деформации изгиба и растяжения стержней. Основной гипотезы плоских сечений является предположение о малости углов сдвига элементов по сравнению с углами их поворотов [4].

При изгибе стержней из анизотропных материалов, у которых модуль сдвига может быть на порядок меньше модуля упругости при растяжении, деформации сдвига возрастают и область применения гипотезы плоских сечений может привести к большим погрешностям расчетов [4].

Ввиду того, что получаемое решение о деформировании корневой части лопатки далее будет использовано при расчете всей лопатки целиком, принимается, что в рамках *гипотезы плоских сечений* при нагружении верхняя граница рассматриваемого тела остается прямой и перемещается на величину Δ вдоль оси Z без поворота (рис. 1). При этом во всех вариантах расчета величина Δ задается такой, чтобы величина равнодействующей R внешней нагрузки на верхней границе (рис. 1) при всех вариантах расчетов была одинаковой и создавала одинаковые средние растягивающие напряжения

$$\sigma_y^{(cp)} = R/A, \quad (1)$$

где A – площадь верхней грани.

3. СХЕМА АРМИРОВАНИЯ КОРНЕВОЙ ЧАСТИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Для снижения веса и повышения прочности лопаток необходимо применять композиционные материалы, армирующие компоненты которых обладают высоким пределом прочности и высоким модулем упругости. Такими свойствами обладают углеродные и борные волокна [5, 6].

Борное волокно [6] имеет большой диаметр и достаточно хорошо работает на сжатие, а углеродное волокно [5] имеет малый диаметр, но обладает меньшей плотностью и хорошо работает на растяжение.

В связи с этим те зоны лопатки, которые в основном работают на растяжение, были армированы углеродным волокном, а зоны, работающие в основном на сжатие – борным.

В итоге плоское тело (рис. 1), выбранное в качестве модели хвостовика лопатки, было армировано по схеме, представленной на рис. 2. При этом углеродные волокна направлялись вдоль оси Z , совпадающей с осью пера лопатки, а борные волокна уложены перпендикулярно к боковым опорным поверхностям хвостовика лопатки (рис. 2).



Рис. 2. Сечение корневой части лопатки и направление укладки армирующих волокон композиционного материала

При выбранной схеме армирования углеродные и борные волокна занимают не весь объем сечения лопатки, и есть зоны, где находится только матричный материал (рис. 2).

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА

К основным механическим характеристикам компонент композита, необходимым при расчете на прочность и жесткость, относятся: плотность ρ , модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , предел прочности $\sigma_{\text{пч}}$.

В работе рассматривается лопатка, изготовленная из композиционного материала на основе магниевой матрицы и двух видов армирующих волокон: углеродных и борных.

Физико-механические характеристики углеродных и борных волокон, приводимые в литературе, имеют очень большой разброс, связанный с конкретной технологией их изготовления, поэтому далее для них принимаем осредненные значения механических характеристик [5, 6]:

– для матрицы, изготовленной из сплава МЛ-10: $\rho_m = 1800 \text{ кг / м}^3$, $E_m = 0,44 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\nu_m = 0,28$, $\sigma_{\text{пч}}^m = 245 \text{ МПа}$;

– для углеродных армирующих волокон: $\rho_y = 1800 \text{ кг / м}^3$, $E_y = 3 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\nu_y = 0,2$, $\sigma_{\text{пч}}^y = 2000 \text{ МПа}$;

– для борных армирующих волокон: $\rho_b = 2500 \text{ кг / м}^3$, $E_b = 4 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\nu_b = 0,25$, $\sigma_{\text{пч}}^b = 3000 \text{ МПа}$.

5. МОДЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Основным отличием расчетов напряженно-деформированного состояния лопатки из композиционного материала от расчетов лопаток из традиционных однородных изотропных материалов (сталь, титан, алюминиевые сплавы) является то, что свойства композиционного материала могут существенно изменяться по объему детали.

Это связано с тем, что в изделиях из композитов имеется возможность выбрать концентрацию армирующих волокон и направлений их укладки так, чтобы изделие приобрело требуемые прочностные и жесткостные характеристики.

Поэтому необходима методика расчета физико-механических характеристик композиционного материала на основе данных об его структуре и физико-механических характеристиках его компонент.

