

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН, П.А. ВАГАНОВ, Н.Г. БЫЧКОВ, Б.А. БАЛУЕВ

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия***МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ ЛОПАТКИ ГТД С УЧЕТОМ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОРПУСА НА НЕПРОБИВАЕМОСТЬ**

Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности рабочей лопатки с учетом касательных напряжений с целью ее обрыва. 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 с учетом ее ослабленного сечения с использованием метода конечных элементов. Рассмотрено влияние касательных напряжений на снижение запаса прочности и других параметров ослабленной лопатки при нагреве. Предложенная методика была использована при проведении испытаний на разгонном стенде. Разработанная методика расчёта на прочность лопатки с ослабленным сечением является эффективной и ее можно использовать для проектирования (выбора схемы подрезки) любой другой аналогичной рабочей лопатки с целью ее обрыва при испытаниях корпусов авиационных двигателей и энергетических установок на непробиваемость.

Ключевые слова: лопатка, корпус, испытание, методика, обрыв, расчет, прочность, касательные напряжения, разгонный стенд.

Введение

Нормы лётной 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 произведён 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 распространённый 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 полёта 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 произошёл, 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.

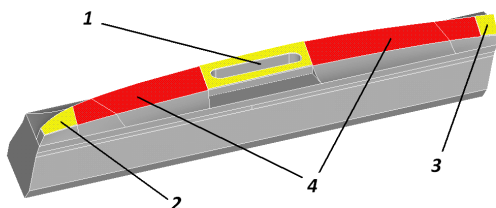


Рис. 1. Ослабленное сечение лопатки вентилятора

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

Для определения температурного поля, созданного нагревателем, используются уравнение теплопроводности

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

где p – удельная мощность нагревателя.

Моделирование производилось в программном комплексе ANSYS. Результат теплового расчёта 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).

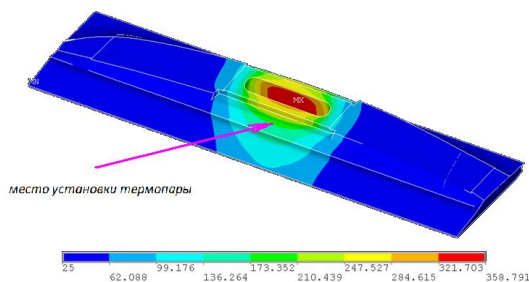


Рис. 2. Распределение температуры в области нагревателя

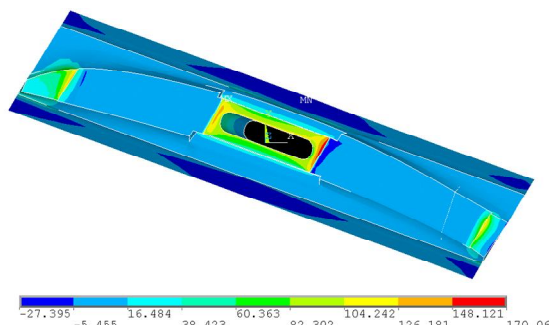


Рис. 3. Распределение напряжений в ослабленном сечении лопатки

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 .

$$P = 2\sigma_T x_0 a, \quad (2)$$

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

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

$$n = \frac{P}{P_{кр}}, \quad (5)$$

$$n' = \frac{P}{P'_{кр}}. \quad (6)$$

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

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

2. Анализ полученных результатов

На основе проведенного расчёта 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 τ (кгс/мм²) и предел текучести σ_T (кгс/мм²), растягивающее критическое усилие

$P_{кр}$ (кГ), запас прочности n' с учетом касательных напряжений, момент времени t (с) и температура T (°C).

