

УДК 621.452.322

РАЗРАБОТКА МОДИФИКАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ДИСКА СТАРТЁРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ФРАГМЕНТОВ РОТОРА ПРИ РАЗРУШЕНИИ

© 2015 К. Д. Каримбаев, Д. В. Сапронов

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

В соответствии с сертификационными требованиями необходимо обеспечить локализацию в корпусе фрагментов разрушившегося ротора стартёра ГТД. Корпус стартёра должен выдерживать фрагмент с максимальной кинетической энергией. Доказано, что фрагментом с максимальной кинетической энергией в осесимметричных роторах является 1/3 часть. Для роторов с центральными отверстиями возможно обеспечить разрушение с образованием такого фрагмента при соответствующей подрезке. Для дисков без центральных отверстий, выполненных за одно целое с валом, обеспечить образование такого фрагмента при испытании не удаётся. Есть предположение, что такой вид разрушения невозможен. Возникает задача об определении наиболее энергоёмкого фрагмента при возможном разрушении и выборе способа проведения сертификационных испытаний. Для дисков без центральных отверстий в работе предложен метод, позволяющий облегчить решение задачи локализации фрагментов. Данный метод основан на введении «слабого звена» в подободной части диска ротора – локального утонения в подободной части. Для определения наиболее энергоёмкого фрагмента ротора выделены три наиболее опасных случая: разрушение по «слабому звену», разрушение по произвольному радиусу и разрушение в случае нерассоединения стартёра с двигателем. При использовании предложенной конструкции ротора стартёра облегчается также проведение сертификационных испытаний.

Газотурбинный двигатель, стартёр, локализация фрагментов, сертификация.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-60-64

Введение

В данной работе речь идёт о конструктивных особенностях воздушно-турбинных стартёров (ВТС) газотурбинных двигателей (ГТД) [1].

При проектировании ВТС необходимо обеспечивать высокую надёжность и безопасность эксплуатации в течение всего жизненного цикла. Одно из важных условий – обеспечение локализации фрагментов ротора турбины ВТС в случае его разрушения от возможной раскрутки. Должно выполняться одно из требований «Авиационных правил» АП-33 [2]: 1) разрушение ротора не приведёт к образованию нелокализованных фрагментов с высокой энергией; 2) установлен приемлемый уровень прочности конструкции; или 3) приемлемая для Компетентного органа комбинация 1) и 2).

В случае прохождения сертификации по второму пути ротор турбины стартёра относят к основным деталям. Статическая прочность, циклическая долговеч-

ность и несущая способность диска должны быть достаточными для обеспечения требований по ресурсу и прохождения сертификационных испытаний. Недостатками данного пути являются высокая трудоёмкость и затратность.

В случае прохождения сертификации по третьему пути бронезащита должна проектироваться на удержание фрагмента обода с максимально возможной кинетической энергией, который образуется в результате разрушения. Главная сложность – обеспечение разрушения с фрагментом, который имеет максимально возможную кинетическую энергию во время эксперимента. Дело в том, что диски без центрального отверстия не удаётся подрезать так, чтобы оторвалась ровно треть диска с учётом массивной центральной зоны.

Целью работы являлась выработка предложений по модификации конструкции стартёра, которые позволят обеспечить вышеуказанные требования.

Разработка модификации конструкции

В конструкцию ротора турбины стартера предлагается ввести «слабое звено» (рис. 1) – локальное утонение диска в подобной части (h_0 – в исходной конструкции, h_1 – в модифицированной). Это позволит производить разрыв обода с лопатками при выбираемой угловой скорости вращения ω_{p1} (исходя из требований длительной прочности и малоцикловой усталости в области утонения).

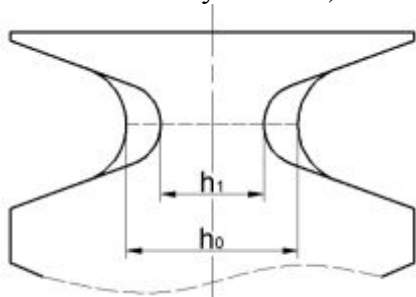


Рис. 1. Модификация конструкции диска

Толщину полотна в зоне локального утонения h_1 предполагается выбирать из условия обеспечения разрушения диска по теории предельного равновесия [3] при достижении выбранной угловой скорости вращения ω_{p1} (рис. 2, запас по цилиндрическому сечению $k_{B2} < 1$).

