

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТОК ГТД ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2011 А. А. Рыжов, Б. К. Галимханов, Н. А. Рыжов, Р. К. Латыпов, С. Р. Иргалин

Открытое акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Мотор”, г. Уфа

Разработаны конструкции и отработаны технологии изготовления рабочих и статорных лопаток ГТД из композиционных материалов на металлической основе. Предлагаются варианты исполнения рабочей лопатки из В-Mg с титановой оболочкой и направляющей лопатки из С-Mg, покрытой эмалью. Проведены необходимые экспериментальные проверки, показана работоспособность разработанных деталей.

Композиты, структура, волокна, матрица, двигатель, лопатка, бор, углерод, магний.

Повышение ресурса и надежности перспективного авиационного газотурбинного двигателя нового поколения, сокращение числа ступеней компрессора, уменьшение массы двигателя в целом при тенденции повышения нагрузок на ступени турбомашин требует использования новых конструктивно-технологических решений.

Традиционные материалы уже не могут обеспечить комплекса требуемых физико-механических характеристик – высокую жесткость, прочность и усталостное сопротивление при заданной массе [1].

Один из возможных вариантов решения – использование композиционных материалов, в т.ч. и металлических КМ волокнистой структуры.

Перспектива использования МКМ заключается в следующем:

- титановые сплавы могут не обеспечить работоспособность рабочих лопаток при повышенных значениях окружных скоростей;

- доля механической обработки в технологии изготовления деталей минимальна;

- обладают малой чувствительностью к концентраторам напряжений (забоины, риски, ...);

- высокие демпфирующие характеристики.

В отличие от традиционных сплавов композитные материалы состоят, по крайней мере, из двух определенных материалов, не теряющих свои характеристики в композиции.

Наибольшие возможности применения КМ на основе легких сплавов – детали относительно холодного узла-компрессора. Это рабочие и направляющие лопатки компрес-

сора низкого давления, корпусные и другие статорные детали.

Предельные значения физико-механических свойств композиционных материалов определяются главным образом свойствами армирующего материала.

Волокна некоторых материалов обладают уникально высокими значениями прочности и жесткости. Так, борные волокна обладают очень высокой прочностью и жесткостью.

Также перспективными для практического применения являются углеродные волокна. В сочетании с легкими металлическими сплавами на основе магния или алюминия они позволяют получить легкие прочные жесткие композиционные материалы.

Исследования основываются на богатом опыте конструирования и доводки лопаток направляющего аппарата (НА) компрессора из МКМ [5]. Лопатки НА из боралюминия, а в дальнейшем из бормагния, были отработаны по прочностным статическим и усталостным характеристикам и прошли первые испытания в составе двигателя на летающей лаборатории.

При конструировании материала для деталей узлов ГТД необходимо исходить из нескольких факторов:

- нагруженность – газовыми и инерционными силами, динамическими нагрузками;

- температурное состояние;

- агрессивность среды;

- технология изготовления.

Для рабочих лопаток (РЛ) компрессора наиболее приемлемым является МКМ волокнистой структуры –бормагний (В-Mg) и углемагний С-Mg, позволяющие при исполь-

зовании соответствующей технологии литья получить детали сложной конфигурации (с отработкой защиты от воздействия внешней среды, в т.ч. и твердых частиц).

Свойства КМ в основном зависят от характеристик волокон, их расположения и объемного содержания. Учитывая накопленный опыт проектирования, за основу были приняты характеристики КМ с однонаправленными волокнами. Основные характеристики КМ определяются по формулам [3], полученным из условия аддитивности и предположения, что матрица более пластична, обеспечивается совместная деформация волокон и матрицы до разрушения (силы их сцепления достаточны).

Решение задачи по оптимизации структуры связано с анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) детали.

Для расчетного режима определяются максимально действующие напряжения, по значениям которых с учетом норм прочности оцениваются требуемые значения пределов прочности, необходимые для обеспечения работоспособности лопаток: σ_B , σ_{CM} , τ_c .

