

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД К ПОВРЕЖДЕНИЮ ПОСТОРОННИМИ ПРЕДМЕТАМИ

© 2009 М. Ш. Нихамкин, И. В. Семенова

Пермский государственный технический университет

Повреждение посторонними предметами – одна из основных причин поломок газотурбинных двигателей. В статье описывается методика вероятностной оценки стойкости лопаток компрессора к повреждению посторонними предметами. Методика основана на численном и экспериментальном моделировании повреждения лопаток, экспериментальной и расчетной оценке снижения усталостной прочности поврежденных лопаток с использованием минимального объема усталостных испытаний, расчете вероятности поломки лопатки. Предложенная методика может быть использована для оценки эффективности мероприятий по повышению стойкости лопаток к эксплуатационным повреждениям посторонними предметами.

*Повреждение посторонними предметами, газотурбинные двигатели, лопатки компрессора, вероятностная оценка, усталостная прочность*

Одна из наиболее распространенных причин повреждения лопаток компрессора – попадание посторонних предметов (ППП) в проточную часть двигателя. Повреждения на кромках в виде забоин, вмятин и т.д. становятся концентраторами напряжений и понижают вибропрочность лопаток. Возможность существования таких повреждений учитывается при проектировании лишь коэффициентом запаса, не всегда достаточным для компенсации их отрицательного влияния. Несмотря на предпринимаемые меры защиты двигателей от попадания посторонних предметов, появление во время эксплуатации таких дефектов является реальным фактором, влияющим на надёжность. Стремление сделать кромки лопаток тоньше, чтобы уменьшить аэродинамические потери и повысить топливную экономичность двигателей, делает проблему повреждения лопаток посторонними предметами еще более актуальной.

Один из путей повышения надёжности лопаток – обеспечение стойкости к ППП – должно опираться на понимание закономерностей процессов повреждения, снижения прочности лопаток с учетом специфики их конструкции, технологических и эксплуатационных факторов.

Цель настоящей работы состоит в создании методики сравнительного анализа эффективности конструктивных и технологических мероприятий, направленных на обеспечение усталостной прочности лопаток с учётом возможных повреждений посторо-

нными предметами, надёжности двигателей, безопасности их эксплуатации.

Эффективность мероприятий по повышению стойкости лопаток вследствие случайного характера процесса их повреждения должна характеризоваться вероятностными оценками. Вероятность поломки лопатки вследствие ППП можно оценить как вероятность совмещения двух событий: попадания постороннего предмета в лопатку  $P(A)$  и поломки лопатки  $P(B)$

$$P(A \cap B) = P(A)P(B). \quad (1)$$

Не рассматривая в настоящей работе причины и механизмы попадания посторонних предметов в проточную часть двигателя и принимая вероятность  $P(A) = const$ , считаем вероятность поломки повреждённой лопатки  $P(B)$  показателем, оценивающим стойкость лопаток к повреждениям.

Вероятность  $P(B)$  определяется характером и размерами полученного лопаткой повреждения, которые зависят от ряда случайных величин, в частности, от кинетической энергии повреждающего предмета. Для расчёта  $P(B)$  предлагается методика, включающая в себя четыре этапа. Эта методика описана ниже на примере анализа эффективности утолщения входной кромки лопатки 9-й ступени компрессора высокого давления.

Этап 1 состоит в определении характера и размеров повреждения лопаток посторонним предметом в зависимости от его кинетической энергии. Для этого проводится численное моделирование процесса повреж-

дения лопатки. Сложность состоит в многообразии возможных эксплуатационных ситуаций повреждения, в результате чего параметры повреждения зависят не только от кинетической энергии повреждающего предмета. Для преодоления этой проблемы предлагается принцип моделирования "типичного эксплуатационного повреждения", наиболее характерного с точки зрения эксплуатационной статистики: вмятины, разрыва или забоины на входной кромке лопатки.

