

УДК 539.4

**А.Р. ЛЕПЕШКИН, П.А. ВАГАНОВ***Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГТД С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ОБРЫВА ПО РАЗНЫМ СЕЧЕНИЯМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОРПУСОВ НА НЕПРОБИВАЕМОСТЬ**

*Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности рабочих лопаток ГТД с учетом условий обрыва по разным сечениям при испытаниях на непробиваемость. Методика обрыва лопатки заключается в перераспределении напряжений в заданном сечении лопатки при дополнительном ее термическом нагружении и в обеспечении разрушения лопатки по указанному ее сечению на заданной частоте вращения. Приведены результаты расчетного моделирования напряженно-деформированного состояния лопатки по разным ослабленным сечениям в двух случаях: корневому сечению и сечению по верхней части замка с использованием метода конечных элементов. Рассмотрено влияние нагрева на снижение запаса прочности и других параметров разных сечений ослабленной лопатки. Предложенная методика была использована при проведении испытаний на разгонном стенде. Разработанная методика расчета НДС и прочности рабочей лопатки ГТД (по разным ослабленным сечениям) является эффективной и ее можно использовать с целью обрыва лопатки при испытаниях корпусов авиационных двигателей и энергетических установок на непробиваемость.*

**Ключевые слова:** лопатка, корпус, испытание, методика, обрыв, расчет, прочность, сечения, разгонный стенд.

### **Введение**

Нормы летной годности требуют проведения испытаний корпусов газотурбинных двигателей (ГТД) в случае обрыва лопаток на максимальной частоте вращения ротора. По данным испытаниям судят о достаточной прочности корпуса. При этом в нормативных документах не указано, каким методом должен быть произведен обрыв и какой минимальный запас статической прочности должна иметь лопатка с ослабленным сечением. Задача экспериментаторов состоит в том, чтобы имитировать усталостное разрушение в заданном сечении. Наиболее распространенный метод взрыва [1] состоит в том, что заданное сечение ослабляется подрезкой, в центральной части замка устанавливается заряд и при выходе на рабочие обороты производят взрыв. Данный метод имеет следующие недостатки: трудности работы со взрывчаткой, сложно подобрать величину требуемого заряда, к тому же при взрыве выделяется большая дополнительная энергия, которая меняет траекторию полета лопатки. Другой метод наиболее простой в исполнении – метод последовательной подрезки [2]. В этом случае подрезают сечение, затем выходят на заданную частоту вращения, если обрыв не произошел, то делают дополнительную подрезку и так далее. Однако такой обрыв может произойти на меньшей частоте вращения и условия испытаний не будут соответствовать требуемым.

### **1. Методика расчета**

В данной работе новая расчетно-экспериментальная методика обрыва рабочей лопатки без использования взрыва [3, 4]. В соответствии с данной методикой первоначально производят подрезку в заданном сечении для уменьшения запаса прочности лопатки вентилятора ГТД до 1,3-1,4 (область 4 на рис. 1), оставляют центральное сечение 1 с вырезом под нагреватель и кромки 2 и 3. При выходе на заданную частоту вращения включают нагреватель, происходит разгружение (удлинение) центральной части и догружение кромок лопатки. Вследствие этого разрушаются кромки, далее – центральная часть лопатки. Данный процесс требует математического моделирования, поскольку при испытании диск с лопатками (одна из которых подрезана) должен быть раскручен до заданной максимальной частоты вращения (в данном случае 11000 об/мин), при этом должен быть осуществлен гарантированный обрыв лопатки. В связи с этим, подрезанная лопатка должна обладать достаточным запасом прочности в каждом из ее сечений. При включении нагревателя догружение кромок должно быть таким, чтобы они оборвались. Таким образом, нужно рассчитать запас прочности в заданном ослабленном сечении в зависимости от температуры с учетом касательных напряжений

и получить, что в начальный момент времени прочность ослабленной лопатки достаточна при выходе на заданную частоту вращения, а при ее нагреве на данной частоте вращения кромки обрываются.