Эффективные упругие характеристики композиционного материала

Основным параметром, количественно определяющим структуру материала, является коэффициент армирования Ψ :

$$\Psi = \frac{V_B}{V} = \frac{V_B}{V_B + V_M}, \quad (2)$$

где V_B , V_M – объемы армирующих волокон и матричного материала в общем объеме V композиционного материала.

При расчете напряженно-деформированного состояния тела из композиционного материала реальный неоднородный композиционный материал заменяется некоторым эквивалентным ему однородным анизотропным материалом [7]. В качестве условия эквивалентности реального композита и заменяющего его эквивалентного материала принимается [7], что при одинаковых нагрузках представительные элементы обоих материалов деформируются одинаково.

При описании свойств эквивалентного материала выбирается правая ортогональная координатная система $OX'Y'Z'$ (рис. 3, а), которая жестко связана с элементом композиционного материала в рассматриваемой точке тела. Ось X' направляется вдоль армирующих волокон композита (рис. 3, а), а оси Y' , Z' к ней перпендикулярны. Рассматриваемый в работе однонаправленный двухкомпонентный композиционный материал называется ортотропным [7, 8], а связанные с ним оси X' , Y' , Z' в координатной системе $OX'Y'Z'$ называются осями ортотропии упругих свойств материала.

Для двухкомпонентного композиционного материала с коэффициентом армирования Ψ , в котором армирующие волокна направлены вдоль оси X' , в первом приближении упругие характеристики определяются формулами [7]:

$$\begin{cases} E'_x = \Psi E_B + (1 - \Psi) E_M, \\ E'_y = \frac{1}{\Psi \frac{1}{E_B} + (1 - \Psi) \frac{1}{E_M}}, \\ \nu'_{yx} = \Psi \nu_B + (1 - \Psi) \nu_M, \\ \nu'_{xy} = \frac{E'_y}{E'_x} \nu'_{yx}, \\ \frac{1}{G'_{xy}} = \Psi \frac{1}{G_B} + (1 - \Psi) \frac{1}{G_M}, \end{cases} \quad (3)$$

где E_B , E_M – модули упругости материалов армирующих волокон и матрицы; ν_B , ν_M – коэффициенты Пуассона материалов армирующих волокон и матрицы; G_M и G_B – модули сдвига со-

ответственно матрицы и армирующих волокон, определяемые формулами:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}; \quad G_b = \frac{E_b}{2(1 + \nu_b)}. \quad (4)$$

Соотношения связи между напряжениями и деформациями в анизотропном теле

После определения эффективных упругих характеристик композиционный материал далее рассматривается как однородный анизотропный материал и для описания напряженно-деформированного состояния деталей из него используется теория упругости анизотропных материалов [8].

При расчете анизотропных тел используются как минимум две координатные системы.

Первая координатная система $OXYZ'$ (рис. 3, а) связывается с композитом в рассматриваемой точке тела. Ее ось X' направляется вдоль армирующих волокон композита (рис. 3, а), а оси Y', Z' к ней перпендикулярны.

По отношению к координатной системе $OXYZ'$ определяются напряжения и деформации, из которых формируется тензор напряжений T'_σ с компонентами $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z, \tau'_{xy}, \tau'_{yz}, \tau'_{xz}$ и тензор деформаций T'_ϵ с компонентами $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \epsilon'_z, \gamma'_{xy}/2, \gamma'_{yz}/2, \gamma'_{xz}/2$.

Для ортотропного материала относительно координатной системы $OXYZ'$ связь между напряжениями и деформациями при плоском напряженном состоянии ($\sigma'_z = 0$) выражается законом Гука для ортотропного тела [8]:

$$\begin{cases} \sigma'_x = E'_{1,1}\epsilon'_x + E'_{1,2}\epsilon'_y, \\ \sigma'_y = E'_{2,1}\epsilon'_x + E'_{2,2}\epsilon'_y, \\ \tau'_{xy} = E'_{3,3}\gamma'_{xy}, \end{cases} \quad (5)$$

где $E'_{i,j}, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ – коэффициенты жесткости материала, определяемые соотношениями:

$$\begin{cases} E'_{1,1} = \frac{E'_x}{1 - \nu'_{xy}\nu'_{yx}}, \\ E'_{1,2} = \frac{\nu'_{xy}E'_x}{1 - \nu'_{xy}\nu'_{yx}} = E'_{2,1} = \frac{\nu'_{yx}E'_y}{E'_x}, \\ E'_{2,2} = \frac{E'_y}{1 - \nu'_{xy}\nu'_{yx}}, \\ E'_{3,3} = G'_{xy}. \end{cases} \quad (6)$$

Также при расчетах напряженно-деформированного состояния вводится глобальная координатная система $OXYZ$, по отношению к которой ориентация координатной системы $OXYZ'$ определяется углом ϕ (рис. 3).