Для рабочих лопаток (РЛ) компрессора наиболее приемлемыми являются КМ на основе легких алюминиевых или магниевых сплавов с отработкой защиты от воздействия твердых частиц - может быть принят МКМ волокнистой структуры - материал бормагний (В-Mg), материал С-Mg, позволяющие при использовании соответствующей технологии литья получить детали сложной конфигурации [2,7]. КИМ в этих случаях будет иметь высокие значения, доработка деталей после операции литья будет минимальной.

Существенную роль в выборе КМ играет опыт практического применения составляющих МКМ. Исходя из этого, по приоритетам рассматриваются композиции В-Mg, С-Mg, SiC-Al.

По значениям требуемых напряжений определяется величина объемного наполнения КМ волокнами. Для композиции В-Mg, принятой в первом приближении для отработки облика лопатки из КМ, необходимо создание материала с объемным наполнением не менее $v = 0,3$ [3].

Подход к решению поставленной задачи отрабатывался на модельной лопатке. Модельная лопатка имела постоянный по

высоте профиль и хвостовик типа “ласточкин” хвост (рис. 1, лопатка до механической обработки).



Рис. 1. Модельная лопатка

На модельной лопатке были уточнены требования к конструкции пресс-формы и отработаны основные технологические операции:

- лазерная резка монослоев борных волокон;
- формирование пакета монослоев;
- литьё магниевого наполнителя в пресс-форму в вакууме.

В ходе работ были проведены металлографические исследования, разработаны критерии бракования при выполнении неразрушающего контроля изделий. Статические испытания подтвердили высокие механические свойства композиционного материала. Напряжение разрыва σ_r достигало значения 825 МПа.

Полученные удовлетворительные результаты на модельной лопатке дали основание для начала работ по созданию полноценной лопатки из КМ - лопатки 1 ступени КНД разрабатываемого двигателя. Рабочая лопатка обладает слабо закрученным профи-

лем, большим удлинением, хвостовик - типа «ласточкин хвост». Результатом комплекса конструкторских работ явился выпуск чертежей лопатки и соответствующих технических условий (ТУ) на изготовление.

При отработке облика лопатки необходимо было обратить пристальное внимание на эксплуатационные свойства, в частности на коррозионную стойкость материала лопатки.

В качестве матрицы в МКМ рассматривались литейные высокопрочные сплавы МЛ5, МЛ8 и жаропрочный сплав МЛ10.

Коррозионная стойкость магния и его сплавов зависит от легирующих элементов металлических примесей и наличия неметаллических покрытий [6]. Влияние их различно и неоднозначно. Повышение коррозионной стойкости, помимо использования легирующих элементов, происходит и при соответствующей термической обработке, причем сплавы должны разрабатываться на основе магния высокой чистоты.

Магниевого сплавы имеют более высокую скорость коррозии по сравнению с другими, например алюминиевыми сплавами, особенно в атмосфере повышенной влажности. Основной способ защиты магниевых сплавов от коррозии, обеспечивающий надёжную эксплуатацию их во всех климатических атмосферных условиях - нанесение покрытий.

Основные требования, которым должны удовлетворять покрытия для создания надёжного защитного слоя:

- покрытие должно являться сплошным;
- являться прочным, износостойчивым и иметь высокую адгезию к сплаву.

Проведен анализ следующих видов покрытий:

1) неметаллические, неорганические покрытия. Формируются при обработке в растворах и состоят из труднорастворимых соединений типа окислов, хроматов, фторидов, фосфатов и т.д. Методы получения подобных покрытий – химические, электрохимические;

2) покрытия из порошковых металлов. Наносятся методом вихревого плазменного напыления. Могут надёжно защищать при

отсутствии повреждений, высокие требования к подготовке поверхности;

3) металлические покрытия – применяются для обеспечения высокой износостойкости и защиты магниевых сплавов от коррозионного повреждения.

Наиболее действенным способом защиты лопаток из КМ является использование оболочки из фольги титанового сплава, покрывающей лопатку из КМ.

Для защиты магниевый наполнителя от воздействия коррозионно-активных сред и эрозионного износа разработан кожух из титанового листа толщиной 0,2 мм. Предварительно отформованный кожух и пакет борных волокон помещается в пресс-форму и в вакууме заливается магниевым наполнителем (рис. 2).



Рис.2. Рабочие лопатки

Адгезия титанового кожуха (рис. 3) к материалу наполнителя обеспечивает надёжную защиту магния от воздействия окружающей среды.