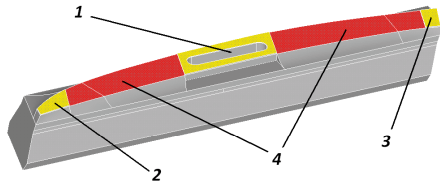


Рис 1. Ослабленное сечение лопатки вентилятора

Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) лопатки в поле действия центробежных сил с учетом нагрева в ее центральной области (нагревателя) была использована пластическая модель с полилинейным упрочнением [5-7].

Для определения температурного поля, созданного нагревателем, используются уравнение теплопроводности

$$c\gamma \frac{\partial t}{\partial t} = \text{div}(-\lambda \text{grad } t) + p \quad (1)$$

где  $p$  - удельная мощность нагревателя.

Моделирование производилось в программном комплексе ANSYS. Результат теплового расчета области лопатки представлен на рис.2 (распределение температуры в момент времени нагрева,  $t = 15$  с), расчета НДС – рис.3 (растягивающие напряжения вдоль действия центробежной силы, ось Z, вид сверху,  $t = 0$  с).

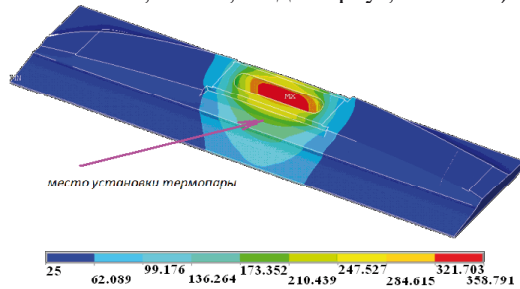


Рис 2. Распределение температуры в области нагревателя

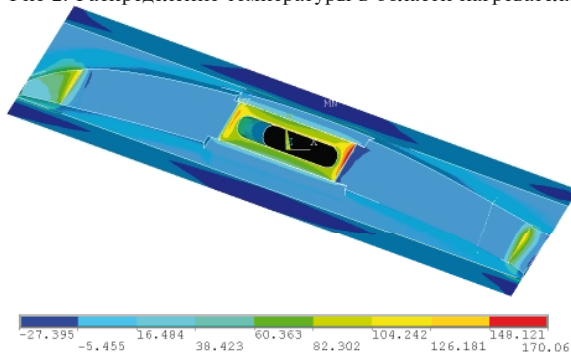


Рис 3. Распределение напряжений в ослабленном сечении лопатки

Для определения несущей способности ослабленной лопатки вентилятора ГТД вычисляется критическая сила  $P_{кр}$  – это максимальное значение нагрузки, которую может выдержать сечение при действии заданного момента  $M$ , когда весь материал находится в пластическом состоянии (рис. 4, формула 2). Аналогично  $M_{кр}$  – максимальное значение момента при фиксированной нагрузке  $P$ .

$$P = 2\sigma_T \times a \quad (2)$$

$$P_{кр} = \sigma_T a \sqrt{b^2 - \frac{4M}{\sigma_T a}} \quad (3)$$

$$M_{кр} = \sigma_T a \left( \frac{b^2}{4} - \frac{P^2}{4\sigma_T^2 a^2} \right) \quad (4)$$

$$n = \frac{P}{P_{кр}} \quad (5)$$

$$n' = \frac{P}{P'_{кр}} \quad (6)$$

С учетом касательных напряжений предел текучести  $\sigma' = \sqrt{\sigma_T^2 - 3\tau^2}$

$$P'_{кр} = \sigma' a \sqrt{b^2 - \frac{4M}{\sigma' a}} \quad (7)$$

## 2. Анализ полученных результатов

На основе проведенного расчета напряженно-деформированного состояния и несущей способности рабочей титановой лопатки вентилятора ГТД в программном комплексе ANSYS, получаем следующие величины: растягивающее усилие  $P$  (кГ), растягивающее критическое усилие  $P_{кр}$  (кГ), изгибы  $M_x$  (кГ\*мм) и  $M_y$ , запас прочности  $n$ , касательное напряжение  $\tau$  (кгс/мм<sup>2</sup>) и предел текучести  $\sigma_T$  (кгс/мм<sup>2</sup>), растягивающее критическое усилие  $P_{кр}$  (кГ), запас прочности  $n$  с учетом касательных напряжений, момент времени  $t$  (с) и температура  $T$  (°С).

