

УДК 539.3:629.73.02

А. Ф. ИВАХ, А. А. РЫЖОВ, Б. К. ГАЛИМХАНОВ**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ
РАБОЧИХ ЛОПАТОК
ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Разработка двигателя нового поколения требует создания и использования новых материалов с высокой удельной прочностью — композиционных материалов (КМ) на металлической матрице. В ФГУП НПП «Мотор» отработывались вопросы разработки лопаток компрессора из КМ (В-Mg), проводились обширные экспериментальные исследования по оценке механических характеристик КМ на образцах и моделях лопаток при разных видах нагружения и обеспечения эксплуатационных свойств материала (коррозионной и эрозивной стойкости). Результаты исследовательских работ, приводимые в статье, подтвердили принципиальную возможность создания рабочих лопаток компрессора из КМ на металлической основе с учетом всех требований, предъявляемых к их конструктивному облику. *Газотурбинный двигатель; композиционные материалы; волокнистая структура; эксплуатационные свойства; пропитка каркаса; титановая оболочка; модель лопатки; экспериментальные исследования*

В двигателестроении России приоритетными являются такие задачи, как модернизация двигателей 4++ и создание научно-технического задела для разработки двигателей пятого поколения.

Решение поставленных задач требует использования новых конструкционных материалов с высокой удельной прочностью, к которым относятся и композиционные материалы (КМ) на металлической основе — без применения подобных материалов невозможно обеспечить необходимые весовые и аэродинамические характеристики [1].

В качестве материалов деталей ГТД, в зависимости от принадлежности к конкретному узлу двигателя и от условий температурного и силового нагружения, могут быть использованы как полимерные, так и металлические КМ (МКМ). Для рабочих лопаток (РЛ) компрессора наиболее приемлемым является КМ на основе легких алюминиевых или магниевых сплавов. В отечественном двигателестроении, несмотря на отсутствие на сегодня практических результатов, ведутся исследования и работы по созданию облегченной широкохордной лопатки вентилятора ТРДД для магистрального самолета будущего с использованием КМ типа боралюминий [2].

Отработка конструктивного облика рабочих лопаток из КМ первых ступеней компрессора низкого давления позволит повысить напорность каскада, уменьшатся контурные нагрузки на диски рабочих колес.

Опыт предприятия по проектированию широкохордных лопаток вентилятора из КМ боралюминия и лопаток направляющих аппаратов из боралюминия и бормагния перспективного двухконтурного турбореактивного двигателя показал возможность и реальность применения КМ для изготовления подобных высоконагруженных деталей.

Выбор типа КМ определялся условиями работы рабочих колес (температура набегающего потока, частота вращения ротора), особенностью конструктивного облика лопатки (большое удлинение, закрученность, сложность геометрии профилей) и связанной с этим возможной технологией изготовления лопаток.

С учетом вышеназванных условий в качестве материала лопаток был принят КМ волокнистой структуры на металлической основе — материал бормагний (В-Mg). Данный материал при использовании соответствующей технологии литья позволяет получить детали сложной конфигурации.

Выбор материала был также основан на том, что применение КМ требует постоянного опытного подтверждения его характеристик и работоспособности в условиях сложного нагружения — необходимо наличие данного материала на производстве.

При проектировании деталей из КМ, помимо формирования конструктивного облика детали, требуется определение структуры самого КМ. Из этого вытекает важная особенность при использовании КМ — проектирование самого композиционного материала.

При разработке лопаток компрессора необходимо было решить следующие задачи:

- проектирование материала с оптимальной структурой, обеспечивающей потребные характеристики. Структура определяется степенью объемного наполнения КМ волокнами, количеством слоев, последовательностью и углами укладки волокон в слоях;
- изготовление каркаса лопатки из борных волокон;
- разработка технологии производства, обеспечивающей получение качественных отливок (контроль пористости и состояния поверхности отливки);
- обеспечение эксплуатационных свойств материала (коррозионной и эрозионной стойкости).

