

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.57.05

УДК 629.7:539.4

Ю.А. Ножницкий, Б.А. Балувев, Ю.А. Федина, Д.В. Шадрин

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ),
Москва, Россия

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ПРОЧНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИАМ¹

Проведен анализ основных проблем, возникающих при проведении экспериментальных исследований прочностной надежности газотурбинных двигателей. Рассмотрены основные направления развития отраслевой экспериментальной базы, созданной для проведения прочностных исследований в ЦИАМ. Указаны наиболее важные направления таких исследований, в том числе специальная квалификация и формирование электронной базы данных по конструкционной прочности перспективных материалов (металлических сплавов, различных типов композиционных материалов; материалов с градиентом характеристик; материалов, полученных аддитивными технологиями), обеспечение и подтверждение прочностной надежности при оптимизации новых конструктивно-технологических решений, исследование прочности при экстремально возможных значениях температуры, предотвращение разрушений из-за многоциклового усталости, подтверждение соответствия двигателей новым сертификационным требованиям, в том числе подтверждение безопасного ресурса критических по последствиям разрушения деталей с учетом возможных дефектов.

Особое внимание уделено модернизации разгонных стендов. Рассмотрены некоторые результаты недавно выполненных в ЦИАМ работ, обеспечивших расширение возможностей проведения на разгонных стендах разгонных, циклических, вибрационных и специальных испытаний.

В последние годы отработаны оригинальные методы и оснастка для получения требуемого теплового поля исследуемого ротора, проведения циклических испытаний при заданном законе изменения во времени условий нагружения, бесконтактного измерения перемещений и деформаций вращающихся объектов, обеспечения освещения объектов испытаний для проведения качественной высокоскоростной съемки вращающегося объекта, проведения испытаний с забросом посторонних предметов, разрушением деталей ротора на требуемой частоте вращения, для диагностики образования трещин в объекте в процессе испытаний и др. Проведен большой комплекс уникальных испытаний.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, прочностная надежность, разгонный стенд, ротор, разгонное испытание, циклическое испытание, вибрационное испытание, локализация фрагментов роторов, птицестойкость, высокоскоростная видеосъемка.

Yu.A. Nozhnitskiy, B.A. Baluev, Yu.A. Fedina, D.V. Shadrin

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

MODERNIZATION OF EXPERIMENTAL BASE FOR INVESTIGATION OF GAS TURBINE ENGINE INTEGRITY

Analysis of the main problems of experimental investigations of gas turbine engines strength reliability is carried out. The main directions of the modernization of the experimental base organized in CIAM for strength investigations are considered. The most important directions of such investigations are mentioned. These directions include special qualification and formation of an electronic data base of structural strength of new materials (metallic alloys, different types of composite materials; materials with gradient of properties; materials produced using additive technologies); provision and confirmation of strength reliability during optimization of new structural and technological solutions; integrity investigations at extremely high temperatures; prevention of fractures due to high cycle fatigue; confirmation that engines meet new certification requirements including confirmation of safe service life of engine main parts taking into account possible defects.

Special attention is paid to modernization of spin pit rigs. Original methods, hardware and software were developed for receiving necessary thermal condition of being tested rotor, for execution of tests at required cycle of loading, for contactless measurement of rotating object deformations and displacements, for object illumination required for receiving qualitative high-speed video recording, for testing with foreign object injection, for receiving rotor part fracture at required rotation speed, for on-line determination of crack in revolving detail, etc. A lot of unique tests were conducted.

Keywords: gas turbine engine, strength reliability, spin pit rig, rotor, burst test, cyclic test, vibration test, containment of rotor fragments, resistance to bird impact, high speed videorecording.

¹ По материалам доклада на научно-технической конференции «Динамика, прочность, надежность авиационных газотурбинных двигателей», посвященной 100-летию со дня рождения проф. И.А. Биргера, г. Москва, 23–25 января 2019 г.

Несмотря на интенсивное развитие расчетных методов, экспериментальные исследования прочностной надежности продолжают оставаться одной из наиболее важных и затратных работ при создании, сертификации и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1].

В ЦИАМ накоплен более чем 85-летний опыт прочностных исследований авиационных двигателей и редукторов. В 70-е гг. прошлого столетия по инициативе И.А. Биргера в институте была создана уникальная отраслевая база прочностных исследований [2, 3]. В институте осуществляется комплексный подход к решению вопросов обеспечения прочностной надежности, включающий сочетание механических испытаний с математическим моделированием и физическими исследованиями, реализацией, при необходимости, многодисциплинарного анализа. Работы по обеспечению прочностной надежности ГТД включают разработку требований к прочностной надежности двигателей, методов обеспечения и подтверждения соответствия этим требованиям. Исследования прочности проводятся на всех стадиях жизненного цикла двигателей, начиная с испытаний образцов для определения характеристик конструкционной (реализуемой в конструкции в ожидаемых условиях эксплуатации) прочности материалов и заканчивая работами по повышению надежности находящихся в эксплуатации двигателей. Испытательные лаборатории ЦИАМ аккредитованы для проведения сертификационных прочностных испытаний.

Основными задачами прочностных испытаний ГТД являются: подтверждение прочностной надежности двигателя в процессе его сертификации, валидация и верификация методов расчета, проверка прочности в трудно поддающихся расчетам условиях, оптимизация новых конструктивно-технологических решений, формирование базы (банка) данных по конструкционной прочности материалов, установление причин и подтверждение эффективности мероприятий по предотвращению появления дефектов, отработка методов диагностики технического состояния двигателей в процессе эксплуатации.

Отраслевая база прочностных исследований ГТД в ЦИАМ оснащалась в основном разработанными непосредственно в институте или специализированными советскими предприятиями по техническим заданиям института испытательными машинами, установками и стендами для испытаний образцов (в основном вырезаемых из заготовок деталей и/или окончательно изготовленных деталей с сохранением поверхностного слоя материала, зон концентрации напряжений и т.д.), моделей деталей, натуральных деталей и узлов. В последующие годы осуществлялась поэтапная модернизация экспериментальной базы института.

В составе экспериментальной базы можно выделить лаборатории (участки) исследований конструкционной прочности сплавов, статических испытаний корпусов и других статорных деталей, усталостных испытаний, испытаний на термоусталость, исследований вибрационного состояния двигателей и их деталей, исследований остаточных напряжений, неразрушающего контроля, фрактографических и металлографических исследований, испытаний подшипников, испытаний зубчатых колес и редукторов, испытаний на разгонных стендах. Поскольку композиционный материал создается фактически вместе с деталью, лаборатория отработки прочностной надежности деталей из этих материалов включает как оборудование для прочностных испытаний, так и опытный технологический участок.

Возможности экспериментальной базы по состоянию на 2015 г. были кратко рассмотрены в работе [3]. В 2016–2018 гг. с учетом задач, решение которых необходимо для создания перспективных конкурентоспособных двигателей, проведена дальнейшая модернизация экспериментальной базы исследований прочностной надежности.

