

УДК 621.452

А.А. МИХАЛКИН

ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРДД

*В статье обосновывается необходимость снижения веса широкохордных рабочих лопаток вентилятора перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей. Сделан обзор достижений мировых двигателестроительных фирм по вопросу снижения веса широкохордных рабочих лопаток вентилятора. Приведен опыт создания широкохордной рабочей лопатки вентилятора из композиционных материалов для ТРДД ГП «Ивченко-Прогресс». Разработана новая конструкция гибридной рабочей лопатки вентилятора. Показаны преимущества разработанной конструкции гибридной рабочей лопатки вентилятора. Определены ее демпфирующие и прочностные характеристики.*

**Ключевые слова:** лопатка вентилятора, полая лопатка вентилятора, рабочая лопатка вентилятора из композиционного материала, гибридная рабочая лопатка вентилятора

## Введение

К вентиляторам современных ТРДД предъявляют высокие требования по уровню аэродинамических характеристик в широком диапазоне условий эксплуатации, по общей массе, допустимому уровню шума. Вентилятор существенно влияет на общую тягу и топливную эффективность силовой установки.

Создание современных конкурентоспособных турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД) с высокой тягой невозможно без совершенствования конструкции лопатки вентилятора. Так, например, наличие в достаточно удлиненных лопатках вентилятора традиционных антивибрационных полок (АВП) приводит к ухудшению его аэродинамических характеристик и увеличению расхода топлива. Отказ от применения антивибрационных полок позволяет существенно повысить эффективность вентилятора и снизить удельный расход топлива. Для обеспечения условий прочности и устойчивости бесполочные лопатки вентилятора выполняют широкохордными. Масса таких широкохордных лопаток существенно (в 1,5-2 раза) выше массы лопатки с АВП. И хотя широкохордных лопаток в колесе вентилятора меньше, чем лопаток с полкой масса колеса вентилятора увеличивается. Соответственно, растет уровень контактных напряжений на рабочих поверхностях хвостовика лопатки и диска вентилятора. Для лопаток небольшого удлинения эта проблема решается путем увеличения площади контактной поверхности (круговой замок). Для лопаток с большим удлинением (диаметр колеса более 2 м) альтернативы снижению веса лопатки вентилятора нет.

## 1. Обзор зарубежного опыта

Мировые авиадвигателестроительные фирмы по разному решают проблему веса широкохордным рабочим лопаткам вентилятора.

Rolls-Royce пошла по пути полых металлических лопаток. Этой фирмой в настоящее время внедрено уже второе поколение полых титановых лопаток вентиляторов (рис. 1).

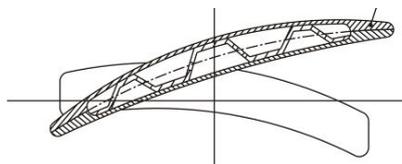


Рис. 1. Конструкция полых лопатки вентилятора фирмы «Роллс-Ройс»

Современная технология создания полых титановых лопаток вентиляторов базируется на совмещении двух технологических операций — диффузионной сварки и сверхпластического формования [1]. Изготовление полых титановых лопаток является многоэтапным процессом, включающим подготовку титановых заготовок как для самой лопатки, так и для тонкостенного заполнителя. Оно реализуется на последующем применении сложного, дорогостоящего технологического оборудования.

Применение этой технологии позволяет снизить массу лопатки вентилятора на 25-35%. Однако, на сегодняшний день возможности данной технологии по снижению веса рабочих лопаток вентилятора исчерпаны и фирма Rolls-Royce работает над созданием цельнокомпазитной лопатки вентилятора. По заявлению её представителей, уже во втором квар-

тале 2013 г. планируется начать испытания углепластиковых лопаток в составе двигателя Trent 1000 [2].