Указанные результаты прочностного расчета по входной кромке сведены в таблицу 1 и таблицу 2.

Таблица 1.

Результаты прочностного расчета

t	$M_x$	$M_y$	P	$P_{кр}$	T
0	-87	2574	2168	3246	0°
15	56	3133	2456	3092	173°
20	235	3435	2666	3006	281°
23	301	3664	2767	2939	357°

Таблица 2

Результаты прочностного расчета

t	n	$\tau$	$\dot{\sigma}_T$	$\dot{P}_{кр}$	$\dot{N}$	T
0	1.5	16.9	90	3054	1.41	0°
15	1.26	19.1	89	2843	1.16	173°
20	1.13	20.2	88	2724	1.02	281°
23	1.06	21	87	2631	0.95	357°

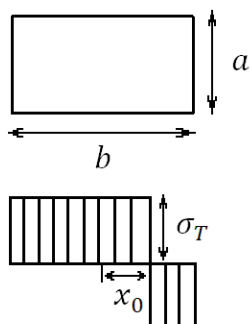


Рис. 4. Прямолинейное сечение

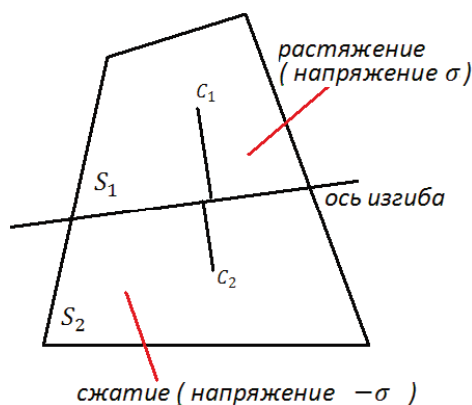


Рис. 5. Криволинейное сечение

Для криволинейного сечения (Рис 5.) параметры  $a$  и  $b$ , аналогичные прямолинейному сечению (рис.4), определяются из уравнений (8, 9)

$$S = ab \quad (8)$$

$$y_{C_1} S_1 + y_{C_2} S_2 = \frac{ab^2}{4} \quad (9)$$

Полученные результаты согласуются с экспериментом. При испытаниях корпуса на непробиваемость обрыв лопатки на разгонном стенде произошел в момент времени 16 с при температуре термопары (рис.2) 200 °С. Теоретическое время разрушения составляет 20 с (табл.1, табл.2). Таким образом, первоначально разрушается сечение 2 (рис.1) входной кромки и далее гарантируется полное разрушение выходной кромки 3 и центральной части 1. Для

этого был сделан аналогичный расчет, но без сечения 2, при этом НДС сечения 3 выходной кромки показано на рис. 7 ( $t = 15$  с), аналогичное НДС при наличии сечения 2 – рис. 6 ( $t = 15$  с). Видно существенное изменение НДС,  $M_x = 3927$ ,  $P = 471$ ,  $\tau = 43,2$ , тогда по формуле (4)  $M_{кр} = 3682$ ,  $n' = \frac{M_{кр}}{M_x} = 0.94$ , то есть происходит дальнейшее разрушение и лопатка обрывается.

