

УДК 621.452.22

Ю.А. Гусев, Ф.Ф. Сиренко, Н. Бабиито, В.В. Бойко

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШИРОКОХОРДНОЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД

В работе рассматриваются положительные особенности применения широкохордных вентиляторных лопаток ТРДД и существующие варианты их конструкций. Представлена оболочковая конструкция с полимерным наполнителем. Приведен расчет на статическую прочность лопатки вышеприведенного конструктивного решения. Выполнен анализ процесса колебания лопатки с целью построения ее частотной диаграммы. Проведена оценка стойкости предлагаемой лопатки к автоколебаниям, с использованием приведенных частот (чисел Струхала). Предлагаемая широкохордная оболочковая лопатка с полимерным наполнителем может быть использована в конструкциях вентиляторных ступеней.

Турбореактивный двухконтурный двигатель, напряжение, прочность, автоколебание, широкохордная лопатка, вентилятор метод конечных элементов

Введение

В ТРДД ключевую роль играет вентилятор, поскольку он создает около 75% взлетной тяги силовой установки и от него в значительной степени зависит экономичность двигателя. Лопатка вентилятора работает в условиях действия значительных газодинамических и центробежных нагрузок.

Обычно лопатки вентиляторов изготавливаются и выполняются с большим удлинением пера и полками, расположенными примерно около середины высоты лопатки. Полки приводят к снижению КПД вентилятора, расхода воздуха и ограничивают возможность полной реализации его аэродинамических характеристик рис. 1.

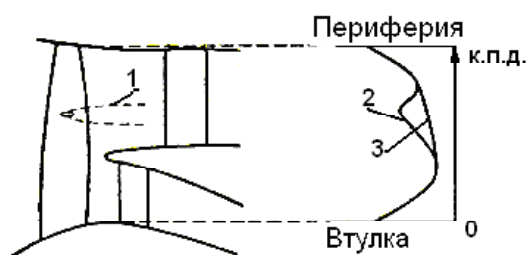


Рис. 1. Источники потерь в вентиляторе - лопатки с бандажными полками:

1 - след от антивибрационной полки, вызывающий дополнительные потери и загромождение канала; 2 - уменьшение КПД в области полки, которое отсутствует в вентиляторе с широкохордными лопатками; 3 - типичное распределение по радиусу КПД ступени вентилятора без бандажных полок

Ликвидация полок исключает появление всех описанных источников потерь и повышает эффективность вентилятора.

Широкохордные безполочные лопатки не имеют указанных выше недостатки, и поэтому процесс их создания является актуальной задачей.

Широкохордные, бесполочные лопатки вентилятора получили применение в конструкциях ТРДД таких фирм как, Роллс-Ройс (RB.211-535E4 и RB.211-524D4D), Дженерал Электрик (GE90) и других [1].

Несмотря на то, что масса широкохордной лопатки превышает массу лопатки с полкой и с большим удлинением, общая масса комплекта широкохордных рабочих лопаток в колесе оказывается меньше и их использование позволяет применить целый комплекс конструкторских и технологических мероприятий, приводящих к дополнительному снижению их массы. Опыт показал, что широкохордные лопатки обладают большей жесткостью. Это свойство позволяет повысить упругий потенциал поглощения энергии лопатками при ударе посторонним предметом и ударную стойкость колеса при попадании в тракт двигателя посторонних предметов, в том числе птиц [1].

В настоящее время рассматривается четыре типа облегченных широкохордных лопаток: металлическая, состоящая из двух половинок с сотовым наполнителем; композитная; гибридная - металл - композитный материал и полая слоистая металлическая [2]. В вышеуказанной работе автором рассмотрены проблемы изготовления вышеуказанных типов конструкций и отдается

предпочтение полый слоистой металлической оболочковой конструкции.

Применение такой конструкции («слоистый бронезилет») в перспективных двигателях большой двухконтурности позволяет создавать легкие и прочные колеса вентиляторов, в которых, например, ударная трещина, даже и возникнув в одном из слоев, не получит развития во всей лопатке, поскольку каждый из слоев реагирует на внешние воздействия совершенно самостоятельно [2].

В настоящее время проводятся исследования и работы по созданию облегченной широкохордной лопатки вентилятора ТРДД для магистрального самолета с использованием композита типа боралюминий [3], но необходимо отметить, что технологический процесс изготовления композитной лопатки продолжает оставаться сложным.

1. Экспериментальная часть

В рассматриваемой работе предлагается оценка прочностного состояния широкохордной лопатки оболочковой конструкций, в которой сотовый, металлический наполнитель заменен на полимерный материал типа пенопласта или полиуретана.