При испытаниях на отрыв титана от магния разрушение происходило по титановому листу. При разгонных и усталостных испытаниях отслоения титанового кожуха от наполнителя также не отмечалось.

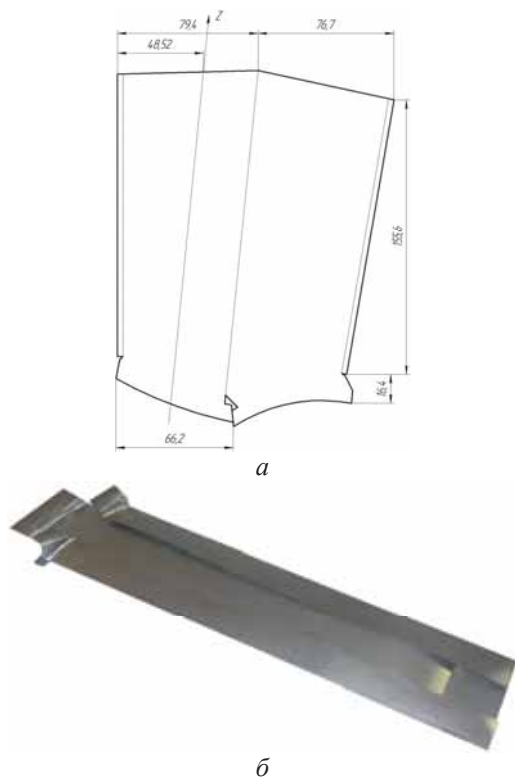


Рис. 3. Чертёж кожуха лопатки (а) и отштампованный кожух из титанового листа (б)

Проведены испытания по определению статической и динамической прочности конструкции. Степень армирования и выносы профиля рабочей лопатки из композиционного материала бор-магний подбирались с обеспечением пятикратного запаса прочности в корневом сечении. Такому результату предшествовала работа по подбору оптимального процента наполнения и ориентации волокон в монослоях пакета. Пример укладки монослоёв в пакет приведён на рис. 4. Корректировка степени наполнения до 32 % борного волокна и изменение положения центров тяжести сечений позволили избежать разрушения лопатки при разгонных испытаниях. Лопатки прошли усталостные испытания на базе $N=2 \cdot 10^7$ при $\sigma_v=200$ МПа, в том числе с нанесёнными забоинами.

Работоспособность хвостовика разработанной лопатки из бор-магния также обеспечивается в соответствии с действующими нормами прочности.

В связи с отсутствием российского поставщика борных волокон была спроектирована и испытана лопатка с углеродными волокнами в качестве армирующего элемента.

Таким образом, при производстве лопатки были отработаны:

- направление укладки и оптимальный процент наполнения слоёв;

- формование и сварка защитного кожуха из титанового листа;
- проливка пакета борных и угольных волокон магнием;
- методические подходы к проектированию и испытаниям изделий из КМ;
- принципы неразрушающего контроля готовых лопаток.

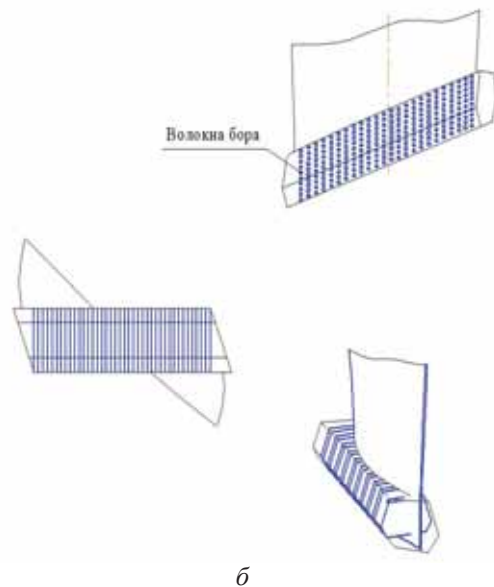
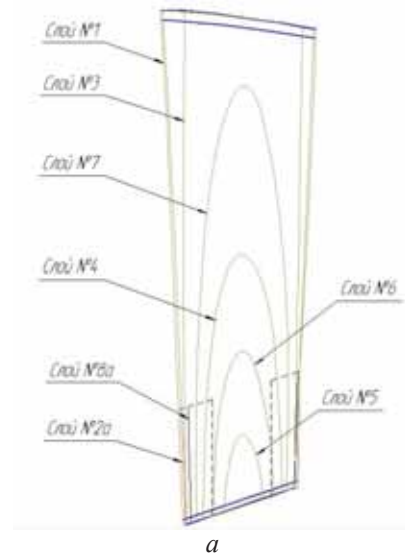