Для создания двигателей нового поколения необходимы разработка и внедрение новых материалов и конструктивно-технологических решений, которые могут использоваться в двигателе только после отработки их до VI уровня технологической и соответствующего уровня производственной готовности (по шкале НАСА). При этом необходимы тщательные исследования особенностей деформирования и разрушения материалов в ожидаемых условиях эксплуатации, разработка критериев прочности и моделей долговечности. Важными являются за-

дачи проведения специальной квалификации и исследования конструкционной прочности перспективных материалов с формированием соответствующих электронных баз данных, подтверждения прочностной надежности при использовании новых конструктивно-технологических решений (редуктора привода ротора вентилятора, деталей из композиционных материалов, деталей из материалов с градиентом свойств, интегральных конструкций из разнородных материалов; деталей и узлов, полученных с использованием аддитивных технологий, и т.д.) [1, 2, 4–9]. В связи с повышением параметров перспективных двигателей и применением новых высокотемпературных материалов необходимо проведение прочностных испытаний при экстремально высоких значениях температуры, исследование теплозащитных покрытий [1, 10, 11]. Возрастание при создании перспективных двигателей значения предотвращения разрушений от многоциклового усталости обуславливает необходимость дальнейшего развития методов анализа быстропротекающих процессов, методов подтверждения вибрационной прочности двигателей и их деталей [1, 2, 9, 12–14]. Для обеспечения и подтверждения прочностной надежности крупногабаритных двигателей большой тяги (крупногабаритных рабочих колес вентиляторов, корпусов, подшипников качения большого диаметра и т.д.) необходимо создание соответствующего оборудования. Следует также отметить необходимость создания специализированного оборудования для исследования контактной усталости элементов подшипников, проведения прочностных испытаний конических зубчатых колес [12, 13, 15].

Развитие экспериментальной базы необходимо также для подтверждения соответствия двигателей новым сертификационным требованиям (подтверждения ресурсов критических по последствиям разрушения деталей с учетом возможных дефектов; подтверждения стойкости двигателя к воздействию вулканической пыли, крупных кристаллов льда и смешанной фазы из жидких капель и ледяных кристаллов, воздействию крупных стайных птиц и т.д.) [1, 16, 17]. Увеличение наработки двигателей без съема с крыла связано с необходимостью исследования долговечности при больших наработках, сложном напряженно-деформированном состоянии, совместном действии различных повреждающих факторов. Реализация прогрессивных методов эксплуатации двигателей (эксплуатации по надежности) невозможна без отработки методов оценки комплексной диагностики технического состояния двигателей, их узлов и деталей, оценки накопленной повреждаемости и остаточной долговечности деталей, снижения критичности дефектов [1, 17, 18]. Необходимость раннего подтверждения возможности осуществления полетов по ETOPS-маршрутам большой продолжительности обуславливает увеличение объема испытаний, проводимых до ввода двигателя в эксплуатацию, необходимость проведения некоторых специальных видов испытаний, позволяющих уточнить последствия появления отдельных дефектов и подтвердить сохранение работоспособности двигателя.

В последние годы за счет использования нового технологического и испытательного оборудования удалось добиться существенного расширения возможностей института для исследований прочностной надежности деталей из композиционных материалов; деталей из перспективных сплавов, в том числе деталей из разнородных сплавов и сплавов с градиентом свойств; деталей, полученных с помощью аддитивных технологий. Особое внимание было уделено обеспечению возможности исследований конструкционной прочности материалов при значениях температуры, превышающих 1100 °С. Можно отметить также разработку оборудования и методов для исследования свойств теплозащитных покрытий деталей горячей части газоздушного тракта двигателя [10, 11].

Получено и освоено новое оборудование для исследования и подтверждения вибрационной прочности деталей двигателей, включая оборудование для модального анализа, оптическую систему для измерения деформаций при вибрациях, дополнительные испытательные машины для исследования многоциклового усталости материалов при растяжении при асимметрии цикла нагружения и рабочей температуре; специализированную машину для испытаний на многоцикловую усталость лопаток при асимметрии цикла нагружения. Новые возможности для проведения работ по повышению прочностной надежности деталей двигателя появились также

благодаря использованию рентгеновского дифрактометра, позволяющего осуществлять измерения остаточных напряжений в деталях в труднодоступных зонах концентрации напряжений (в глубоких отверстиях, выемках, галтелях и т.д.). С целью решения задач исследования дефектов в деталях и подтверждения ресурса деталей с учетом развития трещин от дефектов получена и освоена испытательная машина для выращивания трещин, существенно расширены за счет использования нового оборудования возможности автоматизированного неразрушающего контроля (люминисцентного, вихретокового) и фрактографических исследований.

Большое значение имеет расширение возможностей испытаний деталей и узлов двигателей на разгонных стендах. Эти стенды широко используются для проведения различных инженерных, сертификационных и технологических испытаний.

ЦИАМ имеет более чем 60-летний опыт создания и эксплуатации разгонных стендов в различных конструктивных исполнениях: с горизонтальной и вертикальной осями, верхним и нижним расположением привода, оборудованных воздушными турбинами, низкоскоростными электродвигателями с мультипликаторами, высокоскоростными электродвигателями [2, 3, 19].

В институте на протяжении многих лет осуществляют разработку новых и модернизацию существующих разгонных стендов, совершенствование методик испытаний. Основные результаты выполненных в этом направлении до 2015 г. работ рассмотрены в статье [19].

В последние годы выполнен ряд новых работ, обеспечивающих расширение возможностей проведения испытаний на разгонных стендах.

На рис. 1, 2 показаны широко используемые в институте для проведения различных видов испытаний разгонные стенды с вакуумируемыми камерами – разработанный в институте стенд Т14-01 и один из двух стендов РС, разработанных по техническому заданию института фирмой Test Devices Inc. (США).



Рис. 1. Стенд Т14-01

На вертикальном разгонном стенде РС-1Д с вакуумной рабочей камерой, на котором в качестве основного привода в настоящее время используется воздушная турбина, протестирован и введен в эксплуатацию приводной электродвигатель с частотой вращения до 60 000 об/мин. Использование на стендах двух вариантов привода (электродвигателя и воздушной турбины) позволит повысить производительность циклических испытаний благодаря обеспечению возможности одновременной работы двух стендов (при ограниченных возможностях компрессорной станции, питающей воздухом воздушные турбины).



Рис. 2. Стенд PC-1Д фирмы Test Devices Inc.

В институте на протяжении ряда лет осуществляют расчетные и экспериментальные исследования стойкости двигателей к попаданию птиц [3, 12, 13]. В 2014–2016 гг. проведена модернизация разгонного стенда Т14-01 с нижним расположением электропривода для проведения испытаний вентиляторов двигателей большой степени двухконтурности, в том числе с возможностью заброса посторонних предметов на стенде с использованием разработанной в ЦИАМ пневматической пушки (рис. 3).

Это позволило успешно провести испытание для подтверждения стойкости лопаток вентилятора при забросе крупной одиночной птицы. Так как было также показано, что последствия попадания в двигатель крупной одиночной птицы менее критичны, чем последствия отрыва лопатки вентилятора, то после успешного испытания двигателя с обрывом лопатки вентилятора удалось исключить необходимость проведения сертификационного испытания двигателя с забросом крупной одиночной птицы.