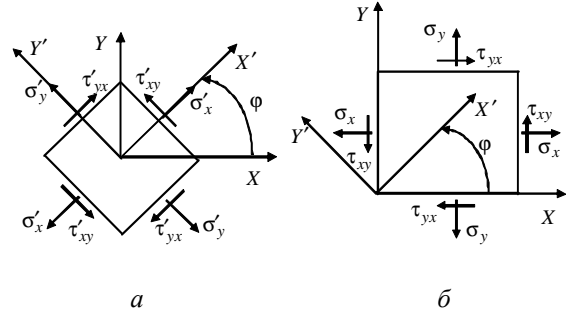


Рис. 3. Оси ортотропии X', Y' и глобальные оси координат X, Y . Напряжения $\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'_{xy}$ относительно осей ортотропии X', Y' (а) и напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ относительно осей глобальной координатной системы XY (б)

По отношению к координатной системе $OXYZ$ определяются напряжения и деформации, из которых формируется тензор напряжений T'_σ с компонентами $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ и тензор деформаций T'_ϵ с компонентами $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}/2, \gamma_{yz}/2, \gamma_{xz}/2$.

По отношению к глобальной координатной системе $OXYZ$ материал в общем случае не является ортотропным и должен рассматриваться как произвольно анизотропный. Соотношения закона Гука для анизотропного материала в общем случае при плоском напряженном состоянии по отношению к осям X, Y принимают вид [8]:

$$\begin{cases} \sigma_x = E_{1,1}\epsilon_x + E_{1,2}\epsilon_y + E_{1,3}\gamma_{xy}, \\ \sigma_y = E_{2,1}\epsilon_x + E_{2,2}\epsilon_y + E_{2,3}\gamma_{xy}, \\ \tau_{xy} = E_{3,1}\epsilon_x + E_{3,2}\epsilon_y + E_{3,3}\gamma_{xy}, \end{cases} \quad (7)$$

где $E_{i,j}, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ – коэффициенты жесткости материала, удовлетворяющие условиям $E_{i,j} = E_{j,i}, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$.

Входящие в (7) коэффициенты жесткости материала $E_{i,j}, i, j = 1, 2, 3$, заданные в системе XYZ , определяются через коэффициенты жесткости $E'_{i,j}, i, j = 1, 2, 3$, заданные в системе $X'Y'Z'$, по формулам [8]:

$$\left\{ \begin{aligned}
 E_{1,1} &= \cos^4 \varphi E'_{1,1} + 2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{1,2} + \\
 &+ \sin^4 \varphi E'_{2,2} + 4 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{3,3}, \\
 E_{2,2} &= \sin^4 \varphi E'_{1,1} + 2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{1,2} + \\
 &+ \cos^4 \varphi E'_{2,2} + 4 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{3,3}, \\
 E_{1,2} &= \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{1,1} + \\
 &+ (\cos^4 \varphi + \sin^4 \varphi) E'_{1,2} + \\
 &+ \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{2,2} - \\
 &- 4 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{3,3}, \\
 E_{1,3} &= \sin \varphi \cos^3 \varphi E'_{1,1} + \\
 &+ \sin \varphi \cos \varphi (\sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi) E'_{1,2} - \\
 &- \sin^3 \varphi \cos \varphi E'_{2,2} - \\
 &- 2 \sin \varphi \cos \varphi (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) E'_{3,3}, \\
 E_{2,3} &= \sin^3 \varphi \cos \varphi E'_{1,1} + \\
 &+ \sin \varphi \cos \varphi (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) E'_{1,2} - \\
 &- \sin \varphi \cos^3 \varphi E'_{2,2} + \\
 &+ 2 \sin \varphi \cos \varphi (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) E'_{3,3}, \\
 E_{3,3} &= \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{1,1} - \\
 &- 2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{1,2} + \\
 &+ \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi E'_{2,2} + \\
 &+ (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi)^2 E'_{3,3}.
 \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Гибридный композит

В рассматриваемой конструкции часть материала является трехкомпонентным композитом (гибридным композитом), в котором магнелиевая матрица и два вида армирующих волокон: борное и углеродное.

