

В. П. ПАВЛОВ, Э. М. НУСРАТУЛЛИН, А. А. ФИЛИППОВ

ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗАМЕНЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

Анализируется возможность сохранения прочности рабочей лопатки компрессора при замене титанового сплава композиционным материалом (КМ) на основе магниевых сплавов, армированных углеродными и борными волокнами. Рассматриваются упругие и прочностные характеристики композиционного материала, полученные экспериментально при растяжении и изгибе, анализируются возможности теоретического прогнозирования упругих характеристик КМ на основе знания структуры КМ и механических характеристик его компонент. Показывается, что при рациональной схеме армирования можно существенно снизить напряжения в зонах концентрации напряжений рабочей лопатки компрессора по сравнению с лопаткой из изотропного материала. *Композит; лопатка; углеродные и борные волокна*

ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются основным типом двигателей в гражданской и военной авиации, используются как энергоустановки в судостроении, энергетике и газовой промышленности. Лопатки компрессоров авиационных двигателей работают в сложных температурно-силовых условиях и относятся к числу наиболее ответственных деталей газотурбинного двигателя.

Так, окружные скорости на периферии первых ступеней осевых компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) образцов 50–60-х годов составляли $U_k = 350...390$ м/с, максимальные температуры за компрессором $T_2 = 250...350$ °С, к 80-м годам эти же параметры составляли $U_k = 580$ м/с, $T_2 = 500$ °С; требования по упомянутым параметрам к настоящему времени увеличились до $U_k = 700$ м/с и $T_2 = 600$ °С [8].

Чтобы создать ГТД с такими параметрами, необходимо применение новых современных материалов.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время одним из основных материалов, применяемых в ГТД, являются титановые сплавы, обладающие высокой удельной прочностью, но и имеющие ряд существенных недостатков:

- повышенную чувствительность к концентраторам напряжений;
- низкую технологичность [8].

Эффективной заменой титанового сплава в лопатках компрессора ГТД могут стать композиционные материалы (КМ) на основе магниевых

матрицы, армированной борными и углеродными волокнами [4–8]. Но применение таких материалов требует проведения обширных научных исследований, включающих следующие направления:

- разработка методики формирования структуры лопатки из композиционного материала, обеспечивающей рациональный выбор коэффициента армирования и направления укладки армирующих волокон в каждой точке создаваемой лопатки из КМ;
- разработка технологии изготовления лопатки из композиционного материала;
- разработка методики прогнозирования и экспериментального определения физико-механических характеристик КМ в целом и его компонент в отдельности;
- разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния рабочей лопатки компрессора из композиционного материала, дающей объективную оценку прочности лопатки при разнообразных внешних нагрузках.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Целью работы является рассмотрение с точки зрения прочности возможности замены в рабочей лопатке компрессора ГТД титанового сплава композиционным материалом на основе магниевой матрицы, армированной углеродными и борными волокнами. При этом сопоставляются упругие и прочностные характеристики титанового сплава и композиционного материала, а также предлагается схема армирования лопатки, позволяющая снижать концентрацию напряжений в наиболее опасных точках лопатки.

При проведении исследования из-за чрезвычайной сложности данной задачи, используется принцип преемственности и считается, что су-

ществует работающая рабочая лопатка компрессора, изготовленная из титанового сплава, для которой известны все заданные газодинамические и инерционные силы.

При планируемой замене в рабочей лопатке титанового сплава на КМ, сохраняется вся наружная геометрия лопатки и режимы ее эксплуатации, что позволяет надеяться, что лопатка из КМ будем иметь необходимую прочность при выполнении следующих условий:

- удельная прочность КМ будет не ниже, чем удельная прочность титанового сплава;
- коэффициент запаса по статической нагрузке при максимальном режиме будет удовлетворять условиям прочности;
- применяемый КМ будет менее чувствительным к концентраторам напряжений.

Для оценки степени удовлетворения применяемого КМ данным требованиям был проведен ряд исследований:

- разработана методика и экспериментально изучены упругие и прочностные свойства композиционных материалов на основе магния, армированного углеродными и борными волокнами;
- создана и реализована на ПК методика расчета коэффициентов упругости композиционных материалов, изготавливаемых на основе магния, армированного углеродными и борными волокнами;
- разработана методика расчета напряжений в корневой части лопатки компрессора, армированной углеродными и борными волокнами.
- проведен анализ напряженного состояния корневой части лопатки, имеющей форму «ласточкин хвост», при различных схемах армирования и выработаны рекомендации по выбору схем армирования, обеспечивающих снижение максимальных напряжений в зонах их концентрации.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО КОМПОНЕНТ

Для оценки деформации и прочности лопатки, изготовленной из композиционного материала (КМ), необходимо знать модули упругости и пределы прочности применяемого материала. Наиболее точный метод их определения – это эксперимент.