Статья не претендует на авторство конструктивного решения исследуемой лопатки, в связи с аналогичным решением для лопасти винта самолета Ан-70.

Статическая прочность

Для оценки прочностного состояния выбрана широкохордная вентиляторная лопатка ТРДД со степенью двухконтурности равной 10,73.

Основные геометрические данные анализируемой лопатки: $R_{вт} = 288,9$ мм, $R_{пер} = 1070$ мм, $L_{лоп} = 781,1$ мм, $b_{вт} = 242,7$ мм, $b_{пер} = 549,1$ мм, $S_{мах вт} = 23,4$ мм, $S_{мах пер} = 12,5$ мм.

Расчетный режим: - взлетный: $H = 0$ км; $MП = 0$; температура на входе ТВ = 15 °С, давление на входе РВХ = 101332 Па, обороты ротора вентилятора $n_{ФИЗ} = 2773,7$ об/мин.

Для упрощения задачи балансировки ротора вентилятора количество лопаток выбрано четным, и равным 22.

Распределение давлений по высоте лопатки представлено в таблице 1.

Расчет на прочность и колебания лопатки вентилятора, проведен с использованием метода конечных элементов, с использованием пакета программ «Solid Works» и «Cosmos Works».

Нами были построены твердотельные модели: лопатки оболочковой конструкции с полимерным, пористым наполнителем и монолитной лопатки вентилятора, для проведения сравнительной оценки их напряженно-деформированного состояния.

Таблица 1

$\bar{h} = \frac{h_i}{h_{лоп}}$	π_K^*	$P_{ВЫХ}^*$
0,0-0,1	1,33	134762.2
0,1-0,2	1,355	137304.8
0,2-0,3	1,36	137811.5
0,3-0,4	1,37	138842.8
0,4-0,5	1,38	139838.2
0,5-0,6	1,39	140851
0,6-0,7	1,4	141865
0,7-0,8	1,405	142371
0,8-0,9	1,41	142878
0,9-1,0	1,405	142371

Материал лопаток монолитной и оболочковой - титановый сплав ВТ-6. Масса монолитной лопатки составила 19,45 кг, а оболочковой с полимерным наполнителем 11,39 кг.

Толщина стенки оболочки задавалась переменной – в корневом сечении она составила 1,5 мм, а в периферийном сечении 0,5 мм.

В качестве полимера выбран пенопласт - ПСБ-С-50 со следующими механическими свойствами:

- модуль упругости: 12 МПа;
- модуль сдвига: 0,9 МПа;
- плотность: 35,5 кг/м³;
- предел прочности: 0,16 МПа;
- теплопроводность: 0,041 Вт/мК.

При создании расчетной сетки учитывались геометрические особенности широкохордной лопатки (значительное различие в размерах: длины, хорды и толщины оболочки). Был принят размер катета ячейки равный 1,5 мм, что позволило получать достоверные результаты при минимальном времени расчета.

Для получения достоверных результатов напряженно-деформированного состояния лопатки закрепление твердотельной модели под нагрузкой выполнено по замку ее крепления.

Расчет на прочность от действия газовых сил проводился при условии неравномерного распределения нагрузки по длине лопатки (см. табл. 1).

Получены напряжения как на спинке, так и на корыте лопатки рис. 2.

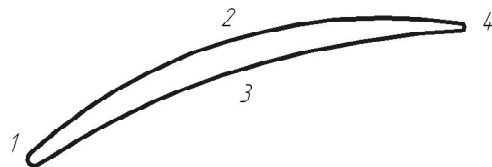


Рис. 2. Нумерация зон расчета напряженно-деформированного состояния широкохордной лопатки

Проведена оценка напряженно-деформированного состояния от действия отдельно центробежной и газовой сил, а также их совместного нагружения.

Результаты расчета представлены в таблице 2. На рис. 3 представлен результат расчета напряженно-деформированного состояния лопатки при действии на нее центробежной и газовой сил. Анализ результатов приведенных

в таблице 2 позволяет сделать вывод о том, что рассчитанные напряжения не превышают предельно допустимых значений как в монолитной, так и оболочковой лопатках, что позволяет сделать вывод, что запасы прочности находятся в допустимых пределах. Напряжения, полученные для монолитной лопатки совпадают с результатами полученными другими авторами.