Это связано с тем, что борное волокно имеет больший диаметр и достаточно хорошо работает на сжатие, а углеродное волокно имеет малый диаметр, но обладает меньшей плотностью и хорошо работает на растяжение. Поэтому, ориентируя данные волокна соответствующим образом относительно глобальных координатных осей X , Y и задав им оптимальные объемные содержания, можно «заставить» их воспринимать нагрузки в наиболее рациональном режиме с точки зрения эксплуатационного нагружения.

При оценке упругих свойств гибридного композиционного материала для каждой точки тела начале определяются упругие характеристики $E_{i,j}^{(B)}$, $i, j = 1, 2, 3$ отдельно для боромагния и $E_{i,j}^{(C)}$, $i, j = 1, 2, 3$ для углемагния относительно глобальной координатной системы OXY .

Затем, считая, что объемная доля боромагния в общем объеме гибридного композита равна ψ_B , определяются упругие характеристики гибридного композита по формулам:

$$E_{i,j} = \psi_B E_{i,j}^{(B)} + (1 - \psi_B) E_{i,j}^{(C)}, \quad (9)$$

$$i, j = 1, 2, 3.$$

6. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Расчет напряженно-деформированного состояния в местах концентрации напряжений для конструкций сложной формы из композиционных материалов практически невозможен аналитическими методами. Поэтому для решения таких задач в работе применяется метод конечных элементов (МКЭ) [9].

Для расчетов на основе МКЭ выбран плоский треугольный конечный элемент (рис. 1). На рис. 1 показана базовая наиболее грубая сетка разбиения области тела на конечные элементы. При расчетах данная сетка измельчалась с некоторым коэффициентом густоты сетки K , показывающим, во сколько раз увеличивается число конечных элементов по всем направлениям по сравнению с базовой «грубой» сеткой. Расчеты, проведенные при $K = 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50$, показали, что выбранный метод и его программная реализация обеспечивают достаточно хорошую сходимость результатов.

При формировании матриц жесткости конечных элементов используется традиционная методика [9], отличающаяся тем, что материал конечного элемента является не изотропным, а анизотропным. При этом свойства материала зависят от положения точек детали.

Это потребовало, в отличие от традиционных методик, внести ряд существенных изменений при построении матриц жесткости отдельных конечных элементов.

Учет свойств реального композита осуществляется заменой его в процессе расчетов эквивалентным ему анизотропным материалом, что является одним из элементов новизны представляемой работы.

Следуя [9], матрица жесткости треугольного конечного элемента K с тремя узлами имеет размерность 6×6 :

$$K = (k_{i,j}, \quad i = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 6) \quad (10)$$

и формируется по формуле

$$K = B^T D B \Delta t, \quad (11)$$

где \mathbf{B} – матрица размера 3×6 , определяемая координатами узлов треугольника [9], t – толщина элемента, Δ – площадь треугольника, \mathbf{D} – матрица размера 3×3 , сформированная из коэффициентов E_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ жесткости материала:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Первое отличие расчета напряженно-деформированного состояния деталей из композиционных материалов от расчетов деталей из изотропных материалов заключается в различии матриц жесткости материала \mathbf{D} .

В результате расчета методом конечного элемента по выбранной в данной работе схеме определяются перемещения $u_i, v_i, i = 1, \dots, N$ всех N узлов конечно-элементной сетки вдоль осей X, Y глобальной координатной системы.

Далее учитывается, что в пределах трехугольного плоского треугольного конечного элемента функции перемещений $u(x, y)$ и $v(x, y)$ описываются двумерными алгебраическими многочленами вида

$$\begin{cases} u = a_{0,0} + a_{1,0}x + a_{0,1}y, \\ v = b_{0,0} + b_{1,0}x + b_{0,1}y, \end{cases} \quad (13)$$

и по перемещениям узлов u_i, v_i определяются коэффициенты $a_{i,j}, b_{i,j}, i, j = 0, 1$ многочленов (13) для всех конечных элементов и на их основе деформации

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_{1,0}, \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_{0,1}, \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = a_{0,1} + b_{1,0}. \end{cases} \quad (14)$$

Затем по формулам (7) определяются значения напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ относительно глобальной координатной системы XU .

