

А. А. РЫЖОВ

## ПУТИ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Рассматриваются основные аспекты проблемы разработки и внедрения композиционных материалов в практику создания авиационных ГТД. Проводится анализ работ, выполненных по данной теме в ОАО «ГНПП «Мотор». *Авиационный двигатель; композиционные материалы; лопатка; вентилятор; компрессор; сопло; проектирование; испытания*

Современное состояние развития авиационного двигателестроения в России и за рубежом характеризуется тем, что газодинамические и тепловые нагрузки в двигателях настолько выросли, что они полностью исчерпали возможности традиционно применяемых изотропных материалов.

Если окружные скорости на периферии первых ступеней осевых компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД) периода 50...60-х годов составляли  $U_k = 350...390$  м/с; максимальные температуры за компрессором  $T_k^* = 250...350$  °С; перед турбиной  $T_T^* = 900...950$  °С, то к 80-м годам эти же параметры составляли  $U_k = 580$  м/с,  $T_k^* = 500$  °С и температура газа перед турбиной  $T_T^* = 1500...1650$  °С. В настоящее время уже требуется обеспечивать  $U_k = 700$  м/с и  $T_T^* \geq 2000$  °С. Такие высокие требования не могут быть обеспечены за счет применения традиционно используемых материалов.

Попытка использовать в процессе совершенствования ГТД высокопрочных титановых сплавов типа ВТ-22 не давала положительных результатов по причине повышенной чувствительности этих материалов к трещиностойкости, к концентраторам напряжений, а также ввиду низкого уровня технологичности.

Решением проблемы является разработка и внедрение в конструкциях ГТД композиционных материалов (КМ). Решение данной проблемы усложнено не только недостаточным уровнем научно-технических и экспериментальных исследований, но и издержками перестроечного периода – отсутствием инвестиционной государственной активности, потерями ряда современных производств и возможностей (например, производство борных нитей и керамических порошков осталось в Прибалтике; производство бериллиевых сплавов осталось в Казахстане; утратой интеллектуальных и производственно-технических возможностей предприятий городов Киева, Минска, Риги и др.).

Композиционные волокнистые материалы на металлических матрицах обладают по сравнению с традиционными титановыми сплавами низкой плотностью и высокими удельными механическими характеристиками.

В табл. 1 и 2 приведены механические характеристики при растяжении некоторых армирующих волокон, титанового сплава ВТ-22 и композитов на основе боромагния (коэффициент армирования  $\psi = 0,3$ ) и углемагния (коэффициент армирования  $\psi = 0,5$ ), полученных по технологии вакуумно-компрессионной литейной пропитки.

Таблица 1

Волокно	Плотность, ( $\times 10^{-3}$ ) кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность, км	Удельный модуль упругости, км
Борное (на вольфрамовой проволоке)	2,65	2256	380	86,8	14617
Высокомодульное углеродное	1,95	1750	500	88	25000
Высокопрочное углеродное	1,78	2800	300	157	16800

Таблица 2

Материал	Плотность, ( $\times 10^{-3}$ ) кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность, км	Удельный мо- дуль упругости, км
Титановый сплав ВТ-22	4,6	1400	115	31	2548
Боромагний	2,04	629	141	31,4	7046
Углемагний	1,77	604	143	34,8	8236

Над разработкой и внедрением КМ в узлах ГТД ГНПП «Мотор» работает с начала 60-х годов. Отличительной особенностью работ по КМ в этот период являлось то, что наработки в этой области любого предприятия отрасли страны могли быть использованы любым предприятием. Поэтому то, что делалось в ГНПП «Мотор», является отражением состояния работ по КМ во всей отрасли до 90-х годов.

К 80-м годам потребные окружные скорости в лопаточных узлах вентиляторов ГТД приблизились к 600 м/с и обеспечить требуемые весовые характеристики этих узлов из традиционных материалов, включая титановый сплав ВТ-22, не удается.

Работы по внедрению КМ в ГНПП «Мотор» проводятся по многим узлам ГТД: входной силовой направляющий аппарат и лопатки перепуска воздуха над рабочими лопатками изготавливаются из углеволокнутого композита, лопатки направляющих аппаратов 1-й и 2-й ступеней с подвижными лопатками вентилятора – из боромагниевого композита. При этом освоены как прессовая, так и литейная технологии производства лопаток. Широкохордная рабочая лопатка вентилятора (с расходом воздуха в стендовых условиях 140 кг/с) была изготовлена со специально отработанной конструкцией законцовки по прессовой технологии из материала ВКА-2. На законцовке лопатки выполнено замковое соединение. Законцовки успешно прошли прочностные испытания на специальных двухзамковых образцах в лаборатории [1, 2, 3].