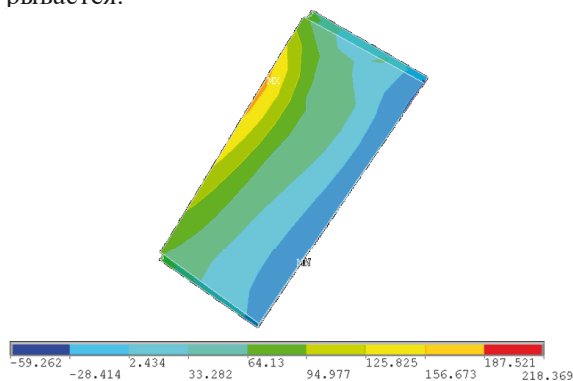


Рис. 6. Сечение входной кромки

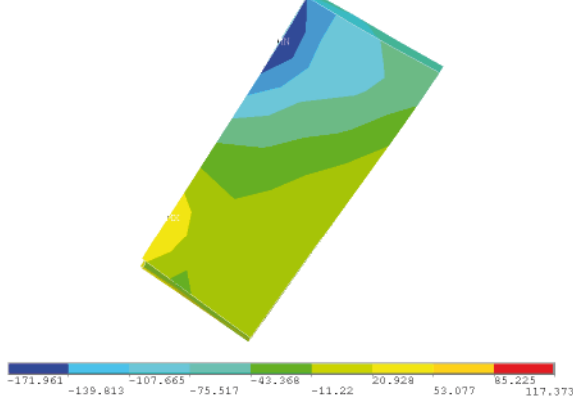


Рис. 7. Сечение выходной кромки

Российские нормы летной годности требуют производить подрезку лопатки по верхнему зубу замкового соединения. Для этого случая было выполнено аналогичное проектирование доработки и расчет лопатки. НДС в этом случае показано на рис. 8. Среднее сечение перемещено в сторону спинки лопатки. Сечения участков входной и выходной кромок выполнены в виде треугольников. Выведем формулы для расчета несущей способности треугольного сечения (рис. 9). Для этого возьмем равнобедренный треугольник с основанием  $a$  и высотой  $b$ ,  $C$  – центр масс треугольника. Как и в случае прямоугольного сечения рассматриваем предельное состояние, когда с одной стороны происходит равномерное растяжение, с другой - равномерное сжатие. Такое распределение напряжений будет соответствовать максимальной несущей

способности треугольного сечения при воздействии растяжения с изгибом.

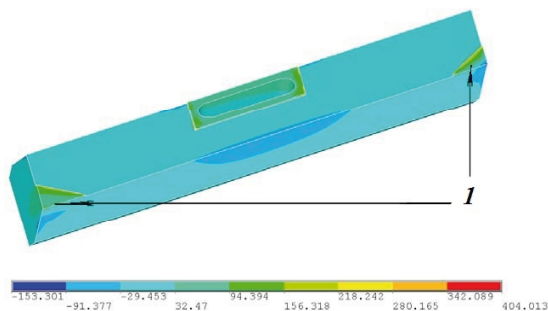


Рис. 8. Распределение напряжений  $\sigma_{zz}$  в подрезанном сечении,  $t = 60$  с ( $I$  – треугольное сечение)

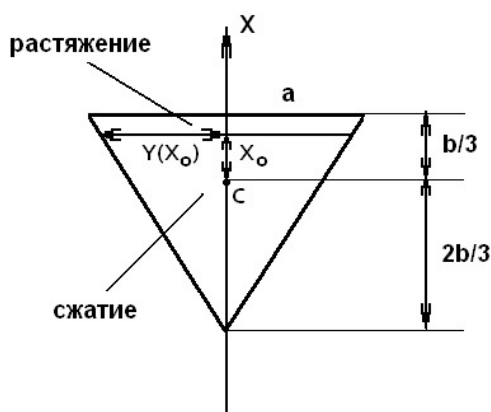


Рис. 9. Расчет треугольного сечения

Выразим значения изгиба  $M^*$  и растяжения  $P^*$  в зависимости от заданных параметров:

$$M^* = \frac{2ab^2}{81b} \sigma_T (4b^3 - 27bx_0^2 - 27x_0^3) \quad (10)$$

$$P^* = \frac{a}{18b} \sigma_T (b^2 - 24bx_0 - 18x_0^2) \quad (11),$$

где  $\sigma^* = \sqrt{\sigma_T^2 - 3\tau^2}$ .