При доводке и сертификации двигателя большое значение имеет проведение испытаний по подтверждению локализации в корпусах двигателя фрагментов разрушенных лопаток роторов и фрагментов роторов агрегатов. При проведении этих испытаний необходимо обеспечить разрушение ротора (обрыв лопатки по наиболее удаленному от оси двигателя перу замкового соединения или

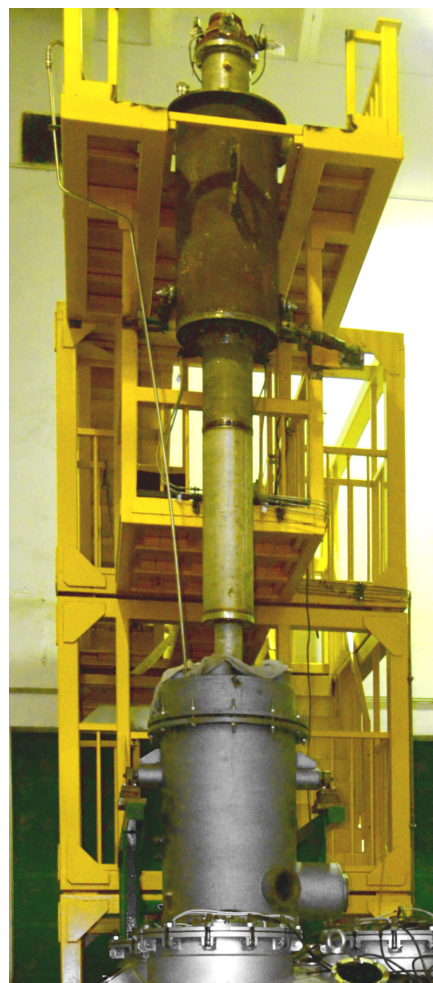


Рис. 3. Пневматическая пушка, размещенная на крышке бронекмеры разгонного стенда Т14-01

в отдельных случаях по корневому сечению, разрушение ротора агрегата на три части) при заданной частоте вращения. В институте накоплен большой опыт проведения таких испытаний с использованием разных методов обеспечения разрушения ротора. Обеспечение обрыва лопатки при заданной частоте вращения ротора может осуществляться при помощи дистанционно управляемого (с передачей сигнала через токосъемник) заряда (ДУЗ) со взрывчатым веществом с помощью ослабления (подрезки детали) или дополнительного нагрева предварительно ослабленного ее сечения (в частности, с подачей через токосъемник напряжения на размещенный внутри лопатки нагревательный элемент).

Подрезка лопатки является самым простым способом и часто используется в ЦИАМ при проведении подобного типа испытаний, однако этот способ не всегда технически осуществим, поскольку имеющийся радиальный зазор между лопатками и корпусом может оказаться недостаточным, в результате чего происходит касание подрезанной лопатки о корпус. Кроме того, достаточно сложно обеспечить за счет подрезки лопатки ее разрушение при заданной частоте вращения ротора. Обрыв лопатки при помощи ДУЗ позволяет исключить эти проблемы, однако проведение таких испытаний связано с необходимостью использования дополнительных мер обеспечения безопасности, а также проведения специальной отладки для того, чтобы предотвратить сообщение оборванной лопатке дополнительной энергии. Обрыв под действием дополнительного нагрева предварительно ослабленного сечения [3, 19], являющийся патентованной разработкой ЦИАМ, позволяет исключить существенную локальную вытяжку лопатки, неизбежную при проведении испытаний с подрезкой, и при этом лишен недостатков испытаний с использованием ДУЗ.

Для проведения испытаний в условиях, близких к эксплуатационным, осуществляется нагрев объекта испытаний. Используются различные способы нагрева [3, 19, 20].

В случаях, если нет необходимости обеспечивать значительный температурный градиент и если продолжительность нагрева не имеет существенного значения и не требуется изменения температуры в процессе испытания, возможно использование радиационного нагрева. Традиционно для точного задания температурного состояния при таком способе нагрева требуется проведение длительной отладки с использованием предварительно препарированного объекта, однако в последнее время в ЦИАМ разработаны методы расчета, позволяющие сократить объем предварительных работ или вообще исключить необходимость отладки, а также методы бесконтактного измерения температуры.

На рис. 4 приведены результаты расчета теплового состояния установленного на стенде ротора в условиях нагрева с использованием трубчатых электронагревателей.

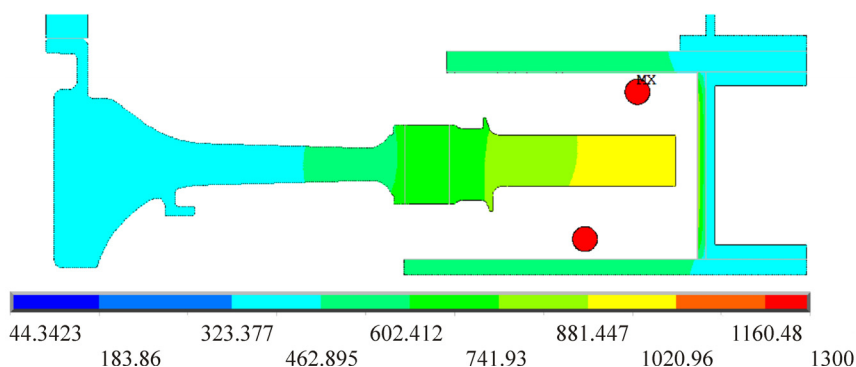


Рис. 4. Расчет теплового состояния ротора, нагреваемого в процессе испытания на разгонном стенде с помощью электронагревателей

В случаях, когда требуется получение значительного температурного градиента либо необходимо обеспечить изменение теплового состояния объекта в процессе испытания, более

предпочтительным является использование систем индукционного нагрева с принудительным охлаждением объекта в требуемых зонах. Испытания на разгонном стенде с циклическим изменением температуры объекта в процессе испытания (термоциклические испытания) впервые были проведены в нашей стране в ЦНИИТМАШ в начале 1960-х гг., а с 1980-х гг. активно развиваются в ЦИАМ [19]. Индукционный нагрев использовался на ряде стендов, в том числе на стенде Т14-01. Нагрев за счет трения вращающегося ротора о воздух при проведении испытаний в атмосферных условиях применялся в ЦИАМ на стенде У-365.

В настоящее время спроектированы установка для проведения эквивалентно-циклических испытаний с термоциклированием с целью подтверждения ресурса роторов и установка для разгонных испытаний роторов при температуре до $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (с охлаждением жидким азотом) на стенде РС-1Д.

Важное значение имеют применяемые при проведении испытаний на разгонных стендах высокоскоростная видеосъемка и методы инструментального контроля температуры, перемещений, деформаций и вибрационного состояния объектов испытаний.

В частности, высокоскоростная видеосъемка позволяет получить информацию об очаге и характере разрушения исследуемого ротора (рис. 5), об ударном взаимодействии ротора с птицей при испытании на птицестойкость или фрагментов ротора с корпусом при испытании по подтверждению локализации в корпусе фрагментов ротора.