Решение задачи по оптимизации структуры материала и оценка потребных механических характеристик связана с анализом напряженно-деформированного состояния лопатки и уровнем напряжений, определяющими работоспособность детали. Поэтому за основу работ по созданию нового материала была принята отработка конструктивного облика рабочей лопатки первой ступени КНД существующего ТРДДФ.

Для наиболее нагруженного режима определены средние значения напряжений растяжения в профильной части и напряжений сдвига и смятия в хвостовике лопатки из КМ. По их значениям оказалось возможным оценить потребные значения предельных напряжений материала, обеспечивающие работоспособность лопаток:

- предел прочности на растяжение в направлении действия центробежных сил

$$\sigma_B \geq 400 \text{ МПа};$$

- на смятие

$$\sigma_{CM} \geq 250 \text{ МПа};$$

- на сдвиг

$$\tau_{CD} \geq 80 \text{ МПа}.$$

Свойства КМ в основном зависят от характеристик борных волокон, их расположения и объемного содержания. Характеристики волокон и материала матрицы приведены в табл. 1.

Предел прочности борных волокон принят по результатам проведенных испытаний на растяжение волокон в исходном состоянии (из рулона) и вытравленных из испытанных образцов (средние значения σ_B отличались несущественно).

Таблица 1

№	Параметры	Бор (волокно)	Магний (сплав)
1	σ_B , МПа	2256	245
2	E , ГПа	380	42
3	ρ , кг / м ³	2650	1780
4	ν	0,11	0,33

Плотность КМ определяется по правилу смесей

$$\rho = \nu \rho_B + (1 - \nu) \rho_M, \quad (1)$$

где ν — значение объемного наполнения КМ волокнами;

ρ_B, ρ_M — плотность борных нитей и матрицы соответственно.

По опыту проектирования лопаток из КМ за основу дальнейших исследований принимается КМ с однонаправленными волокнами. Основные характеристики КМ определялись по следующим выражениям [3, 4]:

- предел прочности вдоль волокон при растяжении

$$\sigma_B = \nu \sigma_{BB} + (1 - \nu) \sigma_{BM}, \quad (2)$$

где σ_{BB} — предел прочности борных волокон;

σ_{BM} — напряжения в матрице, соответствующие предельной деформации волокон до разрушения;

- модуль упругости вдоль волокон

$$E_1 = \nu E_B + (1 - \nu) E_M \quad (3)$$

где E_B, E_M — модули упругости материалов волокна и матрицы соответственно;

- модуль упругости поперек волокон

$$E_2 = \frac{E_B E_M}{E_1}; \quad (4)$$

- коэффициенты Пуассона

$$\nu_{12} = \nu\nu_B + (1 - \nu)\nu_M; \quad (5)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12}E_2/E_1, \quad (6)$$

где ν_B, ν_M — коэффициенты Пуассона материалов волокна и матрицы соответственно.

Приведенные формулы получены в предположении, что матрица более пластична, обеспечивается совместная деформация волокон и матрицы до разрушения (силы их сцепления достаточны). В [1] предлагается использовать выражения, включающие вместо упругих констант секущие их значения — $E_{сек}, \nu_{сек}$. Для подобного уточнения необходимо использовать экспериментальные кривые деформирования материалов волокон и матрицы.

Пределы прочности, определенные по правилу смесей, хорошо совпадают с экспериментальными данными для КМ, содержащих волокна с очень стабильными значениями пределов прочности (например, волокна вольфрама).

Для КМ на основе борных волокон экспериментальные значения пределов прочности отличаются, иногда существенно, от значений, полученных по правилу смесей. Отличия в свойствах обусловлены наличием местных дефектов в волокне, снижающих общую прочность пучка волокон по сравнению со средним значением прочности отдельных волокон, и недостаточной силой сцепления волокон и матрицы.

Для анализа экспериментальных данных возможно использование следующей формулы [5]

$$\sigma_B = \beta\nu\sigma_{\nu B}, \quad (7)$$

где β — коэффициент, учитывающий взаимодействие волокон бора и материала матрицы.