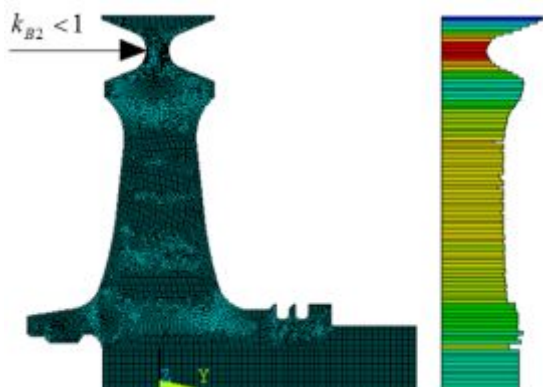


Рис. 2. Разрушение перемычки диска по k_{B2}

Выбор механизма фрагментации ротора для проведения испытаний

Кинетическая энергия фрагментов разрушившегося диска определяется по формуле:

$$E = \frac{m_i \cdot v_i^2}{2} = \frac{\rho \cdot V \cdot \omega^2 \cdot r_{ЦТi}^2}{2}, \quad (1)$$

где m_i – масса фрагмента, кг; V_i – объём фрагмента, м³; v_i – скорость фрагмента, м/с; ρ – плотность материала, кг/м³; ω – угловая скорость вращения, рад/с; $r_{ЦТi}$ – радиус центра тяжести фрагмента, м.

Для выбора наиболее энергоёмкого фрагмента с кинетической энергией E_2 в полученной конструкции рассмотрены три варианта.

1 случай. Рассматривается фрагмент диска, который будет действовать на защитный корпус при разрушении "слабого звена" при угловой скорости вращения ω_{p1} . Этот фрагмент с E_{max1} соответствует третьей части облопаченного диска, которая находится выше радиуса слабого звена (рис. 3).

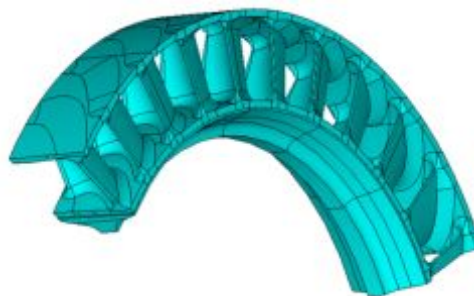


Рис. 3. Первый случай

2 случай. Этот маловероятный случай соответствует ситуации, в которой в диске пропущен такой дефект, который приводит к разрушению фрагмента диска с максимальной кинетической энергией до разрушения слабого звена. Здесь рассматривается треть часть диска, которая выше экстремального радиуса r_i , на котором происходит разрушение (рис. 4). Кинетическая энергия этого фрагмента также будет обуславливаться угловой скоростью вращения разрушения слабого звена ω_{p1} . Для определения наиболее энергоёмкого фрагмента E_{max2} строится зависимость кинетической энергии фрагмента от радиуса r_i , по которому происходит разрушение (рис. 5).

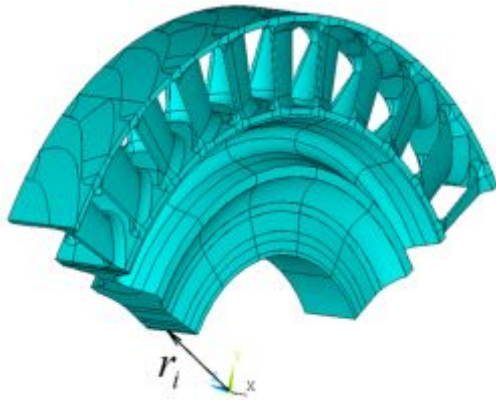


Рис. 4. Второй случай

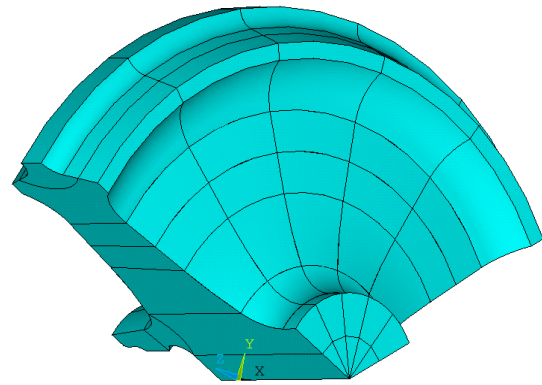


Рис. 6. Третий случай

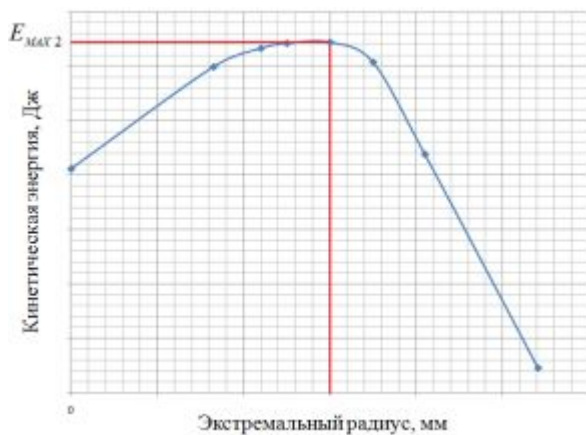


Рис. 5. Определение максимального значения кинетической энергии во втором случае

3 случай. Нерассоединение стартера с двигателем. Если ротор стартера по каким-либо причинам не отсоединяется от ротора двигателя, то при максимальной угловой скорости вращения ротора основного двигателя, с учётом коэффициента передачи, ротор стартера достигнет максимальной угловой скорости вращения $\omega_{кр}$. При этом вначале при угловой скорости вращения $\omega_{р1}$ произойдёт разрушение слабого звена по цилиндрическому сечению в зоне локального утонения. А при $\omega_{кр} > \omega_{р1}$ третья часть оставшейся части диска (рис. 6) достигнет максимального значения кинетической энергии $E_{max 3}$.