Фирма General Electric на протяжении почти 30 лет по таким государственным программам, как QCSEE, E3 и др. вела работы по созданию лопаток вентиляторов ТРДД из углепластиков. Эти работы увенчались успехом, и в 1995 г. фирмой был создан двигатель GE90 с лопатками вентилятора из углепластика. Это первая в мире и пока единственная рабочая лопатка вентилятора из углепластика серийного ТРДД, успешно эксплуатируемого на различных типах самолетов гражданской авиации. Создав беспрецедентно легкую конструкцию лопатки вентилятора, фирма решила многие вопросы, связанные с массой двигателя. Известно, что эффективность снижения массы вращающейся детали намного превышает эффективность снижения веса статорных деталей, поэтому легкая композитная лопатка позволила использовать трехступенчатую конструкцию диска небольшой массы. Это позволило снизить массу вала и опор.

Аналогичная конструкция лопатки применена фирмой General Electric и для нового семейства двигателей GENx (рис. 2).



Рис. 2. Рабочая лопатка вентилятора двигателя GE-90

Демонстрация фирмой General Electric возможности применения углепластика в ответственной детали ТРДД, а также появление двигателей с повышенными степенями двухконтурности и лопаток с широкой хордой способствовали тому, что ведущие двигателестроительные фирмы мира стали работать в направлении создания лопаток вентилятора из углепластика.

Фирма SNECMA совместно с General Electric в настоящее время активно ведет разработки по созданию вентилятора ТРДД LEAP-X с лопатками из углепластика [3]. Лопатка образовывается трехмерным ткачеством с последующей пропиткой связующим при помощи RTM технологии (рис. 3). Ткачеством углеродные волокна переплетаются таким образом, что их текстура может быть адаптирована

к напряжениям в различных частях лопатки: на периферии, в середине или у хвостовика – то есть обеспечивается непрерывность волокна по всей лопатке, что создает композит со структурой, близкой структуре сплошного материала.



Рис. 3. Широкоходная лопатка вентилятора двигателя Leap-X

Фирма Pratt-Whitney еще в семидесятые годы спроектировала и изготовила лопатки вентилятора с применением боралюминия для ТРДД JT-8D. Каждая лопатка была на 40% легче, чем аналогичная лопатка из титанового сплава. Лопатки были испытаны в составе двигателя. Однако, реального применения такие лопатки не получили. Для своего двигателя PW4084 фирма разработала вентилятор диаметром 2840 мм с 22 пустотельными бесполочными рабочими лопатками из титанового сплава. Фирма посчитала свое техническое решение менее рискованным по сравнению с использованием лопаток вентилятора из композиционных материалов, опыта эксплуатации которых она ранее не имела. В конструкции лопатки соединение двух половин лопатки осуществляется по центральной малонагруженной перемычке, в отличие от лопаток двигателя «Трент», у которых шов расположен в оболочке пера, где возможна более высокая концентрация напряжений (рис. 4).

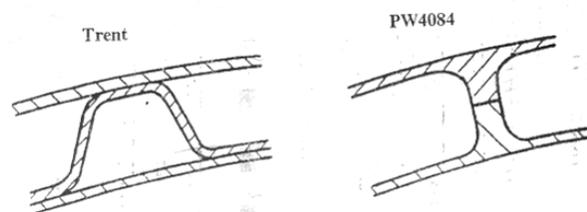


Рис. 4. Схемы соединения двух половинок лопаток вентилятора фирм «Rolls-Royce» и «Pratt-Whitney»

ВИАМ, ЦИАМ совместно с предприятиями Авиапрома продолжают работы по созданию широкохордной полый лопатки вентилятора. Перспективная лопатка представляет собой штампованную тон-

костенную титановую оболочку, внутри которой размещены несущие стержни из высокомодульных и прочных материалов на металлической матрице (бор алюминия, углеалюминия или титана, армированного волокнами карбида кремния) (рис. 5). Новизна данной конструкции заключается в том, что представляется возможность отстройки лопатки от возбуждающих частот путем изменения геометрических параметров, жесткости и мест расположения несущих элементов, не нарушая при этом газодинамический профиль лопатки [4]. Каждый несущий стержень лопатки имеет свою собственную частоту колебаний, не совпадающую с частотой других стержней (рис. 4). При возбуждении по какой-либо собственной форме колебаний одного из них другие стержни имеют другое колебательное движение, вызывая попеременный изгиб обшивки и одновременно являясь демпфером для стержня, колеблющегося по собственной форме. Выбор места, где располагаются несущие стержни, их количество и значения характеристик жесткости материала позволяют управлять уровнем перемещений периферийной части лопатки и, следовательно, рабочими зазорами «корпус – колесо».