При усиливающем вкладе матрицы $\beta > 1$, при дефектных волокнах и химическом взаимодействии волокон и матрицы коэффициент β может быть меньше единицы.

По значениям потребных напряжений была уточнена величина объемного наполнения КМ волокнами бора, принятая для отработки облика лопатки из КМ

$$v = 0,3.$$

Ожидаемые (теоретические) значения характеристик КМ из бормагния приведены в табл. 2.

Таблица 2

σ_B , МПа	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	ν_{12}	ν_{21}	ρ , кг/м ³
677	143	112	0,264	0,207	2040

При вычислении ожидаемого предела прочности вдоль волокна коэффициент эффективности матрицы принят равным единице.

До экспериментального исследования механических характеристик КМ был проведен анализ возможных форм разрушения лопатки [6]. На образцах из КМ с двухзамковым исполнением (с хвостовиками типа «ласточкин хвост», характерным для соединительной лопатка–диск рабочих колес компрессоров), были смоделированы условия преобладающего действия и последующего разрушения от напряжений разных видов:

- растягивающих (разрушение по стержню образцов);
- сдвиговых (разрушение по хвостовику);
- сжимающих (разрушение по хвостовику) (рис. 1).

Исходя из возможных форм разрушения лопаток из КМ, были проведены исследования на образцах, отлитых по технологии изготовления моделей лопаток.

В процессе изготовления опытной партии модельных лопаток потребовался анализ технологии производства (метода вакуумно-компрессионной пропитки).

В результате исследований и большого объема практических работ были предложены и в дальнейшем применялись операции, позволившие получить качественные детали заготовки [9]. Наиболее важными из них является плавка сплава магния непосредственно в автоклаве в нейтральной среде (аргон).



Рис. 1

Проведены испытания образцов:

1) на растяжение:

- по определению усилий разрыва плоских образцов;
 - препарированных плоских образцов для построения кривых деформирования;
- 2) на сжатие — вдоль и поперек волокон;
- 3) плоских образцов 2-х типов на срез.

На рис. 2 показаны образцы после испытаний на растяжение и сжатие.

Сжатие образцов вдоль волокон (рис. 2, б) приводит к разрушению с изломом волокон бора с последующим смятием материала матрицы. При сжатии поперек волокон разрушение образцов соответствует разрушению в хвостовике двухзамкового образца.

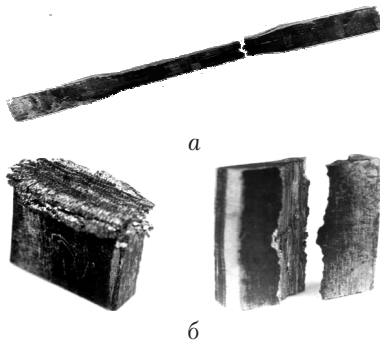


Рис. 2. а — растяжение, б — сжатие

В результате испытаний получены следующие характеристики:

1) на растяжение:

- экспериментальные значения предела прочности составили от 80% (не менее 600 МПа) и выше (в среднем 93%) теоретических, определяемых по правилу смесей;

- значения модуля упругости вдоль волокон, определенных по результатам тензометрирования образцов, оказались близки к ожидаемым

$$E_1^T = 1,36 \times 10^5 \text{ МПа}$$

$$E_1^S = (1,29 - 1,41) \times 10^5 \text{ МПа}.$$

2) на сжатие:

- вдоль волокон — напряжения разрушения — 1200–1300 МПа;
 - поперек волокон — 170–220 МПа.
- 3) на срез — предел прочности 110 МПа;
- 4) коэффициент Пуассона $\nu_{21} = 0,227$.

Результаты оказались соответствующими потребным значениям.

Модельная лопатка спроектирована для проведения экспериментальных исследований на разрывной машине по проверке рабо-

тоспособности детали в условиях преобладающего действия центробежных сил и на разгонном стенде в составе рабочего колеса вентилятора ТРДДФ [7].