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ АРМИРОВАНИЯ

Расчеты проведены при различных схемах армирования и одинаковых средних напряжениях $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа для сетки конечных элементов с коэффициентом густоты $K = 50$. Результаты пяти вариантов расчетов в виде эпюр напряжений показаны на рис. 3–7. При этом ввиду симметрии тела и симметрии действующей

внешней нагрузки показаны только половины рассматриваемых фигур.

Расчет 1. Изотропный материал

При первом расчете рассматривается хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10 без армирования. Результаты расчетов представлены в форме эпюр напряжений по контуру сечения на рис. 4.

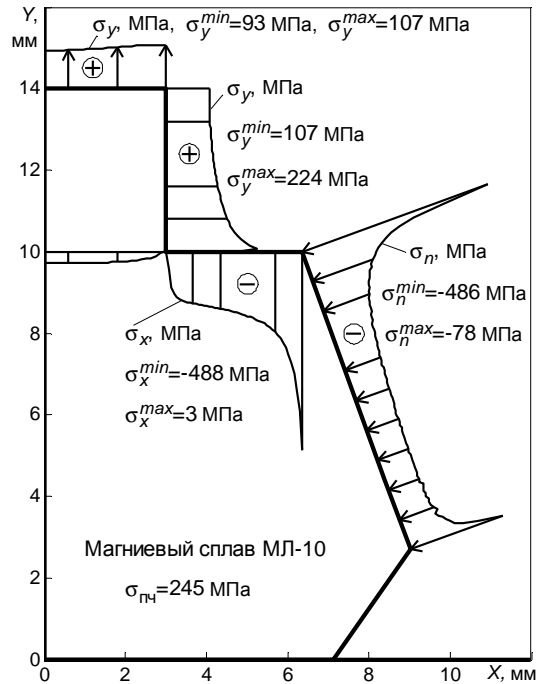


Рис. 4. Эпюры напряжений по поверхности изотропного тела из магниевого сплава МЛ-10

Расчет 2. Композиционный материал при $\psi_C = 0,1$

При втором расчете рассматривается хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси Z (рис. 2). Коэффициент армирования $\psi_C = 0,1$. Эпюры напряжений по контуру сечения показаны на рис. 5.

Расчет 3. Композиционный материал при $\psi_C = 0,3$

В третьем расчете рассматривается хвостовик, изготовленный из магниевого сплава, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси Z (рис. 2). Коэффициент армирования $\psi_C = 0,3$. Эпюры напряжений по контуру сечения показаны на рис. 6.

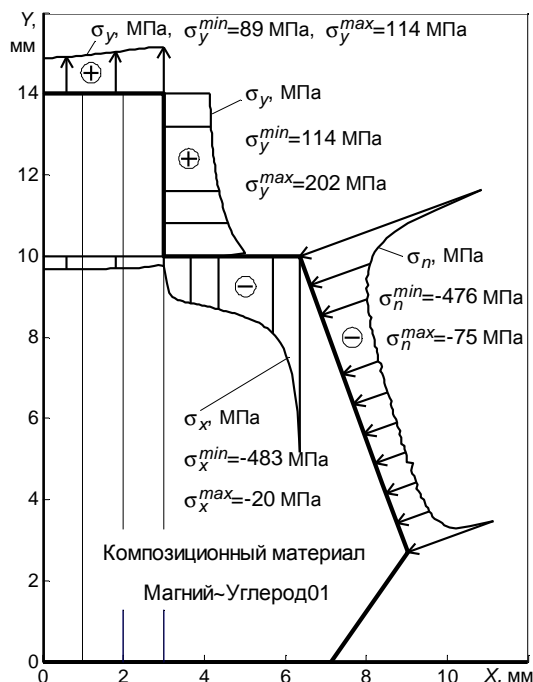


Рис. 5. Эпюры напряжений по контуру тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами при $\psi_C = 0,1$

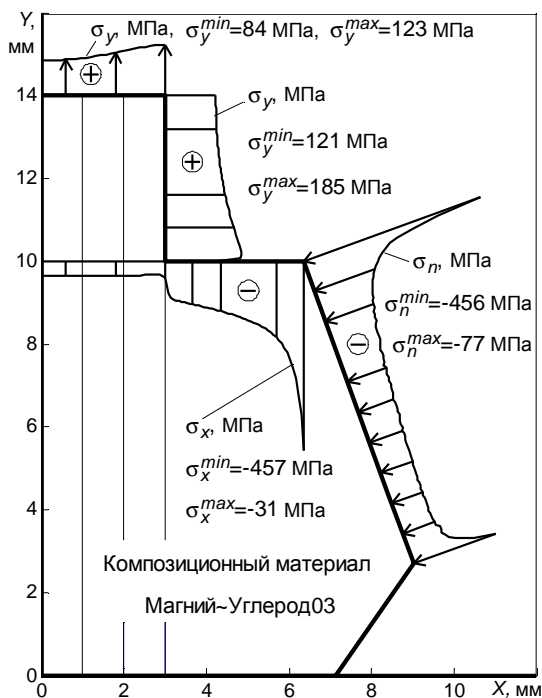


Рис. 6. Эпюры напряжений по контуру тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами при $\psi_C = 0,3$