Таблица 2

Тип лопатки	Расчетная зона	Напряжения от действия центробежных сил (МПа)			Напряжения от действия газовой силы (МПа)			Напряжения от действия суммарной силы (МПа)		
		Втулочное сечение	Среднее сечение	Периферийное сечение	Втулочное сечение	Среднее сечение	Периферийное сечение	Втулочное сечение	Среднее сечение	Периферийное сечение
Лопатка монолитной конструкции	1	94,5	107	0	19,7	35,3	0	92,9	47,1	0,1
	2	45,2	97,7	29	34	82,9	11	61,3	153,3	32,3
	3	450,4	248,7	101	167,7	70,5	5,5	415,7	85,2	102,4
	4	162,1	60	0	97,5	18,8	0	175,2	64,4	0
Лопатка оболочковой конструкции с полимерным наполнителем	1	107,	38,3	0,1	34,3	35,1	0	103,5	47,5	0
	2	46,7	107,5	28,9	59,8	84	6,6	45,3	174	34,8
	3	407,9	89,5	106,8	96,5	709	10,8	457,6	121	100,3
	4	121,9	66,8	0	185,7	18,1	0	154,3	65,1	0

Зона максимальных напряжений (см. рис. 3) расположена в зоне входной кромки со стороны корыта лопатки и смещается от нее вправо в зависимости от радиуса скругления перехода от пера к полке. На это смещение оказывает влияние также и размер выноса полки (в случае расчета на прочность пера лопатки - без замка максимальные напряжения размещаются на ее входной кромке в корневом сечении и значительно превышают допустимые).

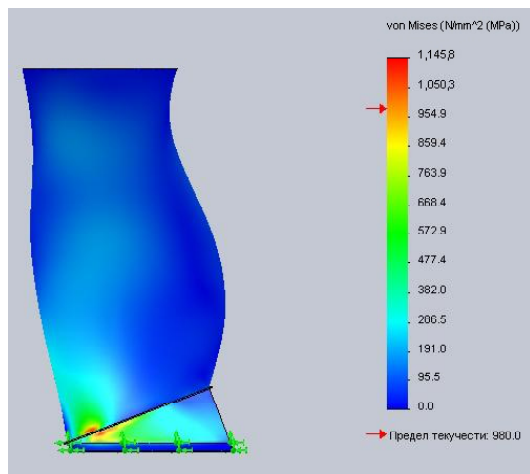


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние лопатки – «корыто» (зона 3)

Колебания лопаток

Наиболее точный расчет собственных частот колебаний лопатки сводится к пространственной динамической задаче теории упругости. Решение проведено численным методом – методом конечных элементов. В такой постановке удается рассчитывать с достаточной точностью все собственные частоты в диапазоне режимов двигателя с учетом влияния центробежных сил и особенностей геометрической формы лопатки.

При расчете лопаток на колебания нами использовалась ранее полученные твердотельная модель и расчетная сетка.

Расчет проводим с помощью пакета программы Cosmos-Works. Результаты расчета собственных частот, при угловой скорости вращения лопатки равной нулю, представлены в табл. 3.

Результаты расчетов показали, что лопатка оболочковой конструкции с полимерным наполнителем имеет не большее превышение в значении частот первых четырех форм колебаний по сравнению с монолитной титановой лопаткой.

Частотная диаграмма, рассчитанная для пяти форм колебания лопатки представлена на рис. 4.

Анализ построенной частотной диаграммы лопатки, оболочковой конструкции с полимерным наполнителем, (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что у предлагаемой конструк-

Таблица 3

Тип лопатки	Собственные частоты колебаний лопаток (1/с)									
	1-я форма	2-я форма	3-я форма	4-я форма	5-я форма	6-я форма	7-я форма	8-я форма	9-я форма	10-я форма
Лопатка монолитной конструкции	68,8	154,7	189,3	339,8	391	500,4	532,3	676,3	756	861,6
Лопатка оболочковой конструкции с полимерным наполнителем	84,3	146,3	159	340	367,5	505,4	538,5	661,3	761,5	850,6

ции лопатки возможны резонансные колебания в диапазоне рабочих оборотов двигателя. Эти резонансные колебания должны быть оценены в процессе экспериментального исследования. Конструкция лопатки позволяет изменением толщины оболочки лопатки или подбором жесткости полимерного наполнителя вывести резонансные колебания лопатки из зоны рабочих оборотов двигателя.