Также согласно государственной программе на протяжении более 10-ти лет во ФГУП ЦИАМ сотрудниками отдела композитных материалов ведутся работы в обеспечение создания лопатки вентилятора из углепластика. Лопатка получается путем послойной укладки слоев композиционного материала в пресс-форме с последующей пропиткой связующим при помощи RTM-технологии.

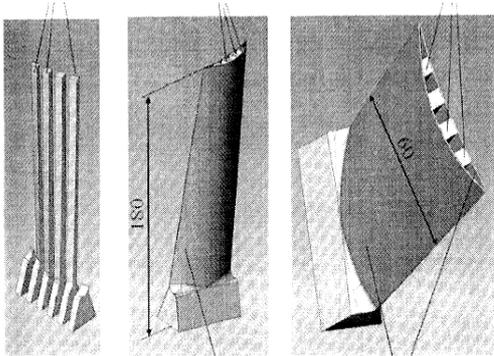


Рис. 5. Широкохордная полая лопатка с несущими элементами из боралюминия

## 2. Создание рабочих лопаток вентилятора из КМ на ГП«Ивченко-Прогресс»

Еще в семидесятые годы при создании ТРДД Д-36 были проведены работы по созданию широкохордной рабочей лопатки вентилятора из КМ. В результате была разработана конструкция и технология производства изготовления цельнокомпозитной

широкохордной рабочей лопатки вентилятора. Жесткость при изгибе и кручении разработанной лопатки из углепластика сравнима с жесткостью аналогичной лопатки из титанового сплава. Стендовые испытания лопаток в системе двигателя не производились.

Лопатки вентиляторов полностью из КМ позволяют добиться заметного снижения массы при сохранении приемлемых характеристик. Однако такие лопатки сильно повреждаются при ударах посторонними предметами, например птицами. Кроме того, процесс изготовления лопаток из КМ является многоэтапным, сложным, и их производство является дорогим.

В настоящее время на ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» разработана конструкция гибридной рабочей лопатки вентилятора.

Разработанная схема изготовления лопаток гибридной конструкции заключается в следующем: в готовой металлической лопатке создаются выборки по профилю пера и «карманы» в определенных областях пера, которые заполняются более легким углепластиком. В результате готовая гибридная лопатка на 30 % легче, чем исходная.

В таком случае при попадании посторонних предметов, они встречаются не с композиционным материалом, повреждая его и всю лопатку в целом, а с металлической входной кромкой, которая может быть отремонтирована стандартными для цельнометаллических лопаток методами при ограничении повреждений. Таким образом, такая конструкция лопатки обеспечивает большую живучесть с ограничением ремонтпригодности.

Данное техническое решение отображено в патентах США, Европы и России [5-6]. Однако, во всех этих решениях композиционный материал не несет механическую нагрузку и предназначается только для облегчения конструкции, а также для демпфирования колебаний, возникающих при попадании постороннего предмета в лопатку и колебаний, возникающих в процессе работы двигателя.

В разработанной конструкции композиционный материал воспринимает нагрузки наравне с титановой основой. Благодаря чему прочностные характеристики такой лопатки вентилятора близки к показателям цельнометаллического аналога.

Для оценки качества получившейся конструкции были определены формы собственных колебаний и характеристика усталостной прочности.

Для сравнения демпфирующих свойств гибридной и цельнометаллической лопаток были определены декременты затухания лопаток для первой изгибной формы колебаний. Испытания показали, что гашение энергии колебаний в гибридной лопатке происходит в три раза быстрее, чем в цельнометаллической.

## Заклучение

Как видно из вышесказанного все двигателестроительные фирмы мира заняты поисками оптимальной конструкции лопатки вентилятора для перспективных ТРДД. Совершенство вентилятора - залог экономичной и надежной работы двигателя.