Определяющим прочность сложных по форме деталей из КМ являются зоны резкого (ступенчатого) изменения характерных геометрических размеров. В рабочих лопатках компрессоров ГТД наиболее сложной в конструировании и в обеспечении необходимой прочности является зона перехода пера лопатки в хвостовик. Проблема заключается в отработке структуры материала (укладки волокон, расположения слоев), работоспособной в условиях нагружения перерезывающими и сжимающими усилиями (вызываемыми центробежными силами профильной части и хвостовика лопатки).

Профильная часть модельной лопатки выполняется из слоев разной ширины с волокнами, направленными продольно (по высоте лопатки). Однонаправленная укладка волокон принята из условия преобладающего действия растягивающих усилий при испытании модельной лопатки на разрывной машине и на разгонном стенде (крутящий и изгибающий лопатку моменты незначительны).

Более сложным является исполнение хвостовика лопатки — помимо слоев с продольным расположением волокон (переходящих из профильной части) предусматривается использование слоев с поперечным расположением. Подобное исполнение хвостовика должно обеспечить надежную работу лопатки в целом, так как поперечные волокна будут воспринимать как перерезывающие силы (передаваемые материалом матрицы), так и сжимающие нагрузки (усилия по контактным поверхностям). Каркас модельной лопатки состоит из слоев в виде тканевой сетки, основой которой являются борные волокна диаметром 0,14 мм, а утком — тонкая проволока из вольфрама ($d \approx 0,07$ мм).

Модель лопатки, изготовленная по уточненной технологии, представлена на рис. 3 [9].



Рис. 3

Экспериментальное исследование моделей рабочей лопатки на растяжение проводилось с целью проверки работоспособности переходной части перо–хвостовик.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

P_p , кгс	6600	6000	7400	6800
σ_p , МПа	262	238	294	270
τ_c , МПа	62	56	69	64

В этой же таблице приведены значения напряжения растяжения в корневом сечении σ_p и среза в хвостовике τ_c , возникающие в момент разрушения.

Данные напряжения существенно ниже их предельных значений — усилия разрушения в основном определяются адгезионной прочностью в зоне хвостовика лопатки — на рис. 4 показаны фотографии моделей лопаток, разрушение которых произошло в зоне ступенчатого перехода перо–хвостовик.



Рис. 4

Значения усилий разрушения оказались вполне удовлетворительными, не менее, чем двойная эксплуатационная нагрузка ($P_{\max} \approx 3 \text{ тс}$). Таким образом, работоспособность модельной лопатки по переходной части при статическом нагружении подтверждается.

Работоспособность деталей АД и ЭУ в значительной мере зависит от сопротивления материалов динамическим напряжениям. Поэтому на данном этапе отработки конструкции лопатки важным является оценка предела выносливости используемого КМ [8]. Настройка лопатки на вибростенде требует предварительного определения частот собственных колебаний.

Динамические характеристики данной детали оценивались МКЭ. Собственные частоты колебаний оказались зависимыми (в значительной степени) от используемой модели материала. В табл. 4 приведены их значения для 5-ти первых форм колебаний при разных моделях материала (частота вращения не учитывается).

ты колебаний оказались зависимыми (в значительной степени) от используемой модели материала. В табл. 4 приведены их значения для 5-ти первых форм колебаний при разных моделях материала (частота вращения не учитывается).

Таблица 4

Материал	Частота, гц				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
изотропный	139	854	973	1119	2444
трансверсально-изотропный	102	628	663	771	1725

Последующий экспериментальный анализ показал, что более достоверными являются результаты, полученные при трансверсально-изотропной модели материала.

На рис. 5 показано деформированное состояние модельной лопатки по первой (основной) изгибной форме.

Экспериментальное исследование на установившуюся прочность модельной лопатки проводилось по первой изгибной форме. По картинкам деформирования при колебании модельной лопатки, полученным МКЭ, были уточнены узловые линии, соответствующие зонам действия максимальных динамических напряжений.

Модельная лопатка при напряжениях $\sigma_v = 20 \text{ кгс/мм}^2$ и 35 кгс/мм^2 выдержала базовое количество циклов $N = 2 \cdot 10^7$.