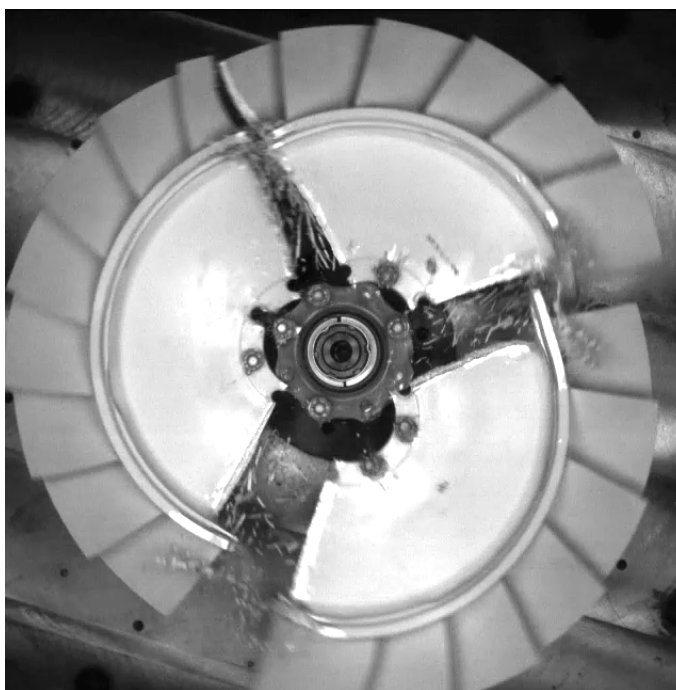


Рис. 5. Фрагментация ротора при разгонном испытании (кадр высокоскоростной видеосъемки)

Так, данные высокоскоростной видеосъемки, полученные при проведении работ с обрывом рабочей лопатки вентилятора, позволили проанализировать характер взаимодействия лопатки с корпусом, определить траектории движения и кинетическую энергию фрагментов лопатки после соударения с корпусом, а также траекторию движения оси ротора после обрыва лопатки.

Высокоскоростная видеосъемка может быть успешно использована не только для наблюдения за процессом разрушения, но также для построения полей перемещений и деформаций вращающихся объектов в процессе испытания. Полученные в результате испытания изображения могут быть обработаны с использованием специальных алгоритмов, например с помощью

метода корреляции цифровых изображений. Суть метода состоит в том, что в исходном изображении выделяются характерные точки (например, специальные маркеры), которые позволяют разбить изображение на фрагменты, и для каждого из фрагментов определяется положение центральной точки. При деформации объекта центральные точки фрагментов смещаются. Это смещение выделяется алгоритмом, и по его величине строится поле деформаций. Метод хорошо отработан для неподвижных и линейно перемещающихся объектов, однако при его использовании для вращающихся объектов возникает проблема с синхронизацией изображений, которая была успешно решена в ЦИАМ при помощи дополнительной системы обработки изображений, осуществляющей совмещение характерных точек объекта. Поле перемещений вращающегося объекта непосредственно перед разрушением показано на рис. 6.

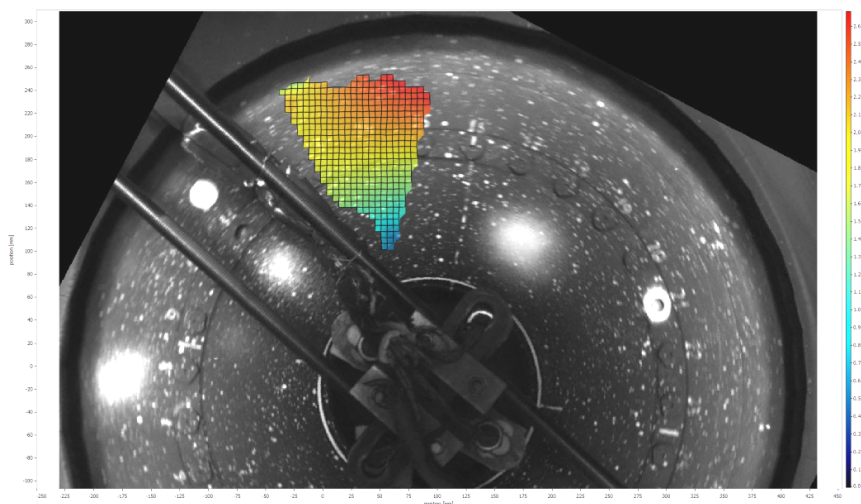


Рис. 6. Поле перемещений точек поверхности вращающегося объекта по результатам высокоскоростной видеосъемки

Для качественной видеосъемки вращающихся объектов в условиях разгонного стенда необходим высокий уровень освещенности в ограниченном пространстве при минимизации отражений, для чего в ЦИАМ разработаны специальные системы освещения.

На рис. 7 показаны светильники, размещенные в камере стенда Т14-01 и использованные для создания требуемой освещенности при проведении высокоскоростной видеосъемки в процессе испытаний с забросом птицы и обрывом лопатки вентилятора.

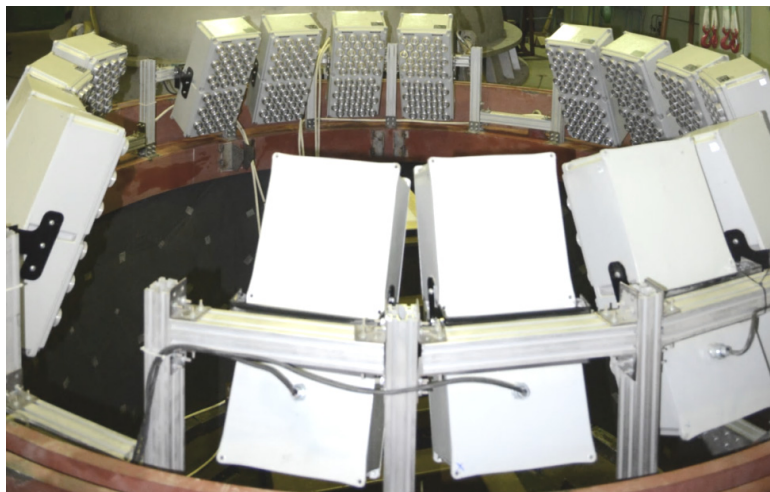


Рис. 7. Светильники в камере разгонного стенда

Для высокоскоростной видеосъемки при малом времени экспозиции разработана система освещения со светильниками, имеющими жидкостное охлаждение (рис. 8). Эти светильники позволяют в компактных габаритах получить световой поток 520 000 лм (1,5 млн лм в импульсном режиме), обеспечивают возможность синхронизации при работе с высокоскоростной видеокамерой и работают при температуре до 500 °С.

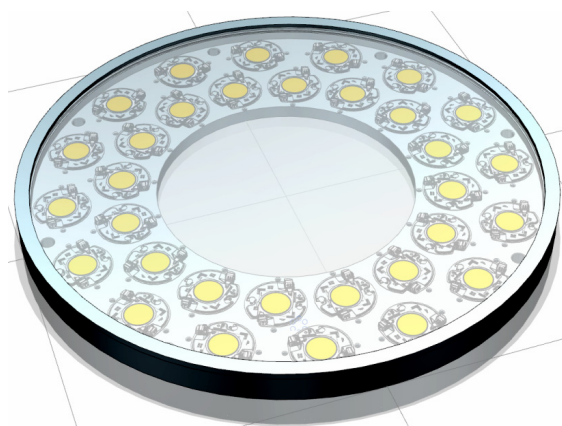


Рис. 8. Светильники с жидкостным охлаждением

Для контроля изменения линейных размеров объекта испытаний используются как точечные измерения, так и датчики, позволяющие получить изображение профиля объекта. Для точечных измерений при проведении испытаний

могут использоваться промышленные вихретоковые датчики, емкостные датчики, лазерные триангуляционные датчики и др. При этом калибровка в стендовых условиях по методике ЦИАМ позволяет добиться точности измерений до 5 мкм при температуре объекта до 1200 °С.