Экспериментальные исследования проводились на плоских образцах прямоугольной формы толщиной 2 мм с армирующими волокнами, направленными вдоль длинной стороны образца. Образцы изготовлены методом литья.

3.1. Экспериментальное определение коэффициента армирования углеродомагния

Доля армирующих углеродных волокон определялась массовым коэффициентом армирования $\mu = m_c/m$, где m_c – масса армирующих волокон в исследуемом объеме КМ, имеющем общую массу m . Коэффициент армирования определялся на образцах, которые перед этим применялись для определения модулей упругости и пределов прочности.

Для экспериментального изучения коэффициента армирования μ была разработана методика, суть которой изложена ниже.

Для выделения углеродных волокон из композиционного материала, имеющего магниевую матрицу, образцы для растворения магния помещались в 2–15 мл азотной кислоты (ГОСТ 4461-77). При реакции выделялся газ бурого цвета NO_2 . Реакция происходила с обильным выделением тепла. После этого было проведено фильтрование с использованием фильтра «Белая лента». Углеродные волокна были высушены в шкафу сушильном лабораторном ШС–0,25–60 в течение 1 часа при температуре 150 °С, затем в течение 1 часа при комнатной температуре. Образцы взвешивались на весах лабораторных ВЛ модификации ВЛ – 210, имеющих наибольший предел взвешивания – 200 г; наименьший предел взвешивания – 10 мг; дискретность отсчета d , 0,1 мг; цену поверочного деления (e), 1 мг.

Испытывались образцы с массами в пределах от 0,25 до 0,65 г.

Исследования показали, что применяемая технология изготовления образцов из КМ характеризуется высокой стабильностью коэффициента армирования. Так, среднее арифметическое значение коэффициента армирования для изучаемой партии из восьми образцов равно $\mu = 0,275$ при среднеквадратичной ошибке $s_n^\mu = 2 \cdot 10^{-2}$ и коэффициенте вариации $\omega_n^\mu = 7,27\%$.

3.2. Экспериментальное изучение механических характеристик композиционного материала

Модуль упругости при растяжении

В работе определялся модуль упругости при растяжении E_p вдоль направления армирования КМ. Нагружение образцов проводилось на рычажных машинах постоянными растягивающими силами, а деформации измерялись тензомет-

ром Аистова ТА – 2М с точностью 1 мкм на базе $l_0 = 50$ мкм.

В результате исследований выяснилось, что для модулей упругости наблюдался значительный разброс экспериментальных результатов. Так, среднее арифметическое значение модуля упругости для изучаемой партии из четырех образцов равно $E_p = 172$ ГПа при среднеквадратичной ошибке $s_n^{Ep} = 78,1$ ГПа и коэффициенте вариации $\omega_n^{Ep} = 45,4\%$.

Предел прочности при растяжении

В работе также определялся предел прочности при растяжении $\sigma_{пчр}$ вдоль направления армирования КМ. Испытания проводились на испытательной машине FP – 10.

В результате исследований выяснилось, что для предела прочности при растяжении наблюдался значительный разброс экспериментальных результатов. Так, среднее арифметическое значение предела прочности для изучаемой партии из четырех образцов равно $\sigma_{пчр} = 394$ МПа при среднеквадратичной ошибке $s_n^{\sigma_{пчр}} = 141$ МПа и коэффициенте вариации $\omega_n^{\sigma_{пчр}} = 35,8\%$.

В процессе экспериментов перед определением предела прочности при растяжении $\sigma_{пчр}$ материала каждого из образцов, определялся модуль упругости при растяжении E_p на этом же образце. Это позволило выявить экспериментально зависимость между модулем упругости E_p и пределом прочности $\sigma_{пчр}$, которая представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что между модулем упругости E_p и пределом прочности $\sigma_{пчр}$ существует заметная корреляционная связь, показывающая, что с ростом модуля упругости пропорционально возрастает предел прочности.

Предел прочности при изгибе

В работе проведено исследование предела прочности при трехточечном изгибе $\sigma_{пчи}$ плоского образца из однонаправленного КМ. Испытания проводились на испытательной машине FP – 10.

В результате исследований выяснилось, что для предела прочности при изгибе наблюдается значительный разброс экспериментальных результатов. Так, среднее арифметическое значение предела прочности при изгибе для изучаемой партии из восьми образцов равно $\sigma_{пчи} = 367$ МПа при среднеквадратичной ошибке $s_n^{\sigma_{пчи}} = 106$ МПа и коэффициенте вариации $\omega_n^{\sigma_{пчи}} = 29,0\%$.

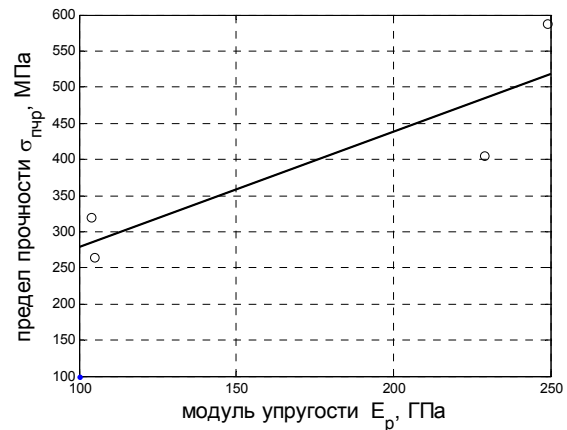


Рис. 1. Зависимость предела прочности при растяжении $\sigma_{пчр}$ от модуля упругости при растяжении E_p для композиционного материала

Причины значительного разброса экспериментальных результатов

Большой разброс значений модуля упругости при растяжении E_p , предела прочности при растяжении $\sigma_{пчр}$ и предела прочности при изгибе $\sigma_{пчи}$ можно объяснить:

- вырезкой образцов не строго вдоль армирующих волокон;
- недостаточно качественной пропиткой массива армирующих волокон магниевой матрицей;
- разбросом коэффициентов армирования КМ даже в пределах одной плиты.

Из этого следует вывод, что для создания материалов со стабильными упругими и прочностными характеристиками необходимо стремиться к максимально качественной технологии изготовления образцов и, конечно, самих изделий из данного вида КМ.

3.3. Экспериментальное определение предела прочности углеродных волокон

Рассмотрим волокнистый композиционный материал на основе матрицы из магниевых сплава МЛ-10 и углеродных волокон.

Традиционные изотропные материалы характеризуются высокой стабильностью механических свойств, что позволяет использовать их характеристики из справочников. Так, в частности, справочные данные для магниевых сплавов МЛ-10: плотность $\rho_{Mg} = 1800$ кг/м³, модуль упругости $E_{Mg} = 44$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{Mg} = 0,28$, предел прочности $\sigma_{пч,Mg} = 245$ МПа.

Для углеродных волокон характерен весьма широкий разброс значений пределов прочности,

поэтому возникает необходимость в его определении для каждой из партий.

Углеродная нить представляет собой пучок волокон, имеющих диаметр порядка 10 мкм.

Обозначим суммарную площадь поперечных сечений всех волокон, образующих нить через A .

Для определения площади поперечного сечения вначале был определен вес отрезка нити длиной $L = 2,5$ м, равный $Q = 1,031 \cdot 10^{-2}$ Н.

Затем записана формула для объема данной нити $V = AL$ и формула для вычисления плотности ρ_C материала углеродной нити:

$$\rho_C = \frac{Q}{gV} = \frac{Q}{gAL}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения.

Считая плотность углеродного волокна известной $\rho_C = 1800$ кг/м³, воспользовавшись (1), рассчитываем площадь поперечного сечения нити:

$$A = \frac{Q}{g\rho_C L} = 2,34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2. \quad (2)$$

Предел прочности материала волокон определится формулой

$$\sigma_{\text{пч}} = F_{\text{max}} / A, \quad (3)$$

где F_{max} – максимальная растягивающая нагрузка, воспринимаемая нитью без разрушения.

Таким образом, возникает, на первый взгляд, очень простая задача по определению максимальной растягивающей силы F_{max} , выдерживаемой данной нитью.

На самом деле оказалось весьма сложным определить F_{max} , и для определения этой величины был проведен ряд экспериментов.

Эксперимент 1

Концы углеродной нити наматывались на стержень диаметром 3 мм, и в таком состоянии накрученная на стержень нить зажималась в захватах между резиновыми прокладками.