Расчет 4. Композиционный материал при $\psi_C = 0,3, \psi_B = 0,1$

В четвертом расчете рассматривается хвостовик, изготовленный из магниевого сплава, армированного углеродными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_C = 0,3$ и борными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_B = 0,1$ (рис. 2). Эпюры напряжений показаны на рис. 7.

Расчет 5. Композиционный материал при $\psi_C = 0,3, \psi_B = 0,3$

В пятом расчете рассматривается хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_C = 0,3$ и борными волокнами с коэффициентом армирования (рис. 2) $\psi_B = 0,3$. Эпюры напряжений показаны на рис. 8.

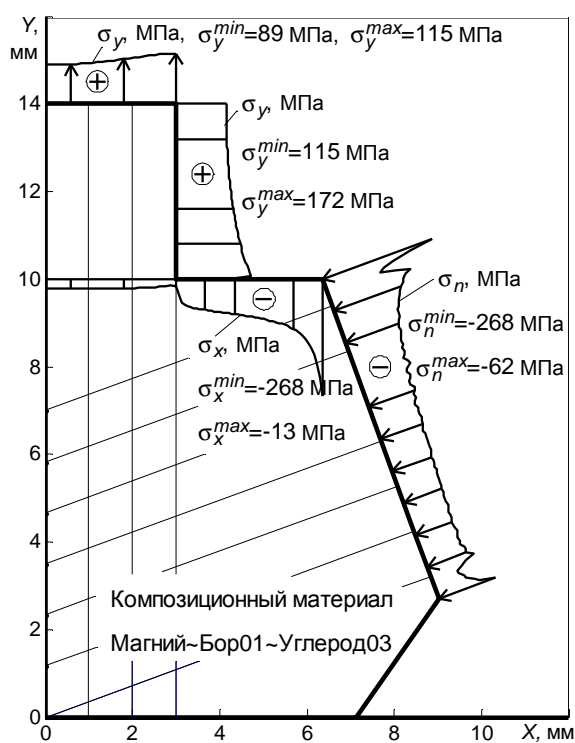


Рис. 7. Эпюры напряжений для тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными и борными волокнами при $\psi_C = 0,3, \psi_B = 0,1$

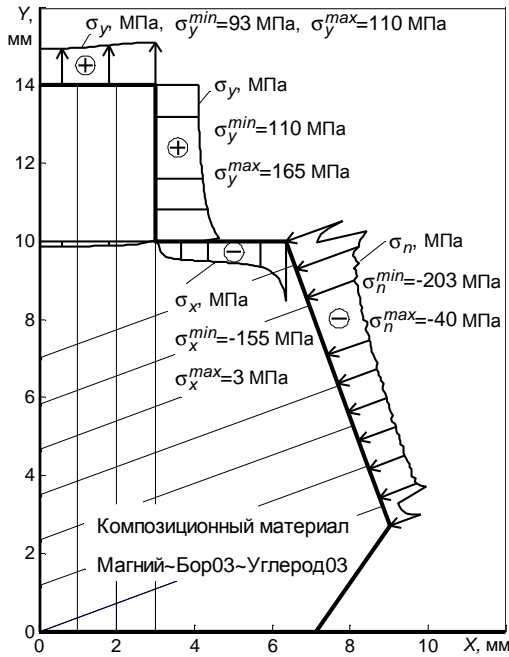


Рис. 8. Эпюры напряжений для тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными и борными волокнами при $\psi_C = 0,3$, $\psi_B = 0,3$

8. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчет 1

В первом расчете рассматривалось тело из однородного изотропного материала – магниевого сплава МЛ-10 без армирующих волокон (рис. 4).