В ЦИАМ разработана методика контроля профиля вращающегося объекта с использованием лазерных триангуляционных 2D-сканеров. С помощью этой методики проведены успешные измерения относительных перемещений отдельных деталей, входящих в состав испытуемого ротора.

Компоновка разгонного стенда РС-1Д с установленным ротором и размещением датчиков показана на рис. 9. По показаниям 2D-сканеров для заданного набора частот вращений построены линейные профили, показывающие набор расстояний от сканера до поверхности объекта. Пример таких профилей, полученных для трех частот вращения, с наложением на эскиз ротора, показан на рис. 10, а. На рис. 10, б, в показаны статический излом диска-лабиринта ротора и распределение пластических деформаций в момент разрушения, на рис. 11 – кадр видеосъемки, иллюстрирующий разрушение лабиринта.

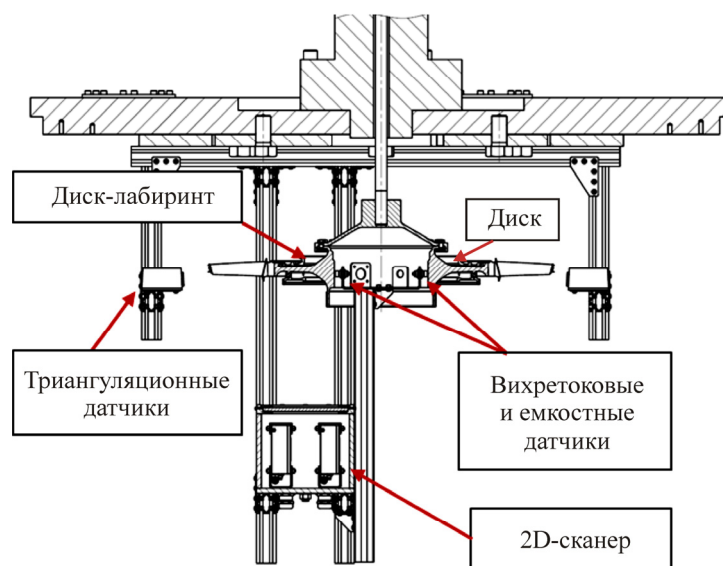


Рис. 9. Испытуемый ротор на стенде РС-1Д и размещение датчиков

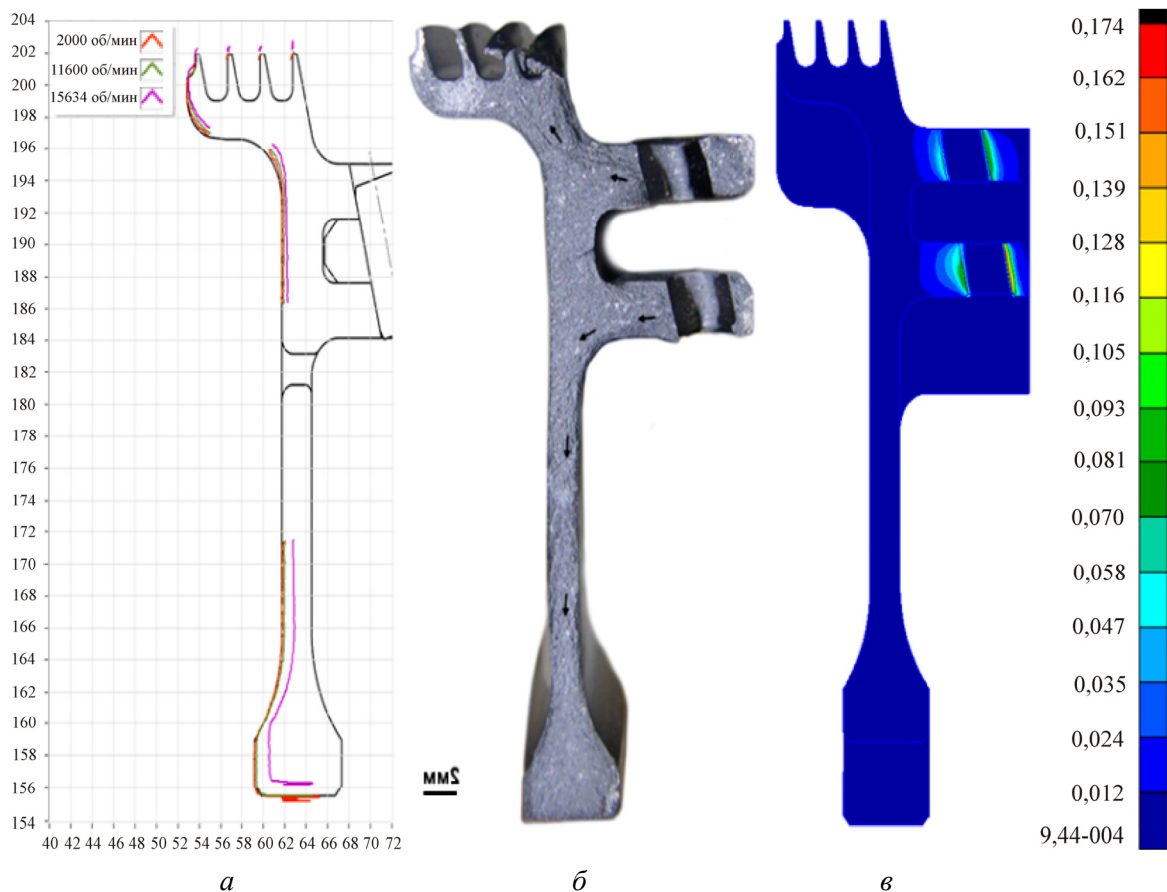


Рис. 10. Состояние диска-лабиринта ротора в момент разрушения: *а* – профиль перемещений; *б* – статический излом; *в* – распределение пластических деформаций