Рис. 4. Порядок укладки монослоёв в пакете (а) и формирование хвостовика (б)

Оценка НДС лопатки компрессора

Исходные данные

При расчете лопаток компрессора на прочность учитывают центробежные и газовые силы, что является стандартной процедурой при проектировании ГТД. Основное отличие при расчете лопаток из композиционных материалов от изотропных является учет ее внутренней структуры: количество слоев; ориентация волокон, процентное содержание волокон, геометрия монослоев.

Геометрическая модель лопатки представляет из себя двенадцать “монослоев”, уложенные каждый под определенным углом. Схема расположения слоев представлена на рис. 4. Монослой - слой композиционного материала, в котором все волокна уложены в одном направлении. Углы укладки слоев в лопатке приведены в табл. 1. Нумерация слоев следует от спинки к корыту.

Таблица 1. Углы укладки слоев в лопатке

Номер слоя	Угол укладки
1	0
2	-30
3	0
4	+30
5	0
6	0
7	0
8	0
9	-30
10	0
11	+30
12	0

Расчет НДС лопатки выполнен в САЕ - пакете Ansys. Математическая модель лопатки представляет собой двенадцать “склеенных” объемов, каждый из которых представляет собой отдельный монослой. Каждый объем (монослой) лопатки разбит 20-узловыми элементами Solid95 с ориентацией системы координат элементов в соответствии с углом укладки слоя. Конеч-но-элементная модель лопатки состоит из 309 тысяч элементов.

Используется трансверсально-изотропная модель материала. Расчеты выполнены с учетом геометрической нелинейности.

На рис. 5 представлены результаты расчета НДС пера композиционной лопатки.

Результаты расчета удовлетворяют условиям прочности. Учет оболочки из титанового сплава не вызывает технических проблем и будет включен в расчетную модель в последующем при уточнении математической модели лопатки.

Динамические характеристики детали также оценивались МКЭ [4]. Собственные частоты колебаний оказались зависимыми (в значительной степени) от используемой модели материала. В табл. 2 приведены их значения для пяти первых форм колебаний для разных моделей материала.

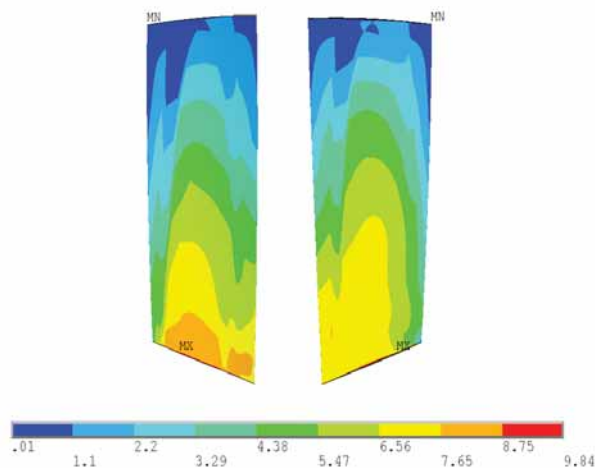


Рис. 5. Эквивалентные напряжения (по Мизесу), кгс/мм²

Таблица 2. Собственные частоты колебаний

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 - при испытании на усталостную прочность значения собственной частоты колебаний стабильно держалась на уровне 100 Гц. Экспериментальное значение практически совпало с расчетным (f₁^т = 102 Гц).