Видно, что на верхней границе на участке B_5C_5 при среднем напряжении $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа, рассчитанном по формулам сопротивления материалов с применением гипотезы плоских сечений, имеет место неравномерное распределение напряжений с перепадом напряжений

$$\Delta\sigma = \sigma_y^{(max)} - \sigma_y^{(min)} = 107 - 93 = 14 \text{ МПа.} \quad (15)$$

Вдоль границы C_4C_5 при движении от точки C_5 к угловой точке C_4 растягивающее (положительное) напряжение возрастает от 107 до 224 МПа, что является следствием концентрации напряжений из-за резкого изменения формы детали вблизи точки C_4 .

Вдоль границы C_4C_3 действует сжимающее (отрицательное) напряжение, величина которого возрастает движением от точки C_4 к точке C_3 до максимального по величине значения $\sigma_x^{(min)} = -488$ МПа. Причиной резкого повышения напряжения в угловой точке C_3 является концентрация напряжений, имеющая место в угловых точках.

На боковой грани C_1C_3 также видно резкое повышение нормальных напряжений в угловых точках C_1 и C_3 с максимальной величиной сжимающего напряжения в точке C_3 равного $\sigma_n^{(min)} = -486$ МПа.

Таким образом, в неармированной детали имеет место существенная концентрация напряжений в точках C_1 , C_3 , C_4 , что снижает прочность детали.

Расчет 2

Во втором расчете рассматривалось тело из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси X, при коэффициенте армирования $\psi_C = 0,1$ (рис. 5).

Видно, что на верхней грани на участке B_5C_5 при среднем напряжении $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа неравномерность распределения напряжений характеризуется с перепадом напряжений

$$\Delta\sigma = \sigma_y^{(max)} - \sigma_y^{(min)} = 114 - 89 = 25 \text{ МПа,} \quad (16)$$

который существенно больше, чем в изотропном теле.

Армирование углеродными волокнами несколько снизило растягивающие напряжения σ_y на боковой грани C_4C_5 от $\sigma_y^{max} = 224$ МПа (рис. 4) до $\sigma_y^{max} = 202$ МПа (рис. 5). При этом армирование высокопрочными углеродными волокнами повысило прочность материала на участке C_4C_5 , что в итоге привело к повышению прочности пера лопатки.

На гранях C_3C_4 и C_1C_3 изменение армирования практически не привело к изменению напряжений (рис. 4, 5).

Расчет 3

В третьем расчете рассматривалось тело из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси X, при коэффициенте армирования $\psi_C = 0,3$ (рис. 6).

Видно (рис. 6), что на верхней грани на участке B_5C_5 при среднем напряжении $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа неравномерность распределения напряжений характеризуется еще большим перепадом напряжений

$$\Delta\sigma = \sigma_y^{(max)} - \sigma_y^{(min)} = 123 - 84 = 39 \text{ МПа,} \quad (17)$$

по сравнению с расчетами 1 и 2.

Повышение коэффициента армирования с $\psi_C = 0,1$ до $\psi_C = 0,3$ еще больше снизило растягивающие напряжения σ_y на боковой грани

C_4C_5 от $\sigma_y^{\max} = 224$ МПа (рис. 4) до $\sigma_y^{\max} = 185$ МПа (рис. 6). При этом еще больше повысилась прочность материала на участке C_4C_5 , что в итоге приведет к еще большему по сравнению с расчетом 2 повышению прочности пера лопатки.

На гранях C_3C_4 и C_1C_3 при коэффициенте армирования $\psi_C = 0,3$ наблюдается небольшое изменение экстремальных значений сжимающих напряжений в угловых точках C_3 и C_1 (рис. 4, 6).

Расчет 4

В четвертом расчете рассматривалось тело из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси X , при коэффициенте армирования $\psi_C = 0,3$ и борными волокнами при коэффициенте армирования $\psi_B = 0,1$ (рис. 7).

Видно (рис. 7), что на верхней границе на участке B_5C_5 при среднем напряжении $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа перепад напряжений:

$$\Delta\sigma = \sigma_y^{(\max)} - \sigma_y^{(\min)} = 115 - 89 = 26 \text{ МПа. (18)}$$

Добавление к углеродным волокнам борных армирующих волокон с коэффициентом армирования с $\psi_B = 0,1$ привело к снижению максимального растягивающего напряжения σ_y на боковой грани C_4C_5 до $\sigma_y^{\max} = 172$ МПа.