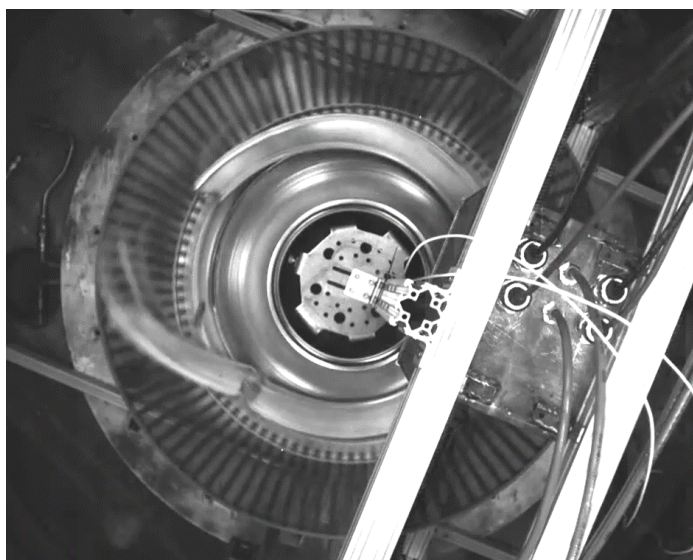
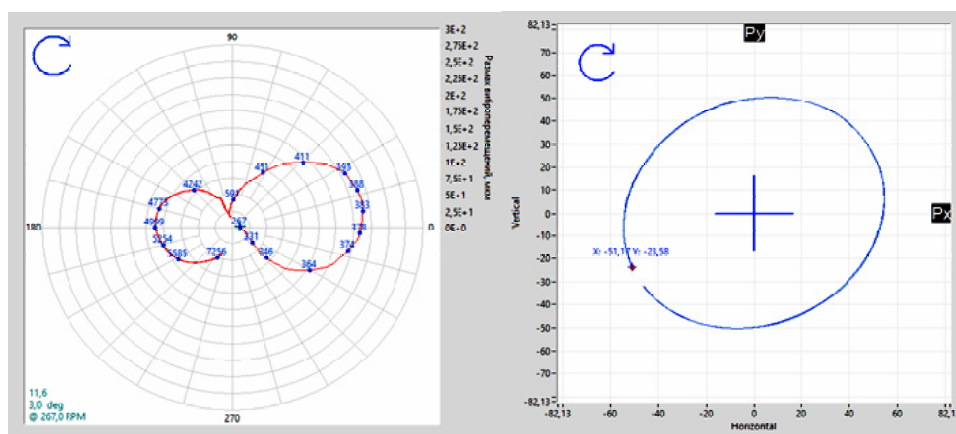


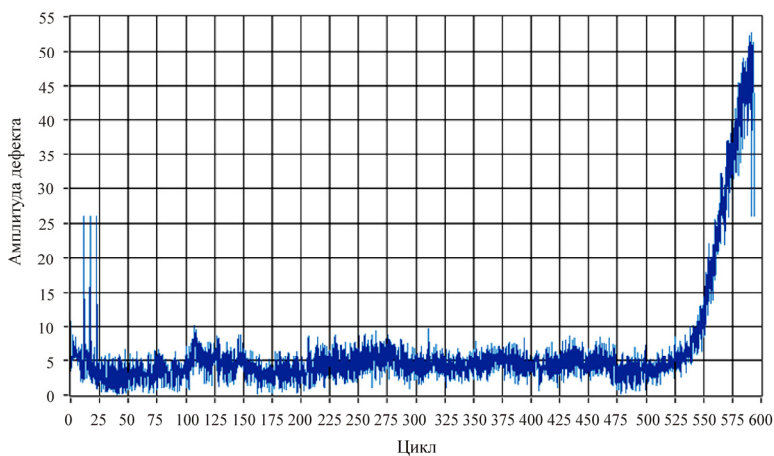
Рис. 11. Видеосъемка разрушения диска-лабиринта

Бесконтактные измерения и высокоскоростная съемка успешно использовались для валидации и верификации новой методики расчета несущей способности роторов. При этом велось сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными по определению разрушающей частоты вращения и вытяжки ротора в процессе его раскрутки, а также по определению зоны начала и характера разрушения [21].

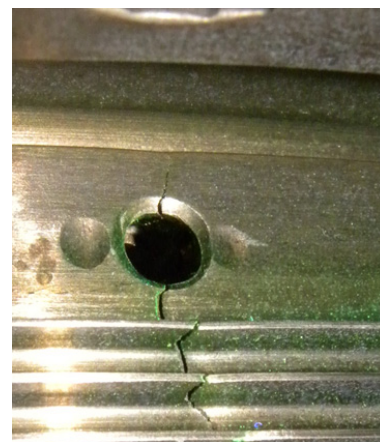
Непрерывный контроль вибрационного состояния объекта при проведении испытаний, в особенности циклических, позволяет отслеживать изменения в объекте и предотвращать разрушение объекта на стенде [19]. Благодаря этому удается сохранить материальную часть для металлографических и фраттографических исследований, а также предотвратить значительные разрушения стенда. В ЦИАМ разработан и активно используется программно-аппаратный комплекс, позволяющий получать исчерпывающую информацию о вибрационном состоянии объекта в процессе испытания для анализа и прогнозирования состояния объекта. Исходными данными для анализа состояния ротора являются сигналы с бесконтактных датчиков виброперемещений и датчиков фазы. По этим данным, помимо общей зависимости виброперемещений от времени и графика спектра сигнала, строится серия графиков, открывающих широкие возможности для анализа состояния испытываемого ротора, такие как диаграмма Боде, каскадная диаграмма и т.д. На рис. 12, а показаны построенные в процессе испытания системы полярная диаграмма и диаграмма положения центра вала. Кроме того, с помощью измерительной системы можно диагностировать возникновение трещины в процессе испытания по изменению вектора дисбаланса, который представляется в виде графика изменения амплитуды сигнала, показанного на рис. 12, б, и графика изменения фазы, свидетельствующих о появлении дефекта. Работоспособность системы подтверждена по результатам множества испытаний, в ходе которых были успешно предотвращены разрушения объектов на стенде. Фотография одной из трещин, обнаруженной системой, показана на рис. 12, в.



а



б



в

Рис. 12. Показания системы вибродиагностики (а); график изменения амплитуды сигнала, характеризующего появление дефекта (б), и вид обнаруженной после разборки объекта испытаний трещины (в)

Для стенда Т14-01 разработана и изготовлена система возбуждения колебаний вращающихся лопаток струями масла, аналогичная используемой на стенде РС-1Д [12]. Размеры бронкамеры стенда Т14-01 позволяют испытывать на этом стенде рабочие колеса вентиляторов двигателей с большой степенью двухконтурности [3, 20]. Ввиду этого после завершения модернизации этот стенд можно будет использовать для исследования вибрационных характеристик, сопротивления многоциклового усталости, а также прочности при совместном мало- и многоцикловом нагружении вращающихся лопаток вентиляторов различных конструкций (пустотелых титановых, углепластиковых и др.).

Разгонные стенды института эффективно используются для проведения широкого спектра испытаний и успешно модернизируются, давая возможность расширить экспериментальные исследования. Выполнена предварительная проработка вакуумных разгонных стендов нового поколения, в том числе стенда с горизонтальной осью для испытаний вентиляторов двигателей большой тяги (в том числе испытаний с обрывом лопатки, забросом птиц), стенда с вертикальной осью для проведения разгонных, циклических испытаний роторов и специальных испытаний. При проведении этих работ был учтен большой накопленный опыт расчетных и экспериментальных исследований.

Работа выполнена на ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» с участием большого количества сотрудников: А.Н. Серветника, А.В. Морозова, С.А. Чернышева, В.В. Белоусова, Д.А. Татарникова, А.А. Томашева.

Библиографический список

1. Nozhnitsky Yu.A. The problem of ensuring reliability of gas turbine // Engines ATCES 2017, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 302. – 9 p. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/01/20182
2. Ножницкий Ю.А., Балувев Б.А. Отраслевая экспериментальная база прочностных исследований авиационных двигателей // Метрологическое обеспечение испытаний и измерений в авиационно-космической промышленности: сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. – М., 2013. – С. 76–87.
3. Ножницкий Ю.А., Балувев Б.А., Федина Ю.А. Экспериментальные исследования прочностной надежности перспективных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 3(69). – С. 4–14.
4. Банк данных ЦИАМ по конструкционной прочности материалов [Электронный ресурс] / Б.Е. Васильев, Л.А. Магеррамова, М.Е. Колотников, Е.Р. Голубовский, М.Е. Волков // Труды МАИ. – 2017. – № 96. – С. 21. – URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/83a/Vasilev_Merrogamova_Kolotnikov_Golubovskiy_Volkov_rus.pdf?lang=ru&issue=96 (дата обращения: 9.04.2019).
5. Design of a bimetallic blisk turbine for a gas turbine engine and its production using power metallurgy methods / L.A. Magerramova, R. Nigmatullin, B. Vasiliev, V. Kinzburskiy // ASME. – Paper GT2017-63560. – 2017. – 10 p.
6. Magerramova L.A., Vasiliev B.E, Kinzburskiy V.S. Novel designs of turbine blades for additive manufacturing // ASME. – Paper GT2016-56084. – 2016. – 7 p.
7. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю. Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного газотурбинного двигателя // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 128–138.
8. Разработка легких широкохордных лопаток вентиляторов с применением композиционных материалов для перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей / Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов, В.Г. Епанов, Д.В. Афанасьев, А.Ю. Ежов, Б. Мыктыбеков, Е.А. Макаева, М.П. Николаева, Д.С. Хоминич // Труды ЦИАМ. Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. – 2010. – № 1344. – С. 415–435.
9. Экспериментальная оценка характеристик многоциклового усталости монокристаллических образцов и рабочих охлаждаемых лопаток из никелевых сплавов / Е.Р. Голубовский, А.Н. Стадников, С.А. Черкасова, А.Н. Петухов // Труды ЦИАМ. Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. – 2010. – № 1344. – С. 321–340.

10. Экспериментальное определение термоциклической долговечности изготовленных из перспективного жаропрочного никелевого сплава рабочих лопаток турбин с различными покрытиями / Н.Г. Бычков, Ю.А. Ножницкий, А.Ш. Хамидуллин, А.В. Першин, В.В. Авруцкий // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 99–105.
11. Разработка экспериментальных методов определения прочностных и теплофизических свойств отдельных, имеющих реальную толщину слоев теплозащитных покрытий при рабочих температурах / Н.Г. Бычков, Ю.А. Ножницкий, А.В. Першин, А.Ш. Хамидулин // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 3(69). – С. 15–20.
12. Шорр Б.Ф., Мацаренко В.С., Серебряков Н.Н. Проектно-экспериментальные работы по созданию установки для стендовых испытаний невращающихся лопаток на птицестойкость // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 88–98.
13. Расчетно-экспериментальное исследование эффективности защиты вертолетного двигателя от попадания посторонних предметов / Б.Ф. Шорр, А.В. Горячев, В.С. Мацаренко, В.Г. Жулин, В.В. Савенков // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 44–49.
14. Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Пути повышения надежности и ресурса подшипниковых опор роторов современных газотурбинных двигателей и редукторов // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 228–237.
15. Хориков А.А., Данилкин С.Ю., Мазикина Т.И. Ранняя диагностика вибрационного состояния многоступенчатых осевых компрессоров авиационных двигателей на предпомпажных режимах при стендовых испытаниях // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 148–159
16. Экспериментальное и теоретическое исследование бифуркаций вибраций в авиационных трансмиссиях / В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, С.Г. Гукасян, Д.В. Дорофеев, В.Г. Сторчак, А.И. Афанасьев // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 183–192.
17. Применение концепции аддитивности циклической долговечности для определения ресурса дисков авиадвигателей из гранулируемых сплавов / Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева, Н.А. Воробьева, А.И. Калашникова // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 49–59.
18. Методы и средства диагностики авиационных приводов при их эксплуатации по техническому состоянию / В.В. Голованов, В.Г. Василенко, А.А. Земсков, С.С. Панов, А.А. Емельянова // Вестник СГАУ. – 2015. – № 3(15), ч. 1. – С. 213–221.
19. Новые возможности применения разгонных стендов для обеспечения прочностной надежности газотурбинных двигателей / Ю.А. Ножницкий, Ю.А. Федина, Д.В. Шадрин, А.Н. Серветник, Б.А. Балуев, А.В. Каначкин, А.Р. Лепешкин, А.А. Томашев, С.А. Чернышев // Вестник СГАУ. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 71–87.
20. Динерман А.П., Гецов Л.Б. К вопросу о конструктивной прочности дисков газовых турбин в условиях нестационарных режимов // Теплоэнергетика. – 1962. – № 5. – С. 38–43.
21. Nozhnitsky Y.A., Servetnik A.N. Prevention of hazardous failure of the turbine rotor due to its overspeed // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – No. 449. – 10 p. DOI: 10.1088/1757-899X/449/1/012025

References

1. Nozhnitsky Yu.A. The Problem of Ensuring Reliability of Gas Turbine Engines. ATCES 2017, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, no. 302 (2018), 9 p. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/01/20182.
2. Yu.A. Nozhnitsky, B.A. Baluev. Otrasleyevaya eksperimentalnaya baza prochnostnyh issledovaniy aviatsionnyh dvigateley [Industry experimental base of strength research of aircraft engines]. Proceedings of All-Russia Technical Science Conference «Metrologicheskoe obespechenie ispytaniy i izmereniy v aviatsionno-kosmicheskoy promyshlennosti», Moscow, 2013, pp. 76-87.
3. Yu.A. Nozhnitsky, B.A. Baluev, Yu.A. Fedina. Eksperimentalnye issledovaniya prochnostnoy nadezhnosti perspektivnyh gazoturbinnnyh dvigateley [Experimental studies of the strength reliability of promising gas turbine engines]. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, no. 3(69), pp. 4-14.
4. B.E. Vasilev, L.A. Magerramova, M.E. Kolotnikov, E.R. Golubovskiy, M.E. Volkov. Bank dannyh TSIAM po konstruksionnoy prochnosti materialov [CIAM data bank on structural strength of materials]. Trudy MAI, 2017, no. 96, 21 p. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/83a/Vasilev_Merrogamova_Kolotnikov_Golubovskiy_Volkov_rus.pdf?lang=ru&issue=96.

5. L.A. Magerramova, R. Nigmatullin, B. Vasilev, V. Kinzburskiy. Design of a Bimetallic Blisk Turbine for a Gas Turbine Engine and Its Production Using Power Metallurgy Methods. ASME, Paper GT2017-63560, 2017, 10 p.

6. L.A. Magerramova, B.E Vasilev, V. S. Kinzburskiy. Novel Designs of Turbine Blades for Additive Manufacturing. ASME, Paper GT2016-56084, 2016, 7 p.