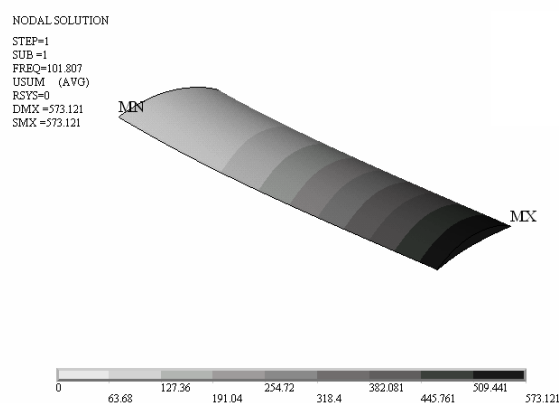


Рис. 5

Необходимо отметить, что при испытании проявилось некоторое снижение значения собственной частоты колебаний — от 103 Гц (в начальной стадии) до 98 Гц (в

последней стадии). Этот эффект был отмечен и при испытании лопаток из боралюминия [12]. Во второй половине испытаний (примерно 10^7 циклов) собственная частота лопатки стабилизировалась и держалась на уровне 100 Гц. Экспериментальные значения практически совпали с расчетным ($f_1^T = 102$ Гц).

Результаты исследования являются удовлетворительными, развитие трещин в зонах некондиционности лопатки не наблюдалось.

Проблемы обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик, связанных в первую очередь с вопросами коррозионной и износоустойчивостью при работе в широком диапазоне климатических условий являются весьма сложными [11]. Основные требования, которым должны удовлетворять покрытия для создания надёжного защитного слоя:

- 1) покрытие должно являться сплошным, изолирующим сплав от коррозионной среды;
- 2) являться прочным, износоустойчивым и иметь высокую адгезию к сплаву.

Рассмотрев возможные методы защиты рабочих лопаток из КМ от воздействия агрессивной среды, можно выделить два способа, которые являются наиболее перспективными.

Первым является известный способ получения защитного покрытия электрохимическим анодным окислением в электролитах. Данный способ требует продолжения достаточно объемных и сложных исследований для получения положительных результатов.

Второй способ защиты лопаток из КМ заключается в проектировании лопаток с оболочкой из фольги из титанового сплава [10].

Подобное решение использовано фирмой General Electric по защите лопатки вентилятора из КМ типа эпоксид–уголь. В России создан научный задел и ведутся практические работы по разработке широкохордного вентилятора из боралюминия с титановой оболочкой для перспективного ТРДД.

На рис. 6 представлена штамповка оболочки из материала Вт-23.

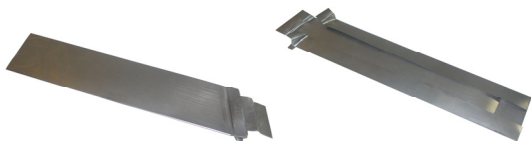


Рис. 6

Лопатка изготавливается методом вакуумно-компрессионной пропитки каркаса из

борных волокон, укладываемого в титановую оболочку. Полученная по такой технологии рабочая лопатка представлена на рис. 7.

По первым полученным опытным образцам можно сделать следующие выводы:

- пропитка каркаса удовлетворительная;
- сцепление титана и магния обеспечивает достаточную адгезионную прочность.

Для проверки адгезионной прочности пары титан – магний были изготовлены образцы из бормагниевого рабочей лопатки с титановым кожухом.

В ходе испытаний ни один образец из 10 не разрушился по причине нарушения адгезионной прочности между магнием и титановой фольгой (сдвига не произошло). Разрушение происходило за счет обрыва титановой фольги. Напряжения разрыва составили $\sigma_p = 383–451$ МПа (39–46 кгс/мм²), что соответствует пределу прочности материала фольги.

Характер разрушения образцов показан на рис. 8.



Рис. 7



Рис. 8

Результаты испытаний подтвердили достаточную адгезионную прочность связи магний–титан.

