

УДК 539.4

А.Р. ЛЕПЕШКИН, Н.Г. БЫЧКОВ

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия***МЕТОД ТЕРМОУПРАВЛЯЕМОГО ОБРЫВА ЛОПАТОК РАБОЧИХ КОЛЕС ГТД ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОНСТРУКЦИЙ И КОРПУСОВ НА НЕПРОБИВАЕМОСТЬ**

Разработан метод термоуправляемого обрыва лопаток рабочих колес ГТД для обеспечения испытаний конструкций и корпусов на непробиваемость. Приводится обзор и анализ существующих способов обрыва лопаток. Запатентованный метод обрыва был апробирован при испытаниях на разгонном стенде и может быть реализован при испытаниях на стендах и на двигателе.

**метод термоуправляемого обрыва, лопатки, рабочие колеса, испытания, корпуса, непробиваемость, разгонный стенд, двигатель, центробежная сила, ослабленное сечение, частота вращения, расчет, компьютерное моделирование**

**Введение**

**Постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** При проектировании газотурбинных двигателей (ГТД), установок (ГТУ) и других энергетических машин большое внимание обращается на локализацию обрыва лопаток внутри корпуса.

Одной из наиболее опасных аварийных ситуаций, которые могут привести к катастрофическим последствиям, является обрыв лопаток роторов авиационных ГТД. Поэтому важное значение в обеспечении надежности газотурбинных двигателей имеет локализация дефектов в пределах корпуса. В случае недостаточной прочности корпуса двигателя, оторвавшаяся лопатка может повредить самолет и вызвать катастрофу. Известны также факты попадания раскаленных оборвавшихся лопаток турбин в багажное отделение с последующим пожаром. По нормативным документам двигателя с недостаточной прочностью корпуса к эксплуатации не допускаются.

В [1] было проведено компьютерное моделирование соударения оборвавшейся лопатки с корпусом и его пробиваемости с помощью программного комплекса LS-DYNA/ANSYS.

Расчетами на непробиваемость [1 – 3] трудно предусмотреть все опасные состояния положения оборвавшейся лопатки или детали в момент удара о корпус и ее взаимодействие в этот момент с вращающимся ротором. Поскольку предварительное развитие трещины в лопатке наиболее вероятно несимметрично, то обрыв может сопровождаться разворотом лопатки от внецентренного приложения центробежной силы к оставшейся площади лопатки. Лопатка наиболее вероятно развернется и ударит в корпус углом, а не площадью торца, как это принято в расчетах.

Практика показала, что более надежное заключение по непробиваемости целесообразно получить путем проведения испытаний по разработанным в ЦИАМ методам [4 – 6].

Поэтому важнейшими испытаниями по проверке живучести двигателя является оценка удержания оборвавшейся рабочей лопатки внутри корпуса двигателя.

**Обзор публикаций и выделение нерешенных задач.** Проведение испытаний корпуса на непробиваемость имеет ряд технических сложностей. Рабочую лопатку необходимо оборвать на заданных оборотах в сечении с минимальным запасом прочности. Лопатка находится на быстро вращающемся роторе

внутри корпуса, что затрудняет доступ к ней. Испытания корпуса на непробиваемость проводят, как правило, в разгонных камерах, так как нелокализованный обрыв лопаток ведет к разлету обломков на большое расстояние.

Для максимального приближения условий испытаний к реальным условиям работы двигателя их проводят на отдельно собранной ступени со всеми деталями статора, участвующими в локализации фрагментов разрушившейся детали. Отделение лопатки осуществляют на максимально возможной в эксплуатации частоте вращения ротора. Обеспечивают подготовку обрыва лопатки в верхнем сечении замкового соединения (максимально возможная при обрыве кинетическая энергия) в наиболее опасном сечении, определяемом Заказчиком или нормативными документами.

Известен способ испытаний корпуса на непробиваемость, заключающийся в подрыве корневого сечения лопатки с помощью взрыва [7].

Данный способ имеет ряд существенных недостатков. Главным недостатком является то, что при подрыве лопатки с помощью взрыва сообщается дополнительная энергия, которой не обладает лопатка, оборвавшаяся при обычном разрушении. Ударная волна, образовавшаяся при данном разрушении, нарушает ориентацию лопатки, ее траектория становится неопределенной и лопатка попадает в корпус в несоответствующем реальным условиям положении. Это существенно снижает достоверность результатов испытаний. Кроме того, во время взрыва может произойти разрушение лопатки на отдельные фрагменты, энергия удара которых о корпус будет существенно ниже, чем у целой лопатки. В [7] отмечается, что при взрывном подрыве корневого сечения лопатки образуются осколки. Вследствие этого, лопатка с меньшей оставшейся массой взаимодействует с корпусом. В этом случае испытания не могут рассматриваться как кондиционные. Также имеются трудности в организации

испытаний. Подготовка испытаний требует особых организационных мер и мер безопасности, учитывающих использование взрывчатых веществ, а также наличия специально подготовленного персонала.