Указанные результаты прочностного расчёта по входной кромке сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Результаты прочностного расчёта

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	τ	σ_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 °

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

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

$$y_{C1}S_1 + y_{C2}S_2 = \frac{ab^2}{4} . \quad (9)$$

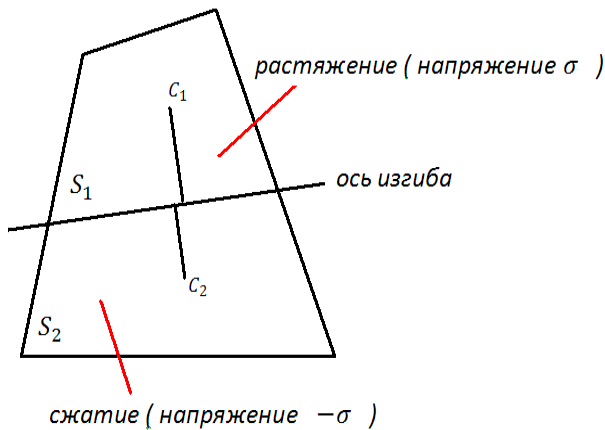


Рис. 4. Криволинейное сечение

Полученные результаты согласуются с экспериментом. При испытаниях корпуса на непробиваемость обрыв лопатки на разгонном стенде произо-

шел в момент времени 16 с при температуре термопары (рис. 2) 200 °С.

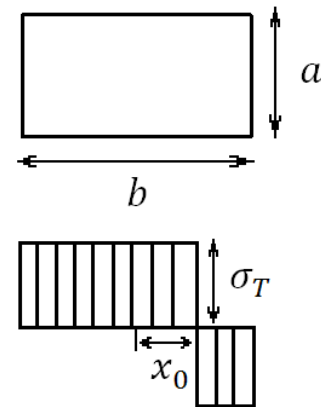


Рис. 5. Прямолинейное сечение

Теоретическое время разрушения составляет 20 с (табл. 1, 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 расчёт, 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.