7. T.D. Karimbaev, M.A. Mezentsev, A.Yu. Ezhov. Razrabotka i eksperimentalnye issledovaniya nemetallicheskih detaley i uzlov goryachey chasti perspektivnogo gazoturbinogo dvigatelya [Development and experimental studies of non-metallic parts and assemblies of the hot section of a promising gas turbine engine]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), chapter 1, pp. 128-138.

8. T.D. Karimbaev, A.A. Luppov, V.G. Epanov, D.V. Afanasev et. al. Razrabotka legkih shirokohordnyh lopatok ventilyatorov s primeneniem kompozitsionnykh materialov dlya perspektivnykh turboreaktivnykh dvuhkonturnykh dvigateley [Development of lightweight wide-chord fan blades using composite materials for advanced turbojet dual-engine engines]. *Trudy CIAM*, Moscow: Torus Press, 2010, no. 1344, pp. 415-435.

9. E.R. Golubovskiy, A.N. Stadnikov, S.A. Cherkasova, A.N. Petuhov. Eksperimentalnaya otsenka harakteristik mnogotsiklovoy ustalosti monokristallicheskih obraztsov i rabochih ohlazhdaemykh lopatok iz nikelovykh splavov [Experimental evaluation of the characteristics of multicycle fatigue of single-crystal samples and working cooled blades of nickel alloys]. *Trudy CIAM*. Moscow: Torus Press, 2010, no. 1344, pp. 321-340.

10. N.G. Bychkov, Yu.A. Nozhnitskiy, A.Sh. Hamidullin, A.V. Pershin, V.V. Avrutskiy. Eksperimentalnoe opredelenie termotsiklicheskoy dolgovechnosti izgotovlennykh iz perspektivnogo zharoprochnogo nikelovogo splava rabochih lopatok turbin s razlichnymi pokrytiyami [Experimental determination of thermocyclic durability of turbine blades with various coatings made from advanced high-temperature nickel alloy]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), Part 1, pp. 99-105.

11. Bychkov N.G., Nozhnitskiy Yu.A., Pershin A.V., Hamidulin A.Sh. Razrabotka eksperimentalnykh metodov opredeleniya prochnostnykh i teplofizicheskikh svoystv otdelnykh, imeyuschiy realnuyu tolschinu sloev teplozaschitnykh pokrytiy pri rabochih temperaturah [Development of experimental methods for determining the strength and thermal properties of individual, having a real thickness of layers of thermal protective coatings at operating temperatures]. *Vestnik UGATU*, 2015, vol. 19, no. 3(69), pp.15-20.

12. B.F. Shorr, V.S. Matsarenko, N.N. Serebryakov. Proektno-eksperimentalnye raboty po sozdaniyu ustanovki dlya stendovykh ispytaniy nevrashchayuschihsya lopatok na pitsestoykost [Design and experimental work on the creation of an installation for bench tests of non-rotating blades for bird resistance]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015. №3 (15), chast' 1. S. 88-98.

13. Shorr B.F., Goryachev A.V., Matsarenko V.S., Zhulin V.G., Savenkov V.V. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie effektivnosti zaschity vertoletnogo dvigatelya ot popadaniya postoronnih predmetov [Computational and experimental study of the effectiveness of the protection of a helicopter engine from ingress of foreign objects]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 44-49.

14. Petrov N.I., Lavrentev Yu.L. Puti povysheniya nadezhnosti i resursa podshipnikovyykh opor rotorov sovremennykh gazoturbinnykh dvigateley i reduktorov [Ways to improve the reliability and service life of the bearing supports of the rotors of modern gas turbine engines and gearboxes]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 228-237.

15. A.A. Horikov, S.Yu. Danilkin, T.I. Mazikina. Rannyya diagnostika vibratsionnogo sostoyaniya mnogostupenchatyykh osevykh kompressorov aviatsionnykh dvigateley na predpompazhnykh rezhimakh pri stendovykh ispytaniyakh [Early diagnostics of the vibration state of multistage axial compressors for aircraft engines in pre-surge modes during bench testing]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 148-159.

16. V.L. Dorofeev, V.V. Golovanov, S.G. Gukasyan, D.V. Dorofeev, V.G. Storchak. A.I., Afanasev. Eksperimentalnoe i teoreticheskoe issledovanie bifurkatsiy vibratsiy v aviatsionnykh transmissiyakh [Experimental and theoretical study of vibration bifurcations in aircraft transmissions]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 183-192.

17. N.V. Tumanov, M.A. Lavrenteva, N.A. Vorobeva, A.I. Kalashnikova. Primenenie kontseptsii additivnosti tsiklicheskoy dolgovechnosti dlya opredeleniya resursa diskov aviadvigateley iz granuliruemykh splavov [Application of the concept of additivity of cyclic durability to determine the life of the disks of aircraft engines from granulated alloys]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 49-59.

18. V.V. Golovanov, V.G. Vasilenko, A.A. Zemskov, S.S. Panov, A.A. Emelyanova. Metody i sredstva diagnostiki aviatsionnykh privodov pri ikh ekspluatatsii po tekhnicheskomu sostoyaniyu [Methods and means of diagnostics of aviation drives during their operation according to the technical condition]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3(15), part 1, pp. 213-221.

19. Yu.A. Nozhnitsky, Yu.A. Fedina, D.V. Shadrin et. al. Novye vozmozhnosti primeneniya razgonnykh stendov dlya obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti gazoturbinnnykh dvigateley [New opportunities for the use of boosters to ensure the strength reliability of gas turbine engines]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2015, no. 3, vol. 14, pp. 71-87.

20. A.P. Dinerman, L.B. Getsov. K voprosu o konstruktivnoy prochnosti diskov gazovykh turbin v usloviyah nestatsionarnykh rezhimov [On the question of the structural strength of gas turbine disks under unsteady conditions]. Teploenergetika, 1962, no. 5, pp. 38-43.

21. Nozhnitsky Yu.A., Servetnik A.N. Prevention of Hazardous Failure of the Turbine Rotor Due to Its Overspeed. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, no. 449(2018), 10 p. DOI: 10.1088/1757-899X/449/1/012025

Об авторах

Ножницкий Юрий Александрович (Москва, Россия) – доктор технических наук, заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Динамика, прочность, надежность» ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: nozhnitsky@ciam.ru).

Балуев Борис Александрович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: baluev@rtc.ciam.ru).

Федина Юлия Алексеевна (Москва, Россия) – кандидат технических наук, начальник сектора ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: yafedina@ciam.ru).

Шадрин Дмитрий Владимирович (Москва, Россия) – начальник сектора ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова (111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: dvshadrin@ciam.ru).

About the authors

Yuri A. Nozhnitsky (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director – Director of Research Center of Dynamic, Strength, Reliability, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov (CIAM) (2, Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russian Federation; e-mail: nozhnitsky@ciam.ru).

Boris A. Baluev (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Head of Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov (CIAM) (2, Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russian Federation; e-mail: baluev@rtc.ciam.ru).

Yulia A. Fedina (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov (CIAM) (2, Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russian Federation; e-mail: yafedina@ciam.ru).

Dmitry V. Shadrin (Moscow, Russian Federation) – Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov (CIAM) (2, Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russian Federation; e-mail: dvshadrin@ciam.ru).

Получено 09.04.2019