Обрыв образца из нити длиной 110 мм произошел в месте намотки нити на стержень при растягивающей нагрузке $F_{\text{max}} = 78$ Н.

Эксперимент 2

Некрученая углеродная нить намотана на стержень диаметром 3 мм и место закрутки было вне захватов испытательной машины.

Обрыв образца из нити длиной 110 мм произошел в месте намотки нити на стержень при разрушающей нагрузке $F_{\text{max}} = 81$ Н.

Эксперимент 3

Углеродная нить пропитана клеем БФ-2 и проведена полимеризация при температуре $T = 150$ °С. Концы нити зажаты в захватах между наждачной бумагой № 600 и резиновыми прокладками. Обрыв образцов из нити длиной 110 мм произошел вблизи захватов при нагрузках $F_{\text{max}} = 330, 350, 364, 370$ Н со средним значением $\hat{F}_{\text{max}} = 353,5$ Н.

Проведенные исследования показали, что основными трудностями при определении предела прочности углеродной нити являются:

- обеспечение одновременного нагружения всех волокон,
- обеспечение передачи нагрузки от захватов к нити.

Из-за этих причин экспериментальные значения предела прочности, как правило, получаются существенно заниженными.

В связи с этим из всех экспериментальных пределов прочности необходимо выбирать наибольший, так как при его определении удалось наиболее близко приблизиться к реальному пределу прочности.

В нашем случае наиболее объективным следует считать эксперимент 3.

Предел прочности углеродных волокон

На основе эксперимента 3 определим предел прочности углеродных волокон:

$$\sigma_{\text{пч,C}} = \frac{F_{\text{max}}}{A} = 1500 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Полученное значение предела прочности является, скорее всего, заниженным из-за практической невозможности в таком эксперименте одновременно нагрузить все углеродные волокна, но этот предел прочности можно взять в качестве ориентира для прогнозирования прочности углеродомагния.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Модуль упругости и предел прочности однонаправленного углеродомагния

Для обеспечения прочности перьевой части рабочей лопатки целесообразно армирующие волокна укладывать в направлении оси лопатки.

При этом основными необходимыми для расчета лопатки характеристиками являются

модуль упругости и предел прочности композиционного материала вдоль направления его армирования.

В работе изучался углеродомагний с коэффициентом армирования $\Psi = 0,275$.

При рассмотрении однонаправленного КМ возможно применение формул смесей [2], позволяющих сравнительно просто определить расчетные модуль упругости E_{MgC}^T и предел прочности $\sigma_{пч,MgC}^T$ углеродомагния вдоль армирующих волокон:

$$\begin{cases} E_{MgC}^T = \Psi E_C + (1 - \Psi) E_{Mg} = 142 \text{ ГПа}, \\ \sigma_{пч,MgC}^T = \sigma_{пч,C} (\Psi + (1 - \Psi) \frac{E_{Mg}}{E_C}) = \\ = 532 \text{ МПа}, \end{cases} \quad (5)$$

где E_C – модуль упругости углеродных волокон, принимаемый равным $E_C = 400$ ГПа, E_{Mg} – модуль упругости магниевого сплава $E_C = 44$ ГПа.

Сопоставление расчетных и экспериментальных модулей упругости и пределов прочности углеродомагния

Расчетный модуль упругости при растяжении углеродомагния равен $E_{MgC}^T = 142$ ГПа, экспериментальный – находится в пределах $E_p = 104...249$ ГПа.

Расчетный предел прочности при растяжении углеродомагния $\sigma_{пч,MgC}^T = 532$ МПа, экспериментальные значения находятся в пределах $\sigma_{пчр} = 264...587$ МПа.

Следует отметить, что расчетные значения модуля упругости и предела прочности лежат в пределах зоны экспериментальных результатов.

Большой разброс результатов экспериментов, как уже говорилось выше, может свидетельствовать о существенной неравномерности распределения армирующих волокон по объему образцов и недостаточно полной пропитке композита матрицей.

Заменяя титановый сплав на композит с металлической матрицей, мы должны сопоставить их удельные прочности.

Так, титановый сплав ВТ-22 имеет плотность $\rho_{Ti} = 4600$ кг/м³ и предел прочности $\sigma_{пч,Ti} = 1400$ МПа, удельную прочность

$$\tilde{\sigma}_{пч,Ti} = \frac{\sigma_{пч,Ti}}{\rho} = 3,1 \cdot 10^4 \text{ м}. \quad (6)$$

Рассматриваемый углеродомагний имеет плотность $\rho_{MgC} = 1800$ кг/м³ и для прогнозируемого предела прочности $\sigma_{пч,MgC}^T = 532$ МПа его удельная прочность

$$\tilde{\sigma}_{пч,MgC} = \frac{\sigma_{пч,MgC}}{\rho_{MgC}} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ м}. \quad (7)$$

Таким образом, титановый сплав ВТ-22 и углеродомагний имеют практически одинаковую удельную прочность и лопатки из них могут работать при одинаковых величинах центробежных сил.

При действии газодинамических сил может потребоваться некоторое увеличение поперечного сечения лопатки вблизи ее корневой части, что с точки зрения весовых характеристик вполне допустимо, так как при одинаковой геометрической форме лопатка из углеродомагния легче титановой в $4,6/1,8 \approx 2,5$ раза, что позволяет производить упрочнение рабочей лопатки за счет увеличения поперечного сечения.

В то же время увеличение поперечного сечения может и не понадобиться, так как лопатка из КМ менее чувствительна к концентрации напряжений по сравнению с лопаткой из титанового сплава.

В итоге можно утверждать, что если перьевая часть рабочей лопатки из КМ будет легче титановой, то снизит нагрузку на диск компрессора и позволит уменьшить его вес, что в целом приведет к снижению веса ГТД.

4.2. Упругие характеристики гибридного композиционного материала на основе углеродных и борных волокон

Одной из основных задач механики композиционных материалов является вычисление эффективных характеристик упругости КМ на основе информации о физико-механических свойствах их компонент и законах распределения компонент по объему материала.

Для решения данной задачи в работе рассматривается представительный объем КМ в форме параллелепипеда, состоящего из магнито-матрицы, армированной одним борным волокном диаметра 100 мкм и четырнадцатью углеродными волокнами диаметра 10 мкм, параллельными между собой и направленными под некоторым углом к оси борного волокна.

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

В случае анизотропии общего вида обобщенный закон Гука для эквивалентного материала имеет вид [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = E_{1,1}\varepsilon_x + E_{1,2}\varepsilon_y + E_{1,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{1,4}\gamma_{xy} + E_{1,5}\gamma_{yz} + E_{1,6}\varepsilon_{xz}, \\ \sigma_y = E_{2,1}\varepsilon_x + E_{2,2}\varepsilon_y + E_{2,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{2,4}\gamma_{xy} + E_{2,5}\gamma_{yz} + E_{2,6}\varepsilon_{xz}, \\ \sigma_z = E_{3,1}\varepsilon_x + E_{3,2}\varepsilon_y + E_{3,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{3,4}\gamma_{xy} + E_{3,5}\gamma_{yz} + E_{3,6}\varepsilon_{xz}, \\ \tau_{xy} = E_{4,1}\varepsilon_x + E_{4,2}\varepsilon_y + E_{4,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{4,4}\gamma_{xy} + E_{4,5}\gamma_{yz} + E_{4,6}\varepsilon_{xz}, \\ \tau_{yz} = E_{5,1}\varepsilon_x + E_{5,2}\varepsilon_y + E_{5,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{5,4}\gamma_{xy} + E_{5,5}\gamma_{yz} + E_{5,6}\varepsilon_{xz}, \\ \tau_{xz} = E_{6,1}\varepsilon_x + E_{6,2}\varepsilon_y + E_{6,3}\varepsilon_z + \\ \quad + E_{6,4}\gamma_{xy} + E_{6,5}\gamma_{yz} + E_{6,6}\varepsilon_{xz}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Для определения констант коэффициентов $E_{i,j}$, $i, j = 1, \dots, 6$ закона Гука (8) был проведено шесть математических экспериментов, в процессе которых поочередно принималась неравной нулю одна из шести компонент деформации.

В первом эксперименте задается $\varepsilon_x \neq 0$ при остальных нулевых деформациях, с помощью вычислительного комплекса ANSYS определяются осредненные напряжения $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z, \hat{\tau}_{xy}, \hat{\tau}_{yz}, \hat{\tau}_{xz}$ и при их подстановке в систему (8) получаются выражения для определения шести коэффициентов упругости КМ:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1,1} = \frac{\hat{\sigma}_x}{\varepsilon_x}, \quad E_{2,1} = \frac{\hat{\sigma}_y}{\varepsilon_x}, \quad E_{3,1} = \frac{\hat{\sigma}_z}{\varepsilon_x}, \\ E_{4,1} = \frac{\hat{\tau}_{xy}}{\varepsilon_x}, \quad E_{5,1} = \frac{\hat{\tau}_{yz}}{\varepsilon_x}, \quad E_{6,1} = \frac{\hat{\tau}_{xz}}{\varepsilon_x}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Задавая аналогичным образом в пяти экспериментах еще пять деформаций $\varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$, определяем остальные коэффициенты упругости закона Гука (8).