Согласно этому подходу разработана схема моделирования ППП, показанная на рис.1. Посторонний предмет в форме шара диаметром  $d$  ударяется о входную кромку лопатки под углом  $\alpha$  к хорде профиля. Скорость постороннего предмета  $V$  определяется заданным диапазоном вариации кинетической энергии. Как показали расчетные и экспериментальные исследования [1,2], такая схема позволяет реализовать перечисленные виды типичных повреждений. При моделировании [1] учитывались характерные особенности процесса соударения лопатки с посторонним предметом: трехмерный нестационарный динамический характер напряженного состояния лопатки, контактное взаимодействие лопатки и постороннего предмета, характеризующееся неизвестной, изменяющейся во времени площадью контакта и нагрузкой на этой площадке, пластическая деформация и разрушение лопатки. Математическое моделирование реализовано методом конечных элементов в пакете ANSYS [1].

В рассматриваемом примере лопатки 9-й ступени диапазон варьирования кинетической энергии постороннего предмета при математическом моделировании на основании статистической оценки составлял 0...60 Дж. Моделирование проводили для двух геометрий входных кромок лопаток: номинальной и утолщенной на 30% (рис.2).

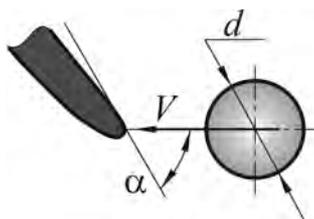


Рис.1. Схема соударения лопатки и постороннего предмета

Результаты численного моделирования представляют собой размеры и тип (вмятина, разрыв, забоина) повреждения лопатки. По мере увеличения кинетической энергии повреждающего предмета  $E_k$  работа пластического деформирования лопатки  $A_p$  возрастает (рис. 2) до некоторого критического значения, при котором происходит смена механизма повреждения: пластическая деформация с образованием вмятины сменяется разрушением с образованием разрыва, а при дальнейшем увеличении энергии - забоины. Это критическое значение кинетической энергии постороннего предмета зависит, в частности, от толщины входной кромки лопатки: в рассматриваемом примере лопатки 9-й ступени с номинальной толщиной входной кромки разрывы появляются при  $E_k=11$ Дж, а в случае утолщенной кромки – при 44 Дж.

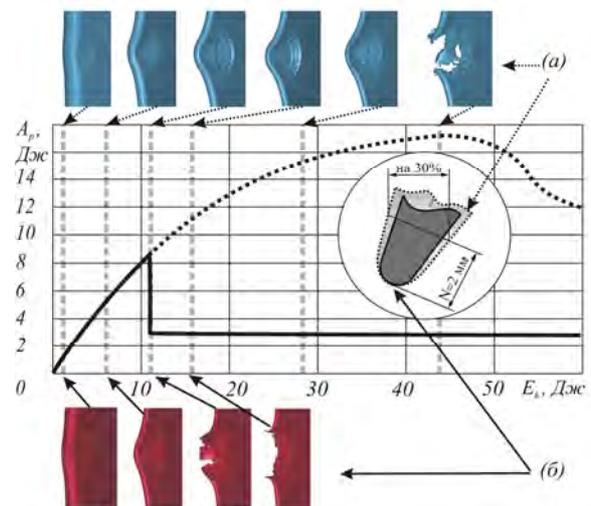


Рис.2. Расчетное моделирование повреждений утолщенной (а) и номинальной (б) кромки лопатки в заданном диапазоне кинетических энергий

Верификация математической модели производилась по результатам специального экспериментального исследования [2] с регистрацией широкого круга параметров: кинематики повреждающего предмета, геометрических параметров повреждения, остаточных деформаций. Пример сравнения экспериментальных и расчётных повреждений приведён на рис.3.

Этап 2 состоит в определении эффективного коэффициента концентрации напряжений для лопатки с повреждениями различного типа и размеров (в зависимости от кинетической энергии повреждающего предмета).