На гранях C_3C_4 и C_1C_3 при добавлении борных волокон наблюдается (рис. 7) существенное снижение максимальных сжимающих напряжений в угловой точке C_3 и C_1 по сравнению со всеми предыдущими вариантами (рис. 4–7).

Расчет 5

В пятом расчете рассматривалось тело из магниевого сплава, армированного углеродными волокнами, направленными вдоль оси X , при коэффициенте армирования $\psi_C = 0,3$ и борными волокнами при коэффициенте армирования $\psi_B = 0,3$ (рис. 8).

Видно (рис. 8), что на верхней грани на участке B_5C_5 при среднем напряжении $\sigma_y^{(cp)} = 100$ МПа снизился перепад напряжений:

$$\Delta\sigma = \sigma_y^{(\max)} - \sigma_y^{(\min)} = 110 - 93 = 17 \text{ МПа. (19)}$$

Добавление к углеродным волокнам борных волокон с коэффициентом армирования с $\psi_B = 0,3$ привело к снижению максимального растягивающего напряжения σ_y на боковой границе C_4C_5 до $\sigma_y^{\max} = 165$ МПа.

На границах C_3C_4 и C_1C_3 при доведении коэффициента армирования борных волокон до $\psi_B = 0,3$ наблюдается существенное снижение максимальных сжимающих напряжений в угловой точке C_3 и C_1 до таких величин, что напряжения в этих точках становятся ниже, чем в ряде других точек на гранях C_3C_4 и C_1C_3 (рис. 8).

Таким образом, схема армирования с коэффициентами армирования $\psi_C = 0,3$ и $\psi_B = 0,3$ является наиболее оптимальной, так как при ней удастся существенно снизить напряжения в наиболее опасных точках.

При варианте 5 по сравнению с вариантом 1 на грани C_4C_5 напряжение σ_y в точке C_4 снизилось (рис. 4, 8) в $224 / 165 = 1,36$ раза.

На грани C_3C_4 напряжение σ_x в точке C_3 снизилось (рис. 4, 8) в $488 / 155 = 3,15$ раза.

На грани C_4C_5 максимальное напряжение σ_n снизилось (рис. 4, 8) в $486 / 203 = 2,39$ раза.

Таким образом, видим, что эффект от армирования очень высокий.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета напряжений в корневой части лопатки компрессора, армированной борными и углеродными волокнами.
2. Проведенные расчеты напряженно-деформированного состояния для модели корневой части лопатки в форме «ласточкин хвост» при различных схемах армирования показали, что схема армирования и объемная доля армирующих волокон оказывают очень сильное влияние на напряжения в зонах концентрации напряжений.
3. При рассмотренных схемах армирования удалось снизить напряжения в различных точках корневой области лопатки от 1,36 до 3,15 раза. При этом заметно увеличилась прочность материала лопатки.
4. Для повышения прочности пера лопаток рекомендуется армирование углеродными волокнами, направленными вдоль оси пера лопатки, а в корневой части лопатки – армирование борными волокнами, перпендикулярными к боковым граням хвостовика лопатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мавлютов Р. Р. Проблемы концентрации напряжений в авиационных конструкциях // Тр. Уфимск. авиац. ин-та / Уфимск. авиац. ин-т. 1973. Вып. 40. С. 3–65.
2. Мавлютов Р. Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981. 141 с.

3. **Скубачевский Г. С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1965. 451 с.

4. **Биргер И. А., Мавлютов Р. Р.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.

5. **Костиков В. И., Варенков А. Н.** Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. М.: Интернет Инжиниринг, 2003. 560 с.

6. Структура и свойства композиционных материалов / К. И. Портной [и др.]. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.

7. **Первушин Ю. С., Жернаков В. С.** Проектирование и прогнозирование механических свойств однонаправленного слоя из композиционного материала: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2002. 127 с.

8. **Лехницкий С. Г.** Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.

9. **Безухов Н. И., Лужин О. В.** Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. М.: Высш. шк., 1974. 200 с.

ОБ АВТОРАХ



Павлов Виктор Павлович, проф. каф. сопр. материалов. Дипл. инж. по авиац. двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по динамике и прочности (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. механики композиц. материалов.



Нусратуллин Эдуард Марсович, асп. той же каф. Дипл. математик (БГУ, 2005). Иссл. в обл. механики композиц. материалов.



Филиппов Александр Анатольевич, асп. той же каф. Дипл. инж.-прогр. по матем. моделированию и системн. администр. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. механики композиц. материалов.