В качестве примера применения данной методики представляем результаты расчетов в па-

кете ANSYS эффективных коэффициентов жесткости $E_{i,j}$, $i = 1, \dots, 6$, $j = 1, \dots, 6$ в ГПа гибридного композиционного материала на основе магниевых сплава МЛ-10, армированного вдоль оси X углеродными волокнами, а вдоль оси Y борными волокнами при коэффициентах армирования по углероду $\psi_C = 0,339$, а по бору $\psi_B = 0,264$.

При этом эквивалентный материал является ортотропным, для которого

$$E_{i,j} = 0, \quad i = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 6, \quad (10)$$

за исключением:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1,1} = 140, \quad E_{1,2} = 44, \quad E_{1,3} = 31, \\ E_{2,1} = 44, \quad E_{2,2} = 194, \quad E_{2,3} = 43, \\ E_{3,1} = 31, \quad E_{3,2} = 43, \quad E_{3,3} = 101, \\ E_{4,4} = 48, \quad E_{5,5} = 42, \quad E_{6,6} = 33. \end{array} \right. \quad (11)$$

5. ВЛИЯНИЕ АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

После обеспечения прочности перьевой части рабочей лопатки компрессора авиационного двигателя, особое внимание должно быть уделено явлению концентрации напряжений. Это связано с тем, что несущая способность рабочей лопатки очень часто определяется напряженным состоянием концентрации напряжений, так как именно там, зачастую, прежде всего наступает предельное состояние и разрушение.

В рабочей лопатке компрессора очень сильная концентрация напряжений имеет место в местах перехода от пера лопатки к ее корневой части. Одним из основных и эффективных способов снижения концентрации напряжений в этой зоне является увеличения радиусов поверхности перехода от наружной поверхности пера лопатки к поверхности ее хвостовой части.

Применяя КМ, можно дополнительно применить принципиально новый способ снижения концентрации напряжений, основанный на армировании хвостовика лопатки высокомодульными и высокопрочными борными и углеродными волокнами.

В осевых компрессорах широко применяется схема пазового соединения лопатки с диском замком, имеющим трапециевидный профиль «ласточкин хвост». 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 P , приложенной к

поперечному сечению B_5C_5 пера лопатки, на некотором достаточно большом расстоянии от хвостовика лопатки (рис.2).

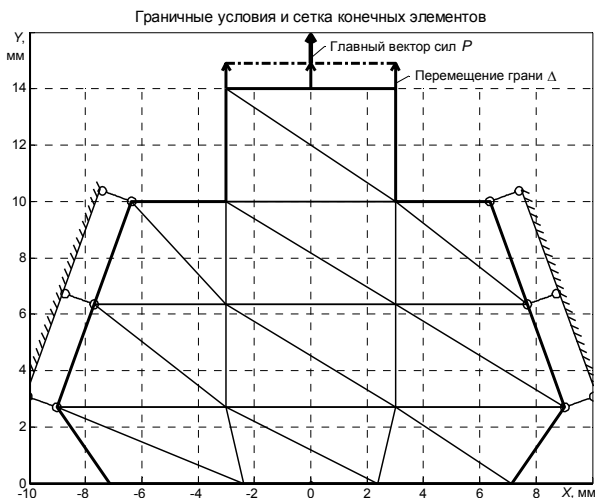


Рис. 2. Внешняя сила P , действующая на хвостовик лопатки, связи, наложенные на хвостовик, и конечно-элементная сетка

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. 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 плоская фигура, выбранная в качестве модели хвостовика лопатки в форме «ласточкин хвост», была армирована по схеме, представленной на рис. 3.

При этом углеродные волокна направляются вдоль осью пера лопатки, а борные волокна направлены перпендикулярно к боковым опорным поверхностям хвостовика лопатки (рис. 3). При выбранной схеме армирования армирующие волокна занимают не весь объем сечения лопатки, и есть зоны, где находится только матричный материал.