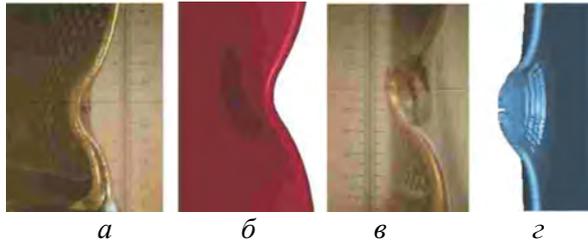


Рис.3. Экспериментальные (а, в) и расчетные (б, г) повреждения лопатки

Вместо проведения усталостных испытаний лопаток с концентраторами, имитирующими повреждения, в настоящей работе используется методика [3], состоящая в расчете теоретического коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  и последующей оценки  $K_\sigma$ .

Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  рассчитывается [4] методом конечных элементов в трехмерной постановке по полученным на первом этапе геометрическим параметрам повреждений. При этом в случае повреждений в виде вмятин геометрия поврежденной лопатки переносится непосредственно из первого этапа расчета.

В случае повреждений типа забоины значение  $\alpha_\sigma$  зависит только от двух её размеров: глубины  $h$  и радиуса при вершине  $\rho$ . Для его определения можно воспользоваться простой аппроксимацией [4]:

$$\alpha_\sigma = 1 + 1,5\sqrt{h/\rho} \quad (2)$$

Для оценки эффективного коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$  используется коэффициент чувствительности к концентрации напряжений  $q$ :

$$K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1) \quad (3)$$

Значения  $q$ , полученные в [3], составляют для лопаток из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8М  $q=0,23...0,46$ , для лопаток из сплава ЭИ737  $q=0...0,09$ .

Этап 3 состоит в определении коэффициента запаса динамической прочности поврежденной лопатки  $K_V$  в зависимости от кинетической энергии повреждающего предмета.

С учетом асимметрии цикла нагружения  $K_V$  определяется как:

$$K_V = \frac{\sigma_{-1Л} K_\sigma}{\sigma_v} \left( 1 - \frac{1}{K_{см}} \right) \quad (4)$$

где  $\sigma_v$  – максимальные динамические напряжения в лопатке;  $\sigma_{-1Л}$  – предел выносливости неповрежденной лопатки;  $K_{см}$  – коэффициент запаса статической прочности.

Для рассматриваемого примера лопатки 9-й ступени зависимость коэффициент запаса будет иметь вид, приведенный на рис.4.

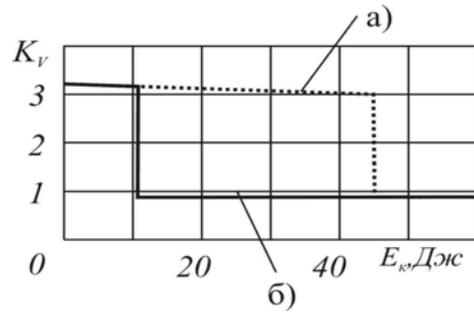


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса динамической прочности от кинетической энергии ПП: а - утолщенная кромка; б - номинальная толщина кромки

Этап 4 состоит в определении условной вероятности поломки поврежденной лопатки, которая может быть определена как  $P(B) = P(K_V < 1)$ .

При оценке  $P(B)$  необходимо задаться законом распределения кинетической энергии повреждающих предметов. В рассматриваемом примере это распределение принято равномерным в диапазоне 0...60 Дж. При этом (рис. 4) для лопатки с номинальной толщиной кромки  $P(B)=0,816$ , для лопатки с увеличенной толщиной кромки  $P(B)=0,266$ . Зависимость условной вероятности поломки  $P(B)$  от относительного утолщения входной кромки  $\Delta C$  приведена на рис.5. Увеличение толщины входной кромки лопатки на 30% приводит к уменьшению вероятности поломки поврежденной лопатки в 3,1 раза.

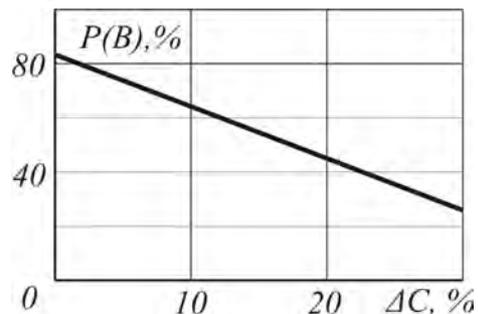


Рис.5. Зависимость условной вероятности поломки от утолщения входной кромки

Предложенная методика может быть использована для оценки эффективности мероприятий по повышению стойкости лопаток компрессора к повреждению при попадании посторонних предметов в проточную часть газотурбинного двигателя.