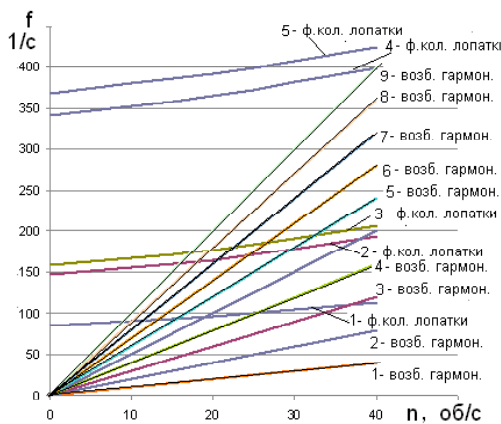


Рис. 4. Частотная диаграмма широкохордной лопатки оболочковой конструкции

Точность расчета форм колебаний лопаток методом конечных элементов очень важна при определении флаттера – автоколебаний лопатки, который более точно определяется экспериментальным путем уже созданной лопатки. На этапе проектирования устойчивость лопатки к автоколебаниям оценивается по приведенным частотам, (числам Струхала) определяемым по следующим формулам:

- параметр изгибного флаттера

$$\lambda_{\text{изг}} = \frac{2\pi f_{\text{изг}}^1}{W_{0,9}} b_{0,9}$$

где $f_{\text{изг}}^1$ - частота 1 изгибной формы, Гц;

$b_{0,9}$ - длина хорды на 0,9 высоты лопатки, м;

$W_{0,9}$ - скорость потока в относительном движении на 0,9 высоты лопатки на взлетном режиме, м/с.

Допустимое значение $\lambda_{\text{изг}} \geq 0,25$.

- параметр крутильного флаттера

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2\pi \Gamma_{\text{кр}}^1}{W_{0,9}}$$

где $\Gamma_{\text{кр}}^1$ частота 1-й крутильной формы, Гц.

Допустимое значение $\lambda_{\text{кр}} \geq 1,05$.

Указанные предельные значения приведенных частот справедливы при

$$\frac{f_{\text{кр}}^1}{f_{\text{изг}}^2} \leq 0,85$$

где $f_{\text{изг}}^2$ - частота 2-й изгибной формы, Гц.

Исследуемая оболочковая лопатка имеет:

$\lambda_{\text{изг}} = 1,5$, $\lambda_{\text{кр}} = 2,6$ и соотношение частот

$$f_{\text{кр}}^1 / f_{\text{изг}}^2 = 0,77.$$

Анализ полученных результатов указывает на отсутствие автоколебаний у исследуемой лопатки. Эти результаты в дальнейшем должны быть подтверждены экспериментальной проверкой.

Заключение

Таким образом, представленные в работе исследования позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая конструкция лопатки может быть использована в качестве вентиляторной лопатки современного ТРДД.

Перечень ссылок

1. Nicholas D. J. The wide-chord fan blade—a Rolls-Royce first.—Paper presented at VIII ISABE conference, Cincinnati, Ohio, USA, 15–19 June 1987.

2. Ивах А.Ф. Основы проектирования и создания рабочих лопаток из композиционного мате-

риала / А.Ф Ивах, А.А. Рыжов, Б.К. Галимханов.
- Машиностроение - Вестник ЦГАТУ (Уфа),
2008. т. 11, №2(29) с. 48-54.

3. Петухов А.Н. Свободная от недостатков пред-
шественников. Kim // Двигатель (ЦИАМ) №5,
(41)- 2005. — с. 67-72.

Поступила в редакцию 12.02.2010 г.

J. A. Gusev, F.F. Sirenko , N. Babiito , V.V. Boyko

**THE ANALYSIS OF STRESS-STRAIN AND DYNAMIC STATE OF
TURBOFAN BROAD-CHORD FAN BLADE**

У роботі розглядаються позитивні особливості застосування широкохордних вентиляторних лопаток ТРДД та існуючі варіанти їх конструкцій. Подано оболонкову конструкцію з полімерним наповнювачем.

Наведено аналіз процесу коливання лопатки з метою побудови її частотної діаграми. Проведена оцінка стійкості запропонованої лопатки до автоколивань, з використанням наведених частот (чисел Струхаля).

Наведено висновок про працездатність широкохордної вентиляторної лопатки оболонкової конструкції з полімерним наповнювачем. Запропонована широкохордна лопатка з полімерним наповнювачем може бути використана у конструкціях вентиляторних ступенів сучасних ТРДД.

Турбореактивний двоконтурний двигун, напруга, міцність, автоколивання, широкохордна лопатка, вентилятор, метод кінцевих елементів

This article deals with benefits of wide-chord fan blades exploitation in turbofan and existing design variants.

Shell-type construction with polymer filler is presented. The static stress calculation of aforementioned blade is presented. The blade oscillation process is analyzed aiming frequency diagram plotting. The stability assessment of blade to hunting with presented frequencies (Strouhal numbers) is made. The calculation about functionality of wide-chord fan blade shell-type construction with polymer filler is made. The proposed wide chord shell-type blade with polymer filler can be used in un-to-date turbofan fan stage constructions.