На ГП «Ивченко-Прогресс» разработана конструкция гибридной рабочей лопатки вентилятора, позволяющая добиться снижения веса на уровне 30% по сравнению с цельнометаллической лопаткой. Проведенный объем расчётных и экспериментальных исследований, технологических и квалификационных изысканий подтверждает перспективность проводимых работ и эффективность принимаемых решений. Представляется, что лопатки гибридной конструкции займут свою нишу в существующих и разрабатываемых семействах облегченных лопаток для ТРДД с большой степенью двухконтурности.

## Литература

1. Pat. 5243758 US, МПК В23Р 15/00. Design and processing method for manufacturing hollow airfoils (three-piece concept). [Text] / Jung-Ho Cheng,

Jeffrey LeMonds, Gary T. Martini, Ralph E. Patsfall, Gene E. Wiggs; assignee General Electric Company. – № US 07/803,852, filed Dec. 9, 1991, date of patent Sep. 14, 1993.

2. Gubisch, M. Coming Full Circle [Text] / M. Gubisch // Flight International. – 27 Sep. - 3 Oct. 2011. -P. 34-35

3. Rochester, M. M. Patterned breakthrough. [Text] / M. M. Rochester // Aviation week & space technology. – July 9, 2012. - P. 1-4.

4. Каримбаев, Т.Д. Создание облегченных рабочих лопаток вентилятора для ТРДД с большой степенью двухконтурности. [Текст] / Т.Д. Каримбаев, А.А. Луннов // Техника воздушного флота. – 2005. – № 3-4. - С. 28-31.

5. Pat. 5634771 US, МПК F01D 5/14. Partially-metallic blade for a gas turbine [Text] / William E. Bachrach, Walter D. Howard, Theodore R. Ingling; assignee General Electric Company. – № US 08/533,478, filed Sep. 25, 1995, date of patent Jun. 3, 1997.

6. Пат. 2269034 Российская Федерация, МПК F04D 29/38 (2006.01). Лопатка вентилятора газотурбинного двигателя (варианты) [Текст] / Стивенсон Джозеф Тимоти (US), Лин Венди Вен-Линг (US), заявитель и правообладатель Дженерал Электрик Компани – №2001112427/06, заявл. 04.05.2001, опубли. 27.01.2006, Бюл. № 03. – 14 с.

Поступила в редакцию 26.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. кафедры Ю.А Гусев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## РОБОЧІЛОПАТКІ ВЕНТИЛЯТОРА ПЕРСПЕКТИВНИХ ТРДД

*А.О. Михалкин*

У статті наведено необхідність зниження ваги широкохордних лопаток вентилятора перспективних ТРДД. Зроблено огляд здобутків світових двигунобудівних фірм у питанні зменшення ваги широкохордної робочої лопатки вентилятора. Наведений досвід створення широкохордної лопатки вентилятора з композиційних матеріалів ДП «Івченко-Прогрес». Розроблена нова конструкція гібридної робочої лопатки вентилятора. Наведені переваги розробленої конструкції гібридної лопатки вентилятора. Визначені її демпфуючі і прочностні характеристики.

**Ключові слова:** широкоходна робоча лопатка вентилятора, пола лопатка вентилятора, лопатка вентилятора з композиційного матеріалу, гібридна лопатка вентилятора.

## THE FAN BLADES OF PERSPECTIVE TURBOJETS

*A.A. Mihalkin*

In the article necessity of weight reduction rotor blades of the fan perspective turbojet engines. The review of achievements world engine-building firms concerning weight reduction fan rotor blades is made. The experience of building a rotor blade of the fan from composite for turbojet SE "Ivchenko-Progress" is resulted. The new construction of a hybrid rotor blade of the fan is developed. Advantages of the developed construction of a hybrid rotor blade of the fan are shown. Are determined its damping and strength properties.

**Key words:** fan blade, composite fan blade, hollow fan blade, hybrid fan blade.

**Михалкин Андрей Александрович** – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: amihalkin@mail.ru.