#### **Библиографический список**

1. Nikhamkin, M.S. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades / M.S. Nikhamkin, L.V. Voronov, I.V. Semenova // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008 "Power for Land, Sea and Air GT2008". – Berlin, 2008. – GT2008-51493.
2. Нихамкин, М.Ш. Экспериментальное исследование повреждения лопаток компрессора при попадании посторонних предметов / М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, И.В. Семёнова // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь: ПГТУ, 2009. – С.364-367.
3. Нихамкин, М.Ш. Снижение усталостной прочности лопаток компрессора ГТД при повреждении посторонними предметами / М.Ш. Нихамкин [и др.] // Авиационная промышленность. – 2008 – №1. – С.21-24.
4. Нихамкин, М.Ш. Теоретический коэффициент концентрации напряжений в ло-

патках компрессора с повреждениями / М.Ш. Нихамкин [и др.] // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь: ПГТУ, 2009. – С.321-324.

#### **References**

1. Nikhamkin, M.S. Foreign object damage and fatigue strength loss in compressor blades / M.S. Nikhamkin, L.V. Voronov, I.V. Semenova // Proceedings of ASME Turbo Expo 2008 "Power for Land, Sea and Air GT2008". – Berlin, 2008. – GT2008-51493.
2. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V. Experimental investigations of foreign object damage// Aerospace engineering, high technologies and innovations. – Perm: PSTU, 2009. – P.364-367.
3. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Konev I.P., Semenova I.V., Plotnikov Y.I., Saraeva L.V. Gas turbine blade fatigue strength loss after foreign object damage // Aircraft industry. – 2008 – №1. – P.21-24.
4. Nikhamkin M.S., Voronov L.V., Semenova I.V., Lubchik O.L. Geometric stress concentration factor in damaged compressor blades // Aerospace engineering, high technologies and innovations. – Perm: PSTU, 2009. – P. 321-324.

## **PROBABILISTIC ESTIMATE OF COMPRESSOR BLADES DURABILITY TO FOREIGN OBJECT DAMAGE**

© 2009 M. S. Nikhamkin, I. V. Semenova

Perm State Technical University

Foreign object damage is a significant cause of failure in gas turbine engines. The paper describes a methodology for probabilistic estimation of real compressor blades durability to foreign object damage. The methodology is based on numerical and experimental modeling of blade damage, experimental and computational procedure for assessment the fatigue strength loss of the damaged blades using minimum fatigue tests, failure probability calculation. The methodology may be used for evaluation the efficiency of durability rising procedures.

*Foreign object damage (FOD), gas turbine engine, compressor blade, probabilistic estimation, fatigue strength*

### Информация об авторах

**Нихамкин Михаил Шмерович**, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Авиационные двигатели» Пермского государственного технического университета. Тел. (342) 239-13-61. E-mail: [nikhamkin@pstu.ru](mailto:nikhamkin@pstu.ru). Область научных интересов: повреждения лопаток компрессора посторонними предметами, механика разрушения, модальный анализ.

**Семенова Ирина Валерьевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели» Пермского государственного технического университета. Тел. (342) 239-13-61. E-mail: [kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru](mailto:kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru). Область научных интересов: повреждения лопаток компрессора посторонними предметами.

**Nikhamkin Mikhail Shmerovich**, doctor of Technical Science, professor of Aircraft Engine department in Perm State Technical University. Phone: (342) 239-13-61. E-mail: [nikhamkin@pstu.ru](mailto:nikhamkin@pstu.ru). Area of research: foreign object damage of gas turbine compressor blades, fracture mechanics, modal analysis.

**Semenova Irina Valerievna**, Candidate of Technical Science, Assotiate professor of Aircraft Engine department in Perm State Technical University. Phone: (342) 239-13-61. E-mail: [kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru](mailto:kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru). Area of research: foreign object damage of gas turbine compressor blades.