Также в ГНПП «Мотор» выполнен большой объем расчетно-конструкторских, технологических и экспериментальных исследований по отработке силовых колец, предназначенных для усиления дисковых узлов и снижения их веса.

Проведенные исследования позволили выявить многогранность взаимосвязанных этапов отработки конструкции в цепи «материаловед – технолог – расчетчик – конструктор – испытатель». Проблема создания композиционных материалов достаточно сложная и не может

быть решена без решения задач согласования волокон, матрицы и механики композитов.

Отдельный цикл работ, проводимых в ГНПП «Мотор», посвящен конструкторско-технологическим исследованиям узлов горячей части двигателя. Спроектирован и изготовлен совмещенный с камерой сгорания узел соплового аппарата ГТД. Конструктивно узел достаточно сложный: изготовлен из «углерод-углеродного» композита с объемной защитой от окисления. Экспериментальную проверку прошла уникальная панель размером 1200×1300 мм, изготовленная также из «углерод-углеродного» композита, имитирующая створку регулируемого плоского реактивного сопла одного из двигателей.

Опыт предприятия по проектированию широкохордных лопаток вентилятора и лопаток направляющих аппаратов, выполненных из композиционных материалов на основе магния, для перспективного двухконтурного турбореактивного двигателя подтвердил эффективность применения КМ для изготовления подобных высоконагруженных деталей.

При разработке лопаток компрессора на предприятии решались следующие задачи:

- проектирование материала с оптимальной структурой, обеспечивающей требуемые характеристики (структура материала определялась степенью объемного наполнения КМ армирующими волокнами, количеством слоев, последовательностью и углами укладки волокон в слоях [2, 5]);

- изготовление каркаса лопатки из борных волокон;

- разработка технологии вакуумно-компрессионной литейной пропитки армирующего каркаса, обеспечивающей качества деталей-заготовок [3];

- обеспечение коррозионной и эрозионной стойкости материала лопатки.

Решение задачи по оптимизации структуры материала и оценки требуемых механических характеристик связано с анализом напряженно-деформированного состояния лопатки, определяющим ее работоспособность.

В рабочих лопатках компрессоров ГТД наиболее сложной в плане конструирования и обеспечения требуемой прочности является зона перехода пера лопатки в хвостовик. Проблема заключается в создании структуры композита (укладки волокон, расположении слоев), обеспечивающей работоспособность в условиях нагружения перерезывающими и сжимающими усилиями, вызываемыми центробежными силами профильной части и хвостовика лопатки [1, 4]. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выбрать необходимую структуру, обеспечивающую работоспособность не только переходной части, но и лопатки в целом.

Весьма важной является проблема обеспечения коррозионной и эрозионной стойкости элементов двигателя при работе в широком диапазоне климатических условий. Как правило, на рабочие лопатки наносятся покрытия, обеспечивающие коррозионную и эрозионную стойкость. Покрытия изолируют материал лопатки от коррозионной среды и должны обеспечивать износостойкость, иметь высокую адгезию к поверхности лопатки. В ГНПП «Мотор» эта проблема решена проектированием лопатки с оболочкой из фольги, выполненной из титанового сплава.

Таким образом создан научный и практический задел по разработке широкохордного вентилятора из КМ с титановой оболочкой для перспективных ГТД [5].

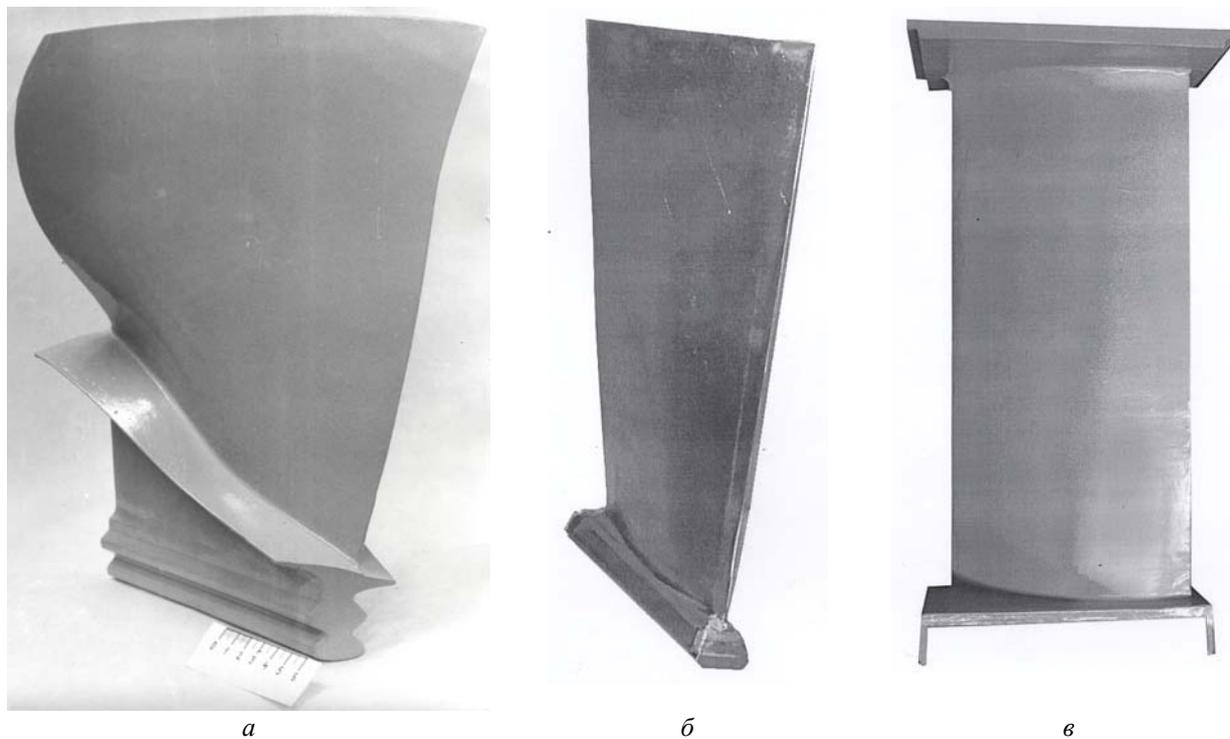
На рисунке приведены широкохордная и вентиляторная лопатки, выполненные из боромагния, и направляющая лопатка компрессора низкого давления, выполненная из углемагния.

В заключение необходимо отметить следующее.

1. В процессе проведения исследования по проблеме внедрения композиционных материалов, на предприятии были решены сложные задачи, возникающие при применении композитов в узлах ГТД, а также сформировались кадры, способные решать данные задачи.

2. Машиностроение в области использования изотропных материалов располагает множеством типовых документов в виде учебников (по сопротивлению материалов, деталям машин, основам конструирования типовых узлов), а также руководящими техническими материалами и инструкциями отраслевых институтов ЦИАМ, ВИАМ, НИАТ и др.

3. В области создания узлов авиационных двигателей из композитов ничего или почти ничего подобного нет. Поэтому актуальной проблемой является создание руководящих материалов по основам проектирования и создания деталей из КМ.



Лопатки компрессора из композитных материалов:  
*a* – широкохордная лопатка; *б* – лопатка вентилятора; *в* – лопатка направляющего аппарата компрессора низкого давления

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Щербинин В. В.** Отработка силовых законцовок высоконагруженных узлов, выполненных из КМ // Механика и прочность авиационных конструкций: сб. Уфа: УГАТУ, 2001. С. 104–112.
2. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Методы проектирования рабочих лопаток из композиционного материала // Машиноведение, конструкционные материалы и технологии: сб. АН РБ, отд. техн. наук. Уфа: Изд-во «Гилем», 2002. С. 107–117.
3. **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.
4. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б. К.** Проблемы отработки рабочих лопаток из композиционного материала // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: сб. науч. тр. / АН РБ, отд. техн. наук. Уфа: изд-во «Гилем», 2005.
5. **Ивах А. Ф., Рыжов А. А., Галимханов Б.К.** Основы проектирования и создания рабочих лопаток из композиционного материала // Вестник УГАТУ. Т.11, № 2 (29). Уфа: УГАТУ, 2008. С. 48–54.

## ОБ АВТОРАХ

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