Если, допустим, известны действующие значения  $M^*$ ,  $P^*$  и  $\tau^*$  (с учетом действия касательных напряжений по сечению верхней части замка лопатки), то можно определить запас прочности  $n^*$  – с учетом действия касательных напряжений. Подставляем в уравнение (2) значение  $M$  и других параметров, решаем его относительно  $x_0$ . Поскольку возможно получить три различных решения, то выбираем минимальное  $x_0 \in \left[ \frac{-2b}{3}, \frac{b}{3} \right]$ , так как при этом будет достигаться максимальное значение  $P^*$ . Далее подставляем  $x_0$  в уравнение (3) и полу-

чаем критическую силу  $P_{кр}^*$  и запас прочности  $n^* = P_{кр}^* / P$ . Значения  $M$ ,  $P$ ,  $\tau$  определяются по значениям нагрузок в узлах конечно-элементной сетки.  $T$  – температура вблизи центрального участка сечения. Расчетные значения представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.

Нагрузки в сечении входной кромки,  $a = 14$  мм,  $b = 7,5$  мм,  $S = 52,5$  мм

t	M	P	$\tau$	$\sigma_T^*$	$P_{кр}^*$	$n^*$	T
0	1651	2362	34,8	79,8	3640	1,54	25 °
60	2432	2587	43,2	66,3	3183	1,23	375 °

Таблица 4.

Нагрузки в сечении выходной кромки,  $a = 12,25$  мм,  $b = 5,2$  мм,  $S = 31,85$  мм

t	M	P	$\tau$	$\sigma_T^*$	$P_{кр}^*$	$n^*$	T
0	989	1694	17,5	95,3	2253	1,33	25 °
60	2134	1918	20,9	93,2	1899	0,99	375 °

В этом случае первоначально прогнозируется разрушение выходной кромки, при этом после ее разрушения существенно изменится НДС входной кромки (рис. 10). Изгибающий момент относительно оси D (рис. 11) равен 3950 кГ·мм. Причем параметры  $a$  и  $b$  изменятся (изгиб относительно другой оси),  $a = 8,4$  мм,  $b = 12,5$  мм. Поскольку растягивающие напряжения действуют в вершине треугольника, а не в основании, то следует в формулах (10) и (11) поменять знаки  $P$  и  $M$  на отрицательные. Подставляем значение  $M = -3950$  в формулу (2) и находим единственное решение  $x_0 = 4,8$ , то есть  $x_0$  больше чем  $b/3$ , а, значит, произойдет разрушение входной кромки. Таким образом, показано, что выбранная схема является пригодной для проведения испытаний.

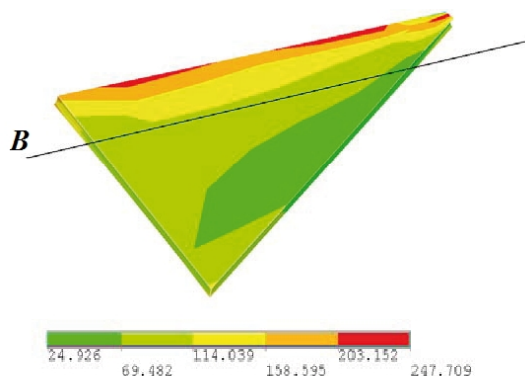


Рис. 10. НДС сечения входной кромки,  $t = 60$  с

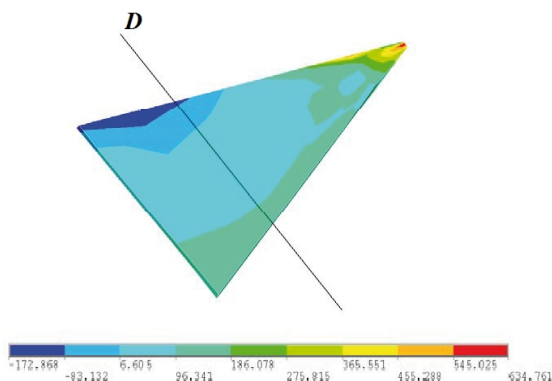


Рис.11. НДС сечения входной кромки после обрыва выходной кромки

На рис. 12 показан корпус с рабочим колесом вентилятора перед испытаниями и после испытаний с обрывом лопатки (рис. 1) на рис. 13. Испытания корпуса на непробиваемость прошли успешно.



Рис. 12. Перед испытаниями



Рис. 13. После испытаний

Проведены исследования поверхностей обрыва лопатки в средней части (рис. 14) и на кромках после испытаний. При этом в средней части разрушенной лопатки (рис.14) наблюдаются поверхности обрыва, направленные под 45 градусов, что подтверждает влияние касательных напряжений, полученных в расчете, на процесс и условия обрыва лопатки.



Рис. 14. Поверхность обрыва в среднем сечении разрушенной лопатки

### Заключение

Разработана методика расчета прочности рабочих лопаток авиационных ГТД с учетом условий обрыва по разным сечениям была использована при проведении испытаний корпуса на непробиваемость на разгонном стенде.

Приведены результаты расчетного моделирования напряженно-деформированного состояния лопатки по разным ослабленным сечениям в двух случаях: корневому сечению и сечению по верхней части замка с использованием метода конечных элементов. Получены формулы расчета запасов прочности лопатки с учетом геометрии разных сечений лопатки и касательных напряжений. Рассмотрено влияние нагрева на снижение запаса прочности и других параметров разных сечений ослабленной лопатки. Исследования поверхностей обрыва лопатки после испытаний подтверждают влияние касательных напряжений.

Разработанная методика расчета НДС и прочности лопатки (по разным ослабленным сечениям) является эффективной и ее можно использовать с целью обрыва лопатки при испытаниях корпусов авиационных двигателей и энергетических установок на непробиваемость.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00332).

### Литература

1. BR715 clears last certification hurdle before 717 flight [Text] / Flight, 15-21/VII. – 1998. – V. 154, 4634. – P. 12.
2. Mohamed N.A. A design methodology for fan blade-off based on structural failure [Text] / N.A. Mohamed, M. Tim // Conference ISABE, Canada, 2009. –P. 6.
3. Пат. 2301979 Российская Федерация, МПК 601M7/08. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, Б.А. Балувев, А.В. Першин; Заявитель и патентообладатель ЦИАМ. - № 20065103289/28; заявл. 07.02.2006; опубл. 27.06.2007, бюл. № 18.

4. Пат. 2371692 Российская Федерация, МПК 601М7/08. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, Ю.А. Ножницкий; Заявитель и патенто-обладатель ЦИАМ. - №2008105185/28.; заявл. 14.02.2008; опубл. 27.10.2009, бюл. № 30.

5. Биргер И.А. Сопротивление материалов:

Учебное пособие [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. – 560 с.

6. Ильюшин А.А. Пластичность [Текст] / А.А. Ильюшин. – М.: Наука, 1948. – 256 с.

7. Победря Б.Е. Основы механики сплошной среды [Текст] / Б.Е. Победря, Д.В. Георгиевский. – М.: Физматгиз, 2006. – 322 с.

Поступила в редакцию 15.06.2014

**A.R. Lepeshkin, P.A. Vaganov. Method for calculation of stress-deformation state and strength of GTE aviation working blades in view of in view of conditions of breakage on the different sections at the containment casing tests**

*A method for calculating of the stress-deformation state and strength of the GTE working blades in view of conditions of breakage on the different weakened sections at the containment casings tests. The method of blade breakage consists in the redistribution of stresses in a given section of the blade at the additional thermal loading and in maintenance of the destruction of the blade at the given section at the set frequency of rotation. The results of simulation calculation of the stress-strain state of the blade on the different weakened sections in 2 cases: root section and section on the on top of a castle using the finite element method are presented. The influence of heating to reduce the safety factor and other parameters of a different sections of a weakened blade is considered. The proposed method has been used in tests on the spin rig. The developed method for calculating of the stress-strain state and strength of blade (on the different weakened sections) is effective and can be used for blade breakage at the containment casings tests of aircraft engines and power installations.*

**Key words:** blade, casing, test, method, breakage, calculation, strength, sections, spin rig