

УДК 621.3.002

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОСТОРОННИМИ ПРЕДМЕТАМИ ПОЛЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГТД

© 2011 М.Ш. Нихамкин<sup>1</sup>, И.В. Семенова<sup>1</sup>, О.Л. Любчик<sup>1</sup>, И.Л. Гладкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Поступила в редакцию 18.03.2011

Изложены методика и результаты численного моделирования процесса повреждения полых титановых лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя посторонними предметами, попадающими в проточную часть: градом, льдом, камнями. Сформулирована математическая постановка задачи, описана методика моделирования с помощью метода конечных элементов. Приведены полученные в результате моделирования количественные оценки параметров повреждений. Проведен анализ механизмов и закономерностей повреждения лопаток, полей остаточных напряжений.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки вентилятора, повреждение, остаточные напряжения

Эксплуатационное повреждение посторонними предметами (ППП) рабочих лопаток вентиляторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из важнейших факторов, определяющих надежность и безопасность воздушных судов [1]. Повреждения, возникающие в результате соударения лопаток с градом, посторонними предметами с взлетно-посадочной полосы, могут стать концентраторами напряжений, которые снижают сопротивление лопаток многоциклового усталости, приводят к их усталостным поломкам. Кроме того, ППП – причина значительных экономических потерь на восстановительные работы, задержку и отмену рейсов, выплату компенсаций [2]. Проблема особенно актуальна для полых лопаток вентиляторов, применяемых в современных двигателях большой двухконтурности. Для обеспечения стойкости к ППП таких лопаток имеющийся опыт исследования сплошных лопаток недостаточен.

**Цель исследования:** разработка методик расчетного моделирования соударения полых лопаток вентилятора с посторонними предметами, изучение механизмов, закономерностей и особенностей повреждения таких лопаток.

**Объектом исследования** является широкохордная крупногабаритная рабочая вентиляторная лопатка полых конструкции с гофрированным наполнителем (рис. 1) [3, 4]. Лопатка изготавливается из трех титановых листовых деталей: спинки, корыта.

*Михаил Шмерович Нихамкин, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Авиационные двигатели». E-mail: nikhamkin@mail.ru*

*Ирина Валерьевна Семенова, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели». E-mail: semenova-irina-v@mail.ru*

*Ольга Леонидовна Любчик, младший научный сотрудник кафедры «Авиационные двигатели». E-mail: olga-lvoroanova@yandex.ru*

*Иван Леонидович Гладкий, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела. E-mail: gladky@avid.ru*

**Объектом исследования** является широкохордная крупногабаритная рабочая вентиляторная лопатка полых конструкции с гофрированным наполнителем (рис. 1) [3, 4]. Лопатка изготавливается из трех титановых листовых деталей: спинки, корыта и гофрированного наполнителя методом совмещения сверхпластической формовки и сварки давлением (СПФ/СД). Высота лопатки более 700 мм, материал – титановый сплав ВТ6.

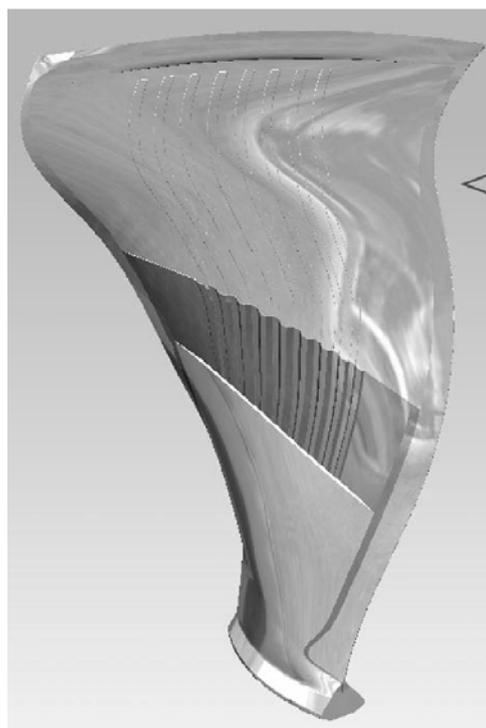


Рис. 1. Исследуемая лопатка вентилятора

Посторонние предметы, попадающие в газоздушный тракт двигателя, их форма, размеры, кинематические параметры варьируются в

широких диапазонах. В соответствии с нормативными документами предусмотрена экспериментальная проверка на натурном двигателе стойкости лопаток к попаданию града, ледяных пластин, птиц. Статистика повреждения сплошных вентиляторных лопаток [5] показывает, что в случае соударения с льдом повреждения возникают на входной кромке и представляют собой локальные отгибы кромки в сторону спинки (вмятины), иногда с «вырывом» металла. Кусочки бетона, мелкие камни с взлетно-посадочной полосы оставляют на входной кромке повреждения, характеризующиеся меньшей, чем в случае льда, пластической деформацией и более выраженным разрушением.

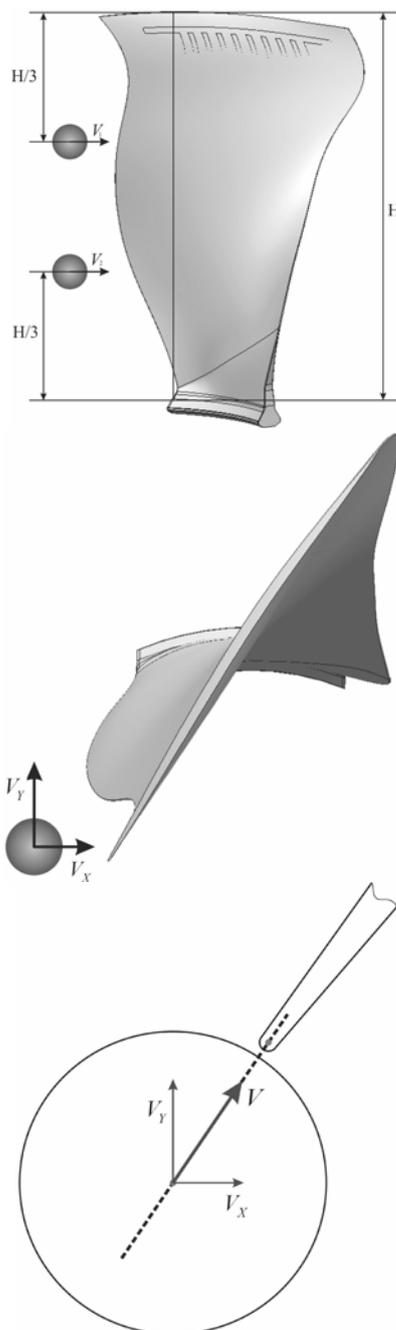


Рис. 2. К постановке задачи соударения лопатки с посторонним предметом

В настоящей работе при моделировании процесса повреждения лопатки принимали, что посторонний предмет (ПП) движется поступательно со скоростью  $V$  по направлению к входной кромке лопатки под некоторым углом  $\alpha$  к хорде (рис. 2). Лопатка неподвижно закреплена в корневом сечении. В качестве повреждающих предметов в соответствии с данными эксплуатационной статистики и требованиями нормативных документов рассматривались следующие варианты: град (ледяной шар) диаметром 25 мм и 50 мм, ледяная плита (прямоугольный параллелепипед) размером 20\*305\*65 мм, камень (кварцевый шар) диаметром 10 мм. Скорость соударения принималась соответствующей условиям сертификационных испытаний: для града и камня в случае точки соударения  $2/3H$  от корневого сечения  $V=340$  м/с, в случае точки соударения  $1/3H$  от корневого сечения  $V=380$  м/с, для ледяной пластины  $V=193$  м/с.

Для математического моделирования процесса повреждения лопаток в настоящей работе используется метод конечных элементов (МКЭ) в динамической трехмерной постановке [6, 7], позволяющий учитывать характерные особенности быстротекающего процесса соударения, пластическое деформирование и разрушение материалов, контактное взаимодействие лопатки с ПП. Математическая постановка задачи включает в себя уравнения движения, геометрические соотношения для случая больших деформаций:

$$\sigma_{ij,i} = \rho \ddot{u}_j,$$

$$2\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{m,j} \cdot u_{m,i}),$$

где  $\rho$  – плотность;  $u_i$  – компоненты перемещений,  $\sigma_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений и деформаций.

Поведение материала лопатки описывается упругопластической моделью с линейным деформационным упрочнением и скоростным упрочнением по Куперу-Саймондсу [8]. Для учета влияния скорости деформации на предел текучести материала в этой модели вводится масштабирующий коэффициент:

$$\beta = 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P},$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $C, P$  – константы материала.

Принималось, что разрушение материала лопатки происходит при достижении интенсивностью деформаций предельной деформации при одноосном растяжении  $\varepsilon_B$ .

Для материалов повреждающих предметов – льда и камня (кварца) – использовалась более простая модель линейной упругости с критерием разрушения:

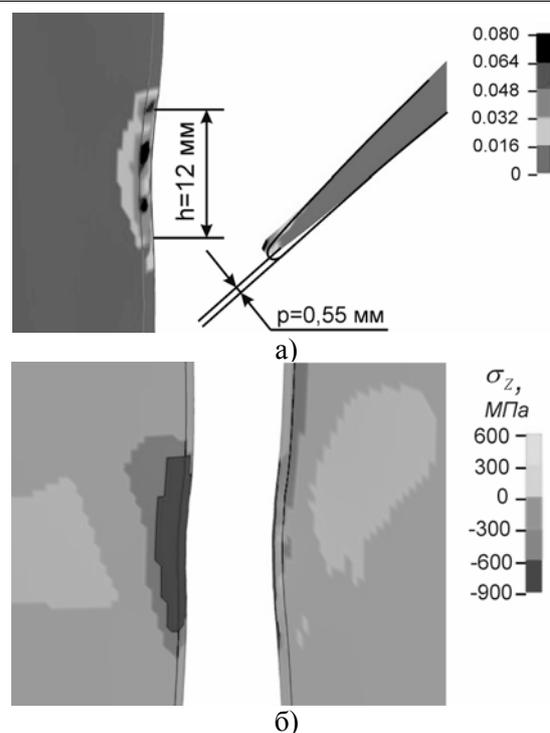
$$\sigma_1 \geq \sigma_B,$$

где  $\sigma_1$  – первое главное напряжение,  $\sigma_B$  – предел прочности.

Численное решение проводилось методом конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени, реализованным в пакете LS-DYNA [9]. Для анализа процесса соударения с различными повреждающими предметами было разработано несколько конечно-элементных моделей лопатки и ПП, различающихся типом и размерами используемых конечных элементов. Существенное ограничение на количество степеней свободы конечно-элементной модели накладывает динамическая нестационарная постановка задачи.

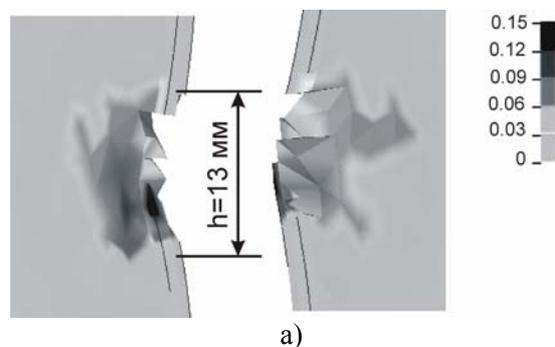
Для решения задачи соударения с ледяной плитой конечно-элементная модель лопатки состояла из объемных элементов первого порядка аппроксимации. В области соударения применялись призматические 8-узловые элементы с характерным размером 1 мм, на удалении от зоны соударения – тетраэдральные элементы. Модель ледяной плиты состояла из призматических элементов размером 2 мм. Общее количество элементов в системе лопатка – ПП составило около 190000. Для решения задачи соударения с градом и камнями использовалась конечно-элементная модель лопатки с уменьшенным количеством элементов. Она представляет собой фрагмент лопатки вблизи зоны соударения, размеры которого (приблизительно 100\*100 мм) выбирались таким образом, чтобы они были значительно больше области повреждения, и чтобы в модель входило полностью одно ребро гофрового наполнителя. По поверхности «вырезки» из лопатки принимается условие отсутствия перемещений – приближение допустимое в силу локального характера напряженно-деформированного состояния лопатки. Модель состоит из 24000 тетраэдральных элементов второго порядка аппроксимации.

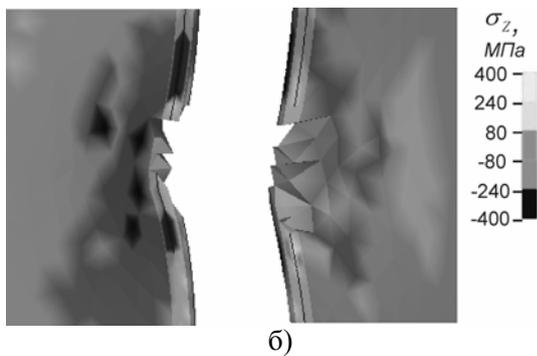
При моделировании контактного взаимодействия лопатки с повреждающим предметом использовался реализованный в LS-DYNA алгоритм «пенальти» [9]. В соответствии с рекомендациями [9] значение коэффициента пенальти выбиралось в пределах 5 Н/м. В исследованных случаях соударения лопатки с различными ПП имеет место схожий характер протекания процесса соударения: с момента контакта ПП с лопаткой начинается распространение волн напряжений, которое в зависимости от свойств ПП и его кинематических характеристик может сопровождаться пластическим деформированием и разрушением лопатки.



**Рис. 3.** Повреждение лопатки ледяной плитой:  
 а) эффективные пластические деформации;  
 б) нормальные остаточные напряжения  $\sigma_z$  (вдоль входной кромки)

При соударении с градом лопатка не разрушается и не получает пластических деформаций, град хрупко разрушается. При соударении лопатки с ледяной плитой хрупкое разрушение плиты сопровождается упругопластическим деформированием лопатки. Процесс соударения ПП занял 380 мкс. На входной кромке образуется повреждение в виде вмятины (рис. 3,а), эффективная пластическая деформация достигают 9% на входной кромке со стороны спинки. Остаточные напряжения в лопатке после соударения показаны на рис. 3,б. В зоне соударения вблизи кромки со стороны спинки лопатки остаточные напряжения сжатия достигают  $-900$  МПа, со стороны корыта  $-300$  МПа. На границе вмятины возникают растягивающие остаточные напряжения, их значения достигают  $+300$  МПа.





**Рис. 4.** Повреждение лопатки камнем:  
а) эффективные пластические деформации;  
б) нормальные остаточные напряжения  $\sigma_z$

При соударении лопатки с камнем процесс упруго-пластического деформирования лопатки сопровождается появлением на входной кромке разрывов (рис.4,а). Длина максимального разрыва  $l=3,4$  мм. Глубина вмятины составила  $p=2,4$  мм. Значение эффективной пластической деформации в зоне повреждения достигает 15%. Остаточные напряжения со стороны спинки сжимающие, достигают  $-270$  МПа, со стороны корыта  $-150$  МПа. Со стороны корыта на границе вмятины возникает зона растягивающих остаточных напряжений, их значения достигают  $+150$  МПа (рис.4,б). Полученные результаты моделирования соударения с ПП согласуются с данными эксплуатационной статистики [5]. Характер остаточных напряжений в зоне повреждения согласуется с расчетными данными [10].

Разработанная методика численного моделирования процесса повреждения полых вентиляторных лопаток при попадании в двигатель посторонних предметов (града, льда, камней) позволяет учитывать конструктивные особенности лопаток, скоростное упрочнение материала лопатки, пластические деформации и разрушение лопатки, нелинейный характер контактного

взаимодействия лопатки и ПП. Разработанная методика и полученные количественные оценки параметров повреждений могут быть использованы для сравнительной оценки стойкости лопаток различной конструкции к ППП, а также при подготовке к сертификационным испытаниям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Сиротин, Н.Н.* Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. (Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок). – М.: РИА "ИМ-Информ", 2002. 442 с.
2. *Bachtel, B.* Foreign Object Debris and Damage Prevention, www.boeing.com
3. *Валиахметов, О.Р.* Использование наноструктурных материалов и нанотехнологий для создания полых конструкций / *О.Р. Валиахметов, Р.М. Галеев, В.А. Иванько* и др. // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 11-12. С. 56-65.
4. *Иноземцев, А.А.* Перспективная технология изготовления полых широкохордной лопатки вентилятора. Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: Сборник статей / *А.А. Иноземцев, Р.Р. Мулюков, Р.В. Сафиуллин* и др. // Под общей редакцией *Анциферова В.Н.* – Пермь, Пермский ЦНТИ, 2009. С. 61-65.
5. *Morse, G.A.* Investigating FOD Damage, Atlanta FOD Conference, FAST, Inc., 2004.
6. *Guan, Yupu.* Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part II: Numerical Simulation of Bird Impact / *Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei* et al. // Chinese Journal of Aeronautics. 2008. 21. P. 328-334.
7. *Vasko, T.J.* Fan blade bird-strike analysis and design. Proceedings of 6<sup>th</sup> International LS-DYNA Users Conference Simulation. 2000. P. 9.13-9.18.
8. *Chen, X.* Foreign object damage on the leading edge of a thin blade. Mechanics of Materials. 2005. 37. P. 447-457.
9. *Hallquist, J.* LS-DYNA Theoretical Manual – Livermore Software Technology Corporation, 1999. 498 p.
10. *King, A.* Residual stress evolution in the wide chord fan blade / *A. King, A. Steuwer, P.J. Withers* // Technical report ME780, ESRF 2004. P. 1-2.

## DAMAGE MODELING BY EXTRANEIOUS SUBJECTS THE HOLLOW FAN BLADES OF GAS-TURBINE ENGINE

© 2011 M.Sh. Nihamkin<sup>1</sup>, I.V. Semenova<sup>1</sup>, O.L. Lyubchik<sup>1</sup>, I.L. Gladkiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Perm State Technical University

<sup>2</sup> JSC "Aviadvigatel", Perm

The technique and results of numerical modeling the process of damage the hollow titanic fan blades from aviation gas-turbine engine by extraneous subjects getting to a flowing part: hailstones, ice, stones are stated. Mathematical statement of a problem is formulated, the technique of modeling by means of final elements method is described. The quantitative estimations of damage parameters received as a result of modeling are resulted. The analysis of mechanisms and laws of damage for blades, fields of residual pressure is carried out.

Key words: *gas-turbine engine, fan blades, damage, residual pressure*

*Mikhail Nihamkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the "Aircraft Engines" Department. E-mail: nikhamkin@mail.ru*

*Irina Semenova, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the "Aircraft Engines" Department. E-mail: semenova-irina-v@mail.ru*

*Olga Lyubchik, Minor Research Fellow at the "Aircraft Engines" Department. E-mail: olga-l-voronova@yandex.ru*

*Ivan Gladkiy, Candidate of Technical Sciences, Vice-Chief of the Department. E-mail: gladky@avid.ru*