Библиографический список

1. Каблов, Е.Н. Материалы авиационных двигателей XXI века [Текст] / Е.Н. Каблов // II Международная науч.-техн. конф. Авиадвигатели XXI века: сб. тез. докл.- М., 2005. Т.1. - С.25-29.
2. Тучинский, Л.И. Композиционные материалы, полученные методом пропитки [Текст] / Л.И. Тучинский - М.: Металлургия, 1988. - 206с.
3. Композиционные материалы: справочник/ под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Гарнопольского - М.: Машиностроение, 1990. - 510с.
4. Ивах, А.Ф. Усталостные испытания лопаток из композиционных материалов. Инновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане [Текст] / А.Ф. Ивах, А.А. Рыжов, Б.К. Галимханов // Сб.

науч. трудов, АН РБ, отд. техн. наук. -Уфа: Гилем, 2003. - С.60- 65.

5. Ивах, А.Ф. Проектирование рабочих лопаток из композиционного материала [Текст] / А.Ф. Ивах, А.А. Рыжов, Б.К. Галимханов // Проблемы машиноведения, конструкционных материалов и технологий: Сб. науч. трудов, АН РБ, отд. техн. наук - Уфа: Гилем, 2004. - С.7-18.

6. Тимонова, М.А. Защита от коррозии магниевых сплавов [Текст] / М.А. Тимонова - М.: Металлургия, 1977. - 160с.

7. Турченков, В.А. Материаловедческие и технологические особенности использования металлокомпозитов (углеалюминия и боралюминия) в конструкциях авиационно- космической техники: дисс. ... канд. техн. наук/ В.А. Турченков.- М.: ФГУП "ВИАМ" 2003. - 114с.

THE PROJECTING OF GAS TURBINE ENGINE COMPOSITE BLADES

© 2011 A. A. Ryzhov, B. K. Galimkhanov, N. A. Ryzhov, R. K. Latypov, S. R. Irgalin

Joint-stock company "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa

The constructions have been developed and the manufacturing technologies of gas turbine engine rotor and stator composite metal base blades are worked out. There are suggested the performance versions of rotor blade from B-Mg with titanium enclosure and guide blade from C-Mg coated by enamel. The necessary experimental checks have been performed; it is shown the serviceability of the developed parts.

Composites, structure, fiber, matrix, engine, rotor blade, guide blade, boron, carbon, magnesium.

Информация об авторах

Рыжов Алексей Андреевич, доктор технических наук, профессор, главный консультант ОАО "Научно-производственное предприятие "Мотор", г. Уфа. E-mail: ufamotor@mail.ru. Область научных интересов: проектирование ГТД.

Галимханов Булат Князевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-конструктор ОАО "Научно-производственное предприятие "Мотор", г. Уфа. E-mail: ufamotor@mail.ru. Область научных интересов: прочность элементов конструкции ГТД.

Рыжов Николай Андреевич, начальник бригады конструкции компрессоров ГТД ОАО "Научно-производственное предприятие "Мотор", г. Уфа. E-mail: ufamotor@mail.ru. Область научных интересов: проектирование компрессоров ГТД.

Латыпов Рустам Климович, заместитель начальника бригады прочности ОАО "Научно-производственное предприятие "Мотор", г. Уфа. E-mail: ufamotor@mail.ru. Область научных интересов: прочность элементов конструкции ГТД.

Иргалин Самат Римович, инженер-технолог ОАО "Научно-производственное предприятие "Мотор", г. Уфа. E-mail: ufamotor@mail.ru. Область научных интересов: композиционные материалы на металлической матрице.

Ryzhov Alexey Andreyevich, Doctor of Engineering Science, professor, chief consultant of JSC "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa. E-mail: ufamotor@mail.ru. Area of research: the projecting of gas turbine engines.

Galimkhanov Boulat Knyazevich, candidate of technical science, leading structural engineer of JSC "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa. E-mail: ufamotor@mail.ru. Area of research: the strength of GTE structural elements.

Ryzhov Nickolay Andreyevich, the head of GTE compressor construction team of JSC "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa. E-mail: ufamotor@mail.ru. Area of research: the projecting of GTE compressors.

Latypov Roustam Klimovich, deputy head of strength team, the strength of GTE structural elements of JSC "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa. E-mail: ufamotor@mail.ru. Area of research: the strength of GTE structural elements.

Irgalin Samat Rimovich, technological engineer of JSC "Scientific-and-production enterprise "Motor", Ufa. E-mail: ufamotor@mail.ru. Area of research: the metal matrix composite materials.