Для обрыва лопаток на рабочих оборотах используют подрезку сечения в месте, где должен происходить обрыв. Однако ослабить сечение настолько, чтобы лопатка оборвалась именно при заданной частоте вращения ротора, затруднительно из-за сложной геометрии лопаток и разброса прочностных свойств материала. В связи с этим подрезку сечения проводят в несколько этапов, последовательно приближаясь к заданной частоте вращения ротора, либо превышают заданную частоту, и затем производят перерасчет результатов. Тот и другой способы не являются оптимальными, поскольку в первом случае трудоемкость испытаний возрастает в несколько раз, а именно, требуется многократная переборка и балансировка ротора, а во втором случае результаты испытаний не вполне достоверны.

Известен способ испытаний корпуса на непробиваемость, при котором после выхода ротора на заданную частоту вращения рекомендуют производить подрезку пера в заданном сечении с помощью электродов [8], размещенных в зоне пера лопатки.

Недостатком этого технического решения является сложность организации поджига электродов и поддержания устойчивого горения электрической дуги в зоне вращающейся лопатки, ее ненадежность, вследствие выгорания электродов. Требуется также обеспечить подвод большого тока к электродам. Кроме того, обрыв лопатки должен быть осуществлен на некотором расстоянии от корневого сечения с учетом специфики горения электрической дуги, что обуславливает низкую точность надреза по заданному сечению. В результате лопатка отрывается с неполной массой и точность оценки корпуса на непробиваемость снижается.

Также можно произвести обрыв лопатки по ослабленному сечению аэродинамической нагрузкой.

Этот метод [5] заключается в следующем. После установки ротора с ослабленной лопаткой на стенде включают вакуумный насос, а в разгонной камере понижают давление воздуха до минимального значения. Облопаченный ротор с подготовленной лопаткой разгоняют на заданную максимальную частоту вращения. Снижают вакуум в камере. Давление воздуха на лопатке при вращении ротора резко увеличивается, возрастает  $M_{из.}$  и  $M_{кр.}$ . В результате лопатка не выдерживает дополнительного нагружения и обрывается по ослабленному сечению. Для подготовки к испытаниям по данной методике требуются расчеты для получения критической величины давления на ослабленную лопатку и необходимой величины мощности электропривода. Достоинствами этой методики являются относительная простота и дешевизна.

Учитывая недостатки существующих способов, требуется разработка метода управляемого обрыва лопаток.

**Цель исследований.** Целью данных исследований являлась разработка метода термоуправляемого обрыва лопаток рабочих колес ГТД под действием центробежных сил без использования взрыва для обеспечения испытаний конструкций и корпусов на непробиваемость и апробация разработанного метода при испытаниях рабочего колеса ГТД на разгонном стенде.

## Методика и результаты исследований

В настоящей работе исследовалась возможность обрыва лопаток от действия центробежных сил без взрыва с управлением дополнительным нагружением опасного сечения лопатки на заданных для обрыва оборотах " $n_p$ " с помощью термочувствительных элементов. На первом этапе верификация предложенной методологии производилась испытаниями моделей лопаток, а затем натуральных лопаток на установке с термомеханическим нагружением [9]. На

втором этапе проводились испытания рабочего колеса ГТД с обрывом лопаток на разгонном стенде [10 – 14].

По разработанному методу управляемого обрыва [4, 6] контрольное сечение подрезалось до запаса прочности на " $n_p$ ", равного примерно  $0,8 \div 0,9$ , после чего усиливалось накладками из термочувствительного материала с повышением запаса прочности до величины  $1,3 \div 1,4$ . После достижения максимальной центробежной нагрузки производился нагрев лопатки до допустимой температуры. Накладки, усиливающие контрольное ослабленное сечение лопатки, изготавливались из материала с большим коэффициентом линейного расширения, чем у материала лопатки. С нагревом накладки сбрасывают с себя нагрузку, догружая при этом лопатку. Запас прочности в опасном сечении лопатки понижается до  $0,9$  и происходит ее разрушение.

Рассмотрим последовательность подготовки лопатки к реализации управляемого обрыва. Заданное сечение пера лопатки ослабляют поперечной подрезкой. Кроме того, в ослабленном сечении осуществляют надрезы тонкой проволокой  $\varnothing 0,15 - 0,25$  мм для обеспечения минимального удлинения ослабленного сечения лопатки при разрушении. Удлинение лопатки в момент разрушения не должно превышать зазора между лопаткой и корпусом на заданных оборотах [6].