После рассмотрения всех трёх опасных случаев выбирается фрагмент, обладающий максимально возможным значением кинетической энергии $E_{max} = \max \{E_{max 1}, E_{max 2}, E_{max 3}\}$. Бронезащита должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить локализацию фрагмента с выбранным E_{max} .

Сертификационные испытания

Сертификационные испытания по обеспечению локализации проводят при угловой скорости вращения, соответствующей раскрутке стартера, и кроме того проверяют осевую локализацию. Для модифицированной конструкции ротора угловая скорость раскрутки ограничивается угловой скоростью, при которой происходит разрушение по "слабому звену". Чтобы подтвердить обеспечение в корпусе локализации фрагмента с определённой выше максимальной возможной энергией E_{max} , в работе предлагается использовать дополнительно модифицированную конструкцию. Для фрагмента, равного третьей части облопаченного диска, которая находится выше радиуса слабого звена, с использованием формулы (1) получено соотношение (2), из которого определяется необходимая для испытания угловая скорость вращения:

$$\omega_{септ} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{max}}{\rho \cdot V \cdot r_{цт}^2}} \tag{2}$$

Толщину полотна в зоне локального утонения $h_{сеп1}$ предполагается выбирать

из условия обеспечения разрушения при достижении угловой скорости вращения $\omega_{\text{серт}}$. Для гарантированного разрушения возможно дополнительно использовать нагрев конструкции. Следует отметить, что при проектировании рационально выбирать радиус, на котором находится «слабое звено», таким образом, чтобы первый и второй случаи совпадали.

Для получения фрагмента именно третьей части перед испытанием необходимо выполнить три надреза диска по ра-

диальным направлениям через 120° , как это делается без особых проблем в дисках с центральными отверстиями.

Выводы

Предложен способ, позволяющий облегчить решение задачи обеспечения локализации фрагментов ротора турбины ВТС в случае его разрушения от возможной раскрутки, в соответствии с сертификационными требованиями.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиа-двигатель, 2006. 389 с.

2. Авиационные правила. Ч. 33. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов. М.: ОАО «Авиаиздат», 2004. 44 с.

3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

Информация об авторах

Каримбаев Камалиддин Джамолдинович, кандидат технических наук, начальник сектора отделения «динамика и прочность». Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: kem@ciam.ru. Область научных интересов: прочностная надёжность турбомашин.

Сапронов Дмитрий Владимирович, инженер отделения «динамика и прочность». Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: sapronov.dmitry@gmail.com. Область научных интересов: прочностная надёжность турбомашин.

MODIFICATION OF THE STARTER TURBINE DISK FOR BLADE CONTAINMENT CERTIFICATION TESTS

© 2015 K. D. Karimbaev, D. V. Sapronov

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The paper is related to gas turbine engine starter-generator blade containment tests. The starter turbine case is expected to contain a fragment resulting from rotor fracture with the maximal level of kinetic energy. It has been proved that one third of a rotor is a fragment with the maximal level of kinetic energy. It is possible to provide this type of fracture for rotors with central holes by special trimming. However, if the disc and the shaft are a one-piece structure formation of such a fragment seems to be a problem. This type of fracture is assumed to be impossible. The aim of this work is to specify the most energy-consuming fragment in the case of possible fracture and choose a way of conducting certification tests. The method presented in the paper is based on introducing a “weak link” –local thinning- in the area under the rim. It allows separating the rim and the blades with an admissible level of kinetic energy. Some proposals for certification tests are presented.

Gas turbine engine, starter, containment, certification.

References

1. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm: Aviadvigatel Publ., 2006. 389 p.
2. Aviation rules. Part 33. Airworthiness requirements for aircraft engines. Moscow: Aviaizdat Publ., 2004. 44 p. (In Russ.)
3. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength analysis of machine parts]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1993. 640 p.

About the Authors

Karimbaev Kamaliddin Djamoldinovich, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, the Department of Dynamics and Strength, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: kem@ciam.ru. Area of Research: reliability of turbomachinery.

Sapronov Dmitry Vladimirovich, engineer, the Department of Dynamics and Strength, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: sapronov.dmitry@gmail.com. Area of Research: reliability of turbomachinery.