Таким образом, из анализа условий нагружения, исследования особенностей поведения КМ из бормагния под действием характерных усилий, разработан алгоритм подготовки технических условий (ТУ) на проектирование лопатки рабочего колеса компрессора. По разработанному ТУ выпущена рабочая документация с учетом структуры КМ – количества слоев, укладки волокон, усиления замковой части и зон перехода профильной части в хвостовик и использования защитной оболочки из титановой фольги.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования характеристик КМ на образцах показали их соответствие теоретическим, определяемым

по истинным значениям пределов прочности компонентов КМ.

2. Результаты исследований моделей рабочей лопатки соответствуют нормам прочности и требованиям к материалам деталей авиационных двигателей.

3. Оработана технология изготовления сложных деталей из КМ типа В-Мg методом вакуумно-компрессионной пропитки.

4. Оработано конструктивное решение зоны перехода перо–хвостовик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скибин, В. А.** ЦИАМ 1980-2000. Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Кн. 1. / В. А. Скибин, В. И. Солонин. М. : Машиностроение, 2000. 794 с.
2. **Каблов, Е. Н.** Материалы авиационных двигателей XXI века / Е. Н. Каблов // Авиадвигатели XXI века : сб. тез. докл. II Международн. науч.-техн. конф. Т. 1. Москва, 2005. С. 25–29.
3. **Тучинский, Л. И.** Композиционные материалы, полученные методом пропитки / Л. И. Тучинский. М. : Металлургия, 1988. 206 с.
4. **Васильев, В. В.** Композиционные материалы : справ. / В. В. Васильев, Ю. М. Тарнопольский. М. : Машиностроение, 1990. 510 с.
5. **Портной, К. И.** Структура и свойства композиционных материалов / К. И. Портной, С. Е. Салимбеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров. М. : Машиностроение, 1979. 256 с.
6. **Ивах, А. Ф.** Оработка силовых законцовок высоконагруженных узлов, выполненных из КМ / А. Ф. Ивах, А. А. Рыжов, В. В. Щербинин // Механика и прочность авиационных конструкций : сб. докл. конф. Уфа : УГАТУ, 2001. С. 104–112.
7. **Ивах, А. Ф.** Методы проектирования рабочих лопаток из композиционного материала / А. Ф. Ивах, А. А. Рыжов, Б. К. Галимханов // Машиноведение, конструкционные материалы и технологии : сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа : Гилем, 2002. С. 107–117.
8. **Ивах, А. Ф.** Усталостные испытания лопаток из композиционных материалов / А. Ф. Ивах, А. А. Рыжов, Б. К. Галимханов // Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане : сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа : Гилем, 2003. С. 60–65.
9. **Ивах, А. Ф.** Проектирование рабочих лопаток из композиционного материала / А. Ф. Ивах, А. А. Рыжов, Б. К. Галимханов // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий : сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа : Гилем, 2004. С. 7–18.
10. **Ивах, А. Ф.** Проблемы обработки рабочих лопаток из композиционного материала / А. Ф. Ивах, А. А. Рыжов, Б. К. Галимханов // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий : сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа : Гилем, 2005.
11. **Тимонова, М. А.** Защита от коррозии магниевых сплавов / М. А. Тимонова. М. : Металлургия, 1977. 160 с.
12. **Турченков, В. А.** Материаловедческие и технологические особенности использования металлокомпозитов (углеалюминия и боралюминия) в конструкциях авиационно-космической техники / В. А. Турченков // дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. ФГУП ВИАМ. Москва, 2003. 114 с.

ОБ АВТОРАХ



Ивах Александр Федорович, ген. дир., ген. констр. ФГУП НПП «Мотор». Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1971).



Рыжов Алексей Андреевич, проф. каф. АД, гл. конс. ФГУП НПП «Мотор». Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1959). Д-р техн. наук по двигателям ЛА (УГАТУ, 1997). почетн. член АН РБ (1995), действ. член Академии военных наук (1999).



Галимханов Булат Князевич, доцент каф. АД. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1971). Канд. техн. наук (УАИ, 1983). Иссл. в обл. прочности авиационных конструкций.