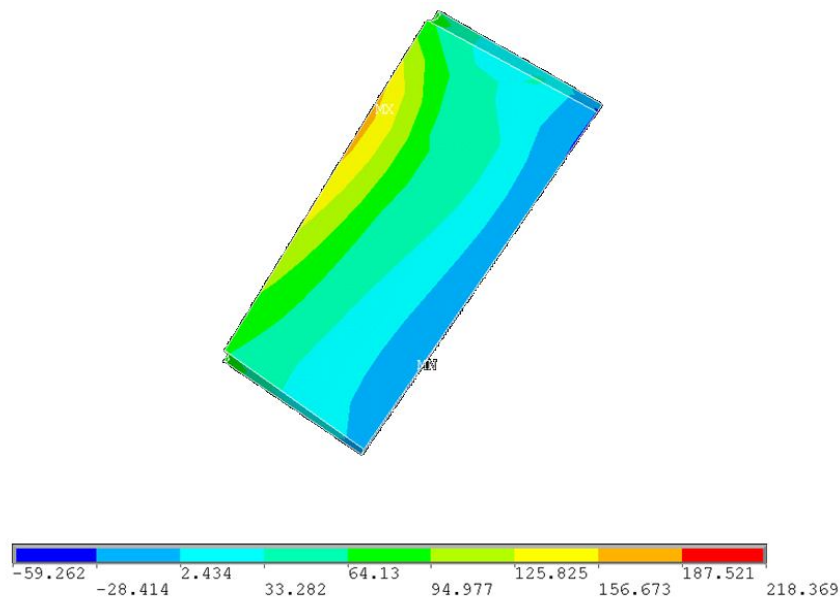


Рис. 6. Сечение входной кромки

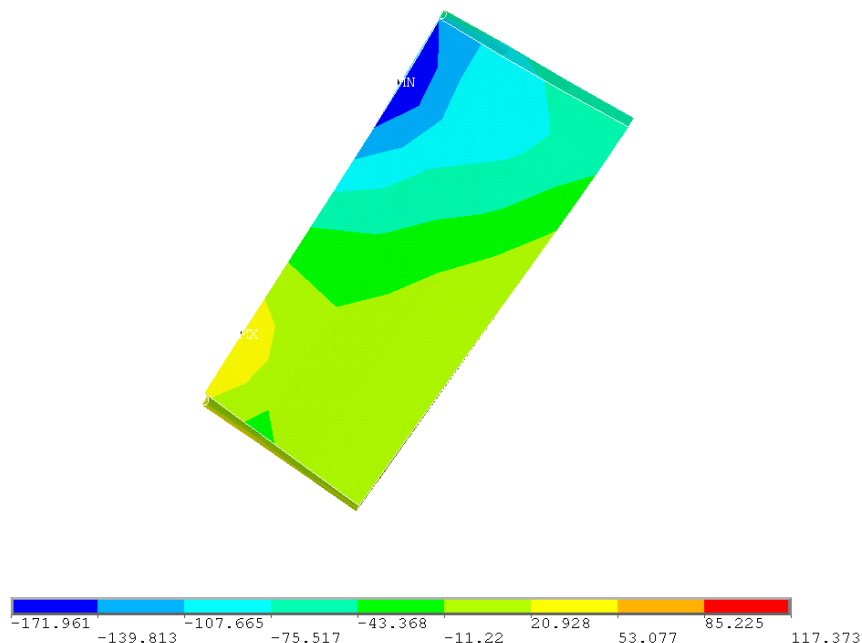


Рис. 7. Сечение выходной кромки

Заключение

Предложенная методика расчета НДС и прочности лопатки авиационного ГТД с учетом касательных напряжений была использована при проведении испытаний корпуса на непробиваемость на разгонном стенде.

Таким образом, разработанная методика расчёта на прочность лопатки с ослабленным сечением является эффективной и ее можно использовать для проектирования (выбора схемы подрезки) любой другой аналогичной рабочей лопатки с целью ее обрыва при испытаниях корпусов авиационных газотурбинных 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. Mo-

hamed, 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. Балугев, 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 601M7/08. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков, Ю.А. Ножницкий; Заявитель и патентообладатель 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 1.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., начальник отдела А.Н. Петухов, ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ І МІЦНОСТІ ЛОПАТКИ ГТД З УРАХУВАННЯМ ДОТИЧНОЇ НАПРУГИ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ КОРПУСУ НА НЕПРОБІВАЄМОСТЬ

О.Р. Лепешкин, П.О. Ваганов, М.Г. Бичков, Б.О. Балусев

Розроблена методика розрахунку напружено-деформованого стану і міцності робочої лопатки з урахуванням дотичної напруги з метою її обриву. Методика обриву лопатки полягає в перерозподілі напруги в заданому перетині лопатки при додатковому її термічному вантаженні і в забезпеченні руйнування лопатки по вказаному її перетину на заданій частоті обертання. Приведені результати розрахункового моделювання напружено-деформованого стану лопатки з урахуванням її ослабленого перетину з використанням методу кінцевих елементів. Розглянутий вплив дотичної напруги на зниження запасу міцності і інших параметрів ослабленої лопатки при нагріві. Запропонована методика була використана при проведенні випробувань на розгінному стенді. Розроблена методика розрахунку на міцність лопатки з ослабленим перетином є ефективною і її можна використовувати для проектування (вибору схеми підрізування) будь-якої іншої аналогічної робочої лопатки з метою її обриву при випробуваннях корпусів авіаційних двигунів і енергетичних установок на непробиваємість.

Ключові слова: лопатка, корпус, випробування, методика, обрив, розрахунок, міцність, дотична напруга, розгінний стенд.

METHOD FOR CALCULATION OF SSS AND STRENGTH OF GTE BLADE IN VIEW OF TANGENT STRESSES AT THE CONTAINMENT CASING TESTS

A.R. Lepeshkin, P.A. Vaganov, N.G. Bychkov, B.A. Baluev

A method for calculating of the stress-strain state (SSS) and strength of the working blade in view of shear stresses to releasing it. 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 in view of the weakened section using the finite element method are presented. The influence of shear stress to reduce the safety factor and other parameters of a weakened section of blade at the heating is considered. The proposed method has been used in tests on the spin rig. The developed method for calculating the strength of blade with a weakened section is effective and can be used for design (choice of cutting scheme) any other similar working blade to its breakage at the containment casings tests of aircraft engines and power installations.

Key words: blade, casing, test, method, breakage, calculation, strength, tangent stresses, spin rig.

Лепешкин Александр Роальдович – д-р техн. наук, проф., нач. сектора ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия, e-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru.

Ваганов Петр Алексеевич – инженер ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия, e-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru.

Бычков Николай Григорьевич – канд. техн. наук, нач. сектора ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия, e-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru.

Балуев Борис Александрович – канд. техн. наук, нач. отдела ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”, Москва, Россия, e-mail: lepeshkin@rtc.ciam.ru.