Для полной имитации удара лопатки о корпус необходимо, чтобы вес обрывающейся части доработанной лопатки соответствовал бы весу обрывающейся реальной лопатки.

Впервые были проведены на разгонном стенде ЦИАМ испытания рабочего колеса турбины ГТД с управляемым обрывом лопаток по предложенному методу. Ниже приведены результаты испытаний.

Подшипниковая опора с испытываемым рабочим колесом с лопатками и устройством обрыва была установлена в испытательной (вакуумной) камере разгонного стенда и соединена через специальную

проставку с демпферной опорой. Крепежные рамы с индуктором для высокочастотного нагрева были закреплены на корпусе подшипниковой опоры. Зазор между индуктором и рабочим колесом составил 7 мм.

По результатам конечно-элементного расчета с использованием системы ANSYS с определением параметров ослабленного сечения лопатки и минимального сечения накладок на рис. 1 построены зависимости центробежной нагрузки  $C(n)$  лопатки и запасов прочности  $K(n)$  (накладок и др.) при температурах 20, 190, 250°C материала накладок в зависимости от частоты вращения. Заданная для разрушения частота вращения составляла 8200 об/мин. При этом центробежная сила в опасном сечении лопатки (запас прочности 0,9) достигала 4200 кГ. В данном примере материал турбинной лопатки – ЭИ929. Накладки были изготовлены из алюминиевого сплава Д16Т. В проектировании испытательной оснастки принимал участие Андреев В.В.

На рис. 2 показана фотография рабочего колеса II ступени турбины ГТД с двумя штатными и двумя доработанными для управляемого обрыва лопатками (диаметрально расположенными) перед испытаниями.

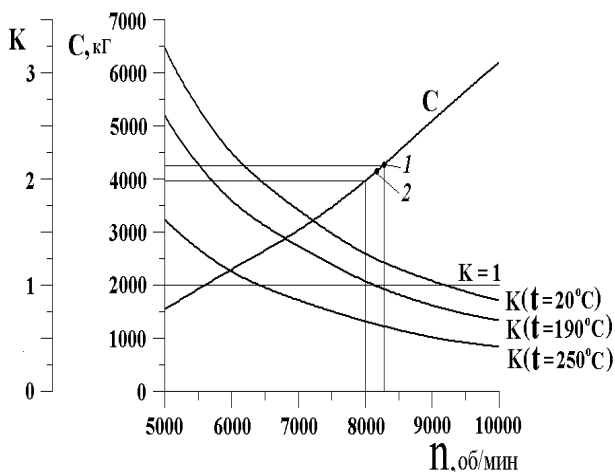


Рис. 1. Зависимости центробежной нагрузки  $C(n)$  лопатки и запасов прочности  $K(n)$  лопатки с элементами устройства обрыва (накладки и др.) при температурах 20, 190, 250°C



Рис. 2. Рабочее колесо ГТД с двумя ослабленными лопатками и элементами устройства обрыва и двумя штатными лопатками перед испытаниями

Программа испытаний с использованием разработанного метода [4, 6] обрыва лопаток была составлена с учетом результатов расчета и данных рис. 1.

Программой испытаний предусматривались следующие этапы: увеличение частоты вращения, площадка 7000 об/мин – включение системы индукционного нагрева, увеличение частоты вращения до 8000±8500 об/мин.

В процессе увеличения частоты вращения и на указанных выше площадках регистрировались (Цыкуновым Н.В.) на компьютерной системе измерений частота вращения, температура ободной части диска, сигнал от тензодатчика, установленного на выходной кромке (перегородке) в ослабленном сечении лопатки, вибрации опоры изделия, сигнал от сигнализатора обрыва. Кроме того, температуры диска и лопаток, а также другие измеряемые параметры регистрировались на стендовых системах измерений.

На площадке 7000 об/мин с помощью индуктора производился нагрев ободной части диска до 300 °C (со стороны индуктора), при этом в корневой части

лопатки температура достигала 210 °С. Далее при увеличении оборотов ротора в соответствии с программой испытаний произошел обрыв лопаток на частоте вращения 8300 об/мин. В момент обрыва средняя температура накладок составляла 190 °С. На рис. 1 расчетные данные по запасу прочности  $K$  ( $t_{cp} = 190^\circ\text{C}$ ) с учетом разброса свойств материала накладок и лопаток подтверждены близким значением частоты вращения, на которой произошел обрыв.

На рис. 1 показан диапазон управления обрывом лопаток и возможности указанного метода обрыва при температурах накладок от 20 до 250 °С. Сравнение экспериментальных данных (т. 1 на рис. 1) на разгонном стенде и (т. 2 на рис. 1) на установке с осевым нагружением показывает совпадение результатов испытаний по обрыву лопаток при воспроизведении центробежной нагрузки 4200 кГ и температуры 190 °С.