Были проведены расчеты при различных схемах армирования. При первом расчете рассматривался хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10 без армирования (рис. 4). В остальных расчетах рассматривался хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными и борными волокнами с различными коэффициентами армирования.

Наилучшим из рассмотренных вариантов оказалось армирование углеродными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_C = 0,3$ и бор-

ными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_B = 0,3$ (рис. 5).

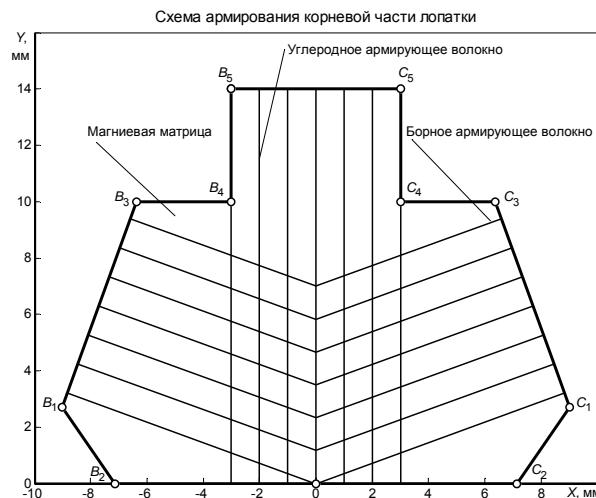


Рис. 3. Сечение корневой части лопатки и направление укладки армирующих волокон композиционного материала

При этом углеродные волокна направлены вдоль оси пера лопатки и работают на растяжение, а борные волокна направлены перпендикулярно боковым граням хвостовика «ласточкин хвост» и работают на сжатие. Результаты для данного случая нагружения представлены на рис. 5.

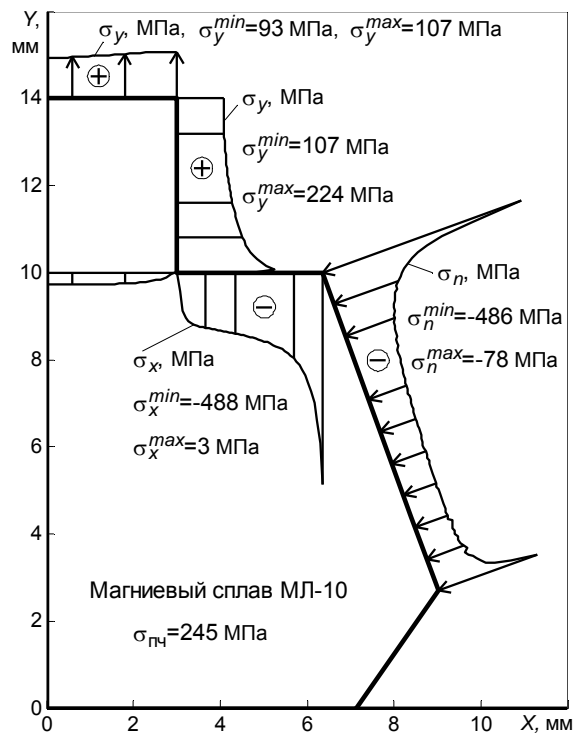


Рис. 4. Эпюры напряжений по поверхности изотропного тела из магниевого сплава МЛ-10

Проведенные расчеты напряженно-деформированного состояния для модели корневой части лопатки в форме «ласточкин хвост» показывают, что схема армирования и объемная доля армирующих волокон оказывают очень сильное влияние на напряжения в зонах концентрации напряжений. Так, при армировании пера лопатки углеродными волокнами, направленными вдоль оси лопатки, и дополнительном армировании хвостовика лопатки борными волокнами, перпендикулярными его боковым сторонам, удастся снизить напряжения в зонах концентрации от 1,36 до 3,15 раза. При этом армирование существенно повышает прочность материала лопатки, а значит, и прочность самой лопатки.

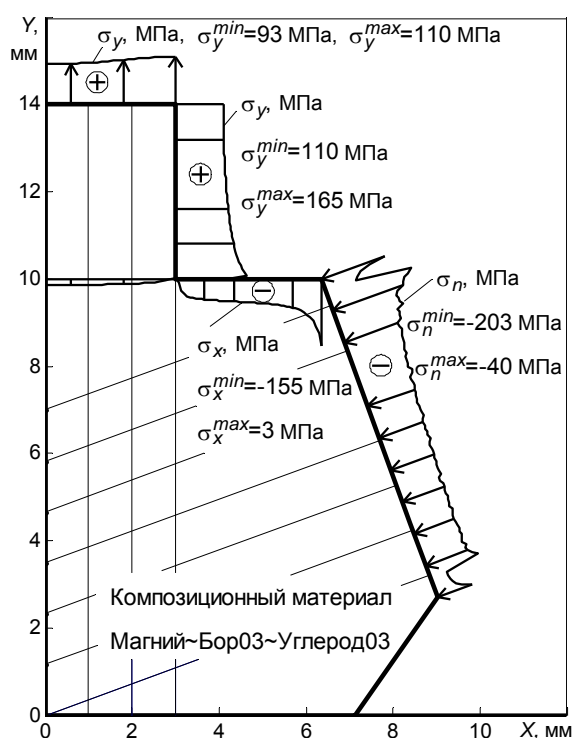


Рис. 5. Эпюры напряжений для тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными и борными волокнами при $\psi_C = 0,3$, $\psi_B = 0,3$

Таким образом, учитывая, что применение КМ взамен титанового сплава позволяет снизить напряжения от центробежных сил в 2,5 раза, а снижение концентрации напряжений по сравнению с изотропным материалом, как минимум, оценивается в 1,3, можно планировать снижение напряжений в местах концентрации примерно в $2,5 \cdot 1,3 = 3,25$ раза.

Предел прочности титанового сплава лишь в $1500 / 532 \approx 2,8$ выше чем у КМ, так что применение КМ не должно привести к снижению прочности лопатки.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ возможности замены рабочих лопаток компрессора ГТД, изготавливаемых из титанового сплава ВТ-22, на рабочие лопатки из композиционного материала на основе металлической матрицы из сплава МЛ-10 и показано, что такая замена возможна и ее итогом может быть существенное снижение веса компрессора ГТД.

2. Показано теоретически и экспериментально, что композиционный материал на основе магниевой матрицы и углеродных армирующих волокон имеет удельную прочность, практически равную удельной прочности титанового сплава ВТ-22, что позволяет ожидать сохранения прочности первой части рабочей лопатки компрессора при замене титанового сплава на КМ.

3. Предложен новый метод снижения концентрации напряжений в хвостовой части рабочей лопатки компрессора, изготавливаемой из композиционного материала, заключающийся в перераспределении напряжений в хвостовике лопатки за счет специально выбранной схемы ее армирования углеродными и борными волокнами.

4. Рекомендуется для повышения прочности пера рабочей лопатки компрессора армировать её углеродными волокнами, направленными вдоль оси пера лопатки, а корневую часть лопатки рекомендуется дополнительно армировать более жесткими борными волокнами, перпендикулярными к боковым граням хвостовика лопатки.

5. Композиционный материал на основе магниевой матрицы, армированной углеродными и борными волокнами, очень чувствителен к параметрам технологического процесса его изготовления, что при удачно выбранной технологии изготовления КМ должно позволить получить для данного КМ существенно более высокие характеристики по сравнению с достигнутыми для образцов рассматриваемых в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология М.: Техносфера, 2004. 408 с.
2. Первушин Ю. С., Жернаков В. С. Проектирование и прогнозирование механических свойств однонаправленного слоя из композиционного материала: учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2002. 27 с.
3. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.

4. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Методы проектирования рабочих лопаток из композиционных материалов // Машиностроение, конструкционные материалы и технологии: сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа: Изд-во «Гилем», 2002. С. 107–117.

5. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Проектирование рабочих лопаток из композиционного материала // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа: Изд-во «Гилем», 2004. С. 7–18.

6. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Проблемы обработки рабочих лопаток из композиционного материала // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа: Изд-во «Гилем», 2005.

7. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Основы проектирования и создания рабочих лопаток композиционного материала // Вестник УГАТУ. Т. 11, № 2 (29). Уфа, 2008. С. 48–54.

8. **Рыжов А. А.** Пути развития двигателестроения // Мавлютовские чтения: тр. Рос. науч.-техн. конф., Т. 2 Проблемы расчета, проектирования и производства авиационно-ракетной техники / Уфимск. гос. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 222–226.

ОБ АВТОРАХ

Павлов Виктор Павлович, профессор каф. сопротивления материалов УГАТУ. Дипл. инж. по авиационным двигателям (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по динамике и прочности (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. механики композиционных материалов.

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

Филиппов Александр Анатольевич, асп. той же каф. Дипл. инж.-программист по мат. моделированию и системному администрированию (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. механики композиционных материалов.