На рис. 3 приведена фотография рабочего колеса после испытаний с обрывом двух ослабленных лопаток. На двух штатных лопатках наблюдались забоины от оборванных лопаток, как видно на фотографии рис. 3. Кроме того, на рис. 3 показаны оставшиеся части накладок и хвостовик одной из оборванных лопаток, а также испытательная оснастка с индуктором.



Рис. 3. Рабочее колесо ГТД с двумя штатными лопатками после обрыва двух ослабленных лопаток

В целом первые испытания с управляемым обрывом лопаток рабочего колеса ГТД прошли успешно. Две ослабленные лопатки оборвались практически одновременно на одной частоте вращения, поэтому уровень вибраций составлял небольшую величину и не превысил 6g. Это подтверждает надежность разработанного метода обрыва и позволило сохранить подшипниковую опору изделия и другое испытательное оборудование стенда от разрушения при испытаниях.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Разработан метод термоуправляемого обрыва лопаток ГТД. Метод апробирован при испытаниях рабочего колеса ГТД на разгонном стенде. Сравнение полученных экспериментальных данных на разгонном стенде и на установке с термомеханическим нагружением показало идентичность условий обрыва по температуре опасного сечения лопатки и осевой нагрузке. Разработанный метод обеспечивает сертификационные требования по обрыву лопатки в наиболее опасном ее сечении (включая и замковую часть), определяемом Заказчиком или нормативными документами.

Испытания корпусов на непробиваемость на разгонном стенде позволят решить оперативно прочностные проблемы узлов и деталей газотурбинных двигателей.

Для проведения испытаний корпуса на непробиваемость необходимы разные варианты имитирования обрыва лопаток.

Предложенный метод обрыва позволяет имитировать обрыв лопатки с ее разворотом как по направлению вращения, так и против. При этом удар лопатки о корпус будет не по плоскости торца лопатки, а углом.

Разработанный метод [4, 6] обрыва лопаток можно использовать для исследований корпусов на непробиваемость при испытаниях конструкций на

стендах и при испытаниях авиационных двигателей с верификацией расчетных методик [1 – 3].

### Литература

1. Москвитин О.А., Шорр Б.Ф. Пространственное моделирование процесса пробивания корпусных элементов двигателя фрагментами оборвавшихся деталей // Тезисы докладов XXVIII международного научно-технического совещания по проблемам прочности двигателей. – М. – 2002. – С. 60 – 61.

2. Гладкий И.Л. Исследование последствий обрыва лопаток авиационных ГТД методом конечных элементов // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин. – 2003. – № 4. – С. 125 – 130.

3. Жуков В.Б., Хоменко С.И., Шереметьев А.В. Расчет корпусов на непробиваемость при разрушении дисков // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 56 – 59.

4. Пат. № 2176389 Россия. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков. – 2001. – Бюл. № 33.

5. Пат. № 2207534 Россия. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации / А.Р. Лепешкин, Н.Г. Бычков. – 2003. – Бюл. № 18.

6. Заявка № 2004116838 Россия. Способ испытания корпуса на непробиваемость и устройство для его реализации. – 2004.

7. Air et Cosmos. – 2004. – № 1944. – Р. 25.

8. Баженов В.Г., Тростенюк Ю.И., Захаров В.К. Универсальный разгонный стенд для повторно-статических испытаний крупногабаритных элементов роторов // Проблемы прочности. – 1988. – № 9. – С. 114 – 116.

9. Пат. № 2250451 Россия. Установка для испытаний лопаток турбомашин на термомеханическую

усталость / Н.Г. Бычков, А.Р. Лепешкин, А.В. Першин. – 2005. Бюл. № 11.

10. Пат. № 2235982 Россия. Способ термоциклических и разгонных испытаний дисков турбомашин / А.Р. Лепешкин, В.А. Скибин. – 2004. Бюл. № 25.

11. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Циклические испытания дисков ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т “ХАИ”. – 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 456 – 460.

12. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния дисков и рабочих колес ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева при неизотермических циклических испытаниях // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Национальный аэрокосмический ун-т “ХАИ”. – 2001. – Вып. 23. Двигатели и энергоустановки. – С. 144 – 146.

13. Лепешкин А.Р. Индукторы для нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонных стендах // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Национальный аэрокосмический ун-т “ХАИ”. – 2002. – Вып. 334. Двигатели и энергоустановки. – С. 163 – 165.

14. Лепешкин А.Р. Методика статического тензометрирования дисков ГТД на разгонных стендах с учетом неравномерного нагрева // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Национальный аэрокосмический ун-т “ХАИ”. – 2003. – Вып. 41/6. – С. 154 – 159.

*Поступила в редакцию 6.06.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.А. Ножницкий, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва.