

САПРОНОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАМКОВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛОПАТОК С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ
ДИСКОМ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных
аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Резник Сергей Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Ракетно-космические
композитные конструкции» ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)

Официальные оппоненты: **Белоусов Анатолий Иванович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Конструкции и проектирование двигателей
летательных аппаратов» ФГАОУ ВО «Самарский
национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Быков Леонид Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры 204
«Авиационно-космическая теплотехника» ФГБОУ
ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: Акционерное общество «Обнинское научно-
производственное предприятие «Технология»
имени А.Г. Ромашина»

Защита состоится «__» _____ 2017 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.22 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ауд. 407, корп. СМ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просьба
направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, диссертационный совет Д 212.141.22

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент

Луценко А.Ю.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К ключевым направлениям развития газотурбинных двигателей летательных аппаратов относятся: повышение экономичности, увеличение полного назначенного ресурса, снижение эмиссии вредных веществ и уровня шума. В качестве первостепенных показателей эффективности двигателя как тепловой машины можно выделить удельную работу и эффективный К.П.Д. Для их улучшения необходимо повышать температуру газа перед турбиной. Эта задача не может быть решена без использования рабочих лопаток турбин из новых жаропрочных материалов, способных работать при температурах до 1600 °С, например, керамических. Основной неблагоприятный фактор при создании керамических деталей – хрупкость материала. По данным ведущих разработчиков характеристики современных керамических материалов недостаточны для обеспечения прочности цельного ротора турбины. Более реальной задачей представляется создание сборной конструкции из металлического диска и керамических лопаток.

Среди главных проблем создания рабочих колес с керамическими лопатками можно выделить проблему прочности замкового соединения. Выбор оптимальной формы замкового соединения, исследование механического и теплового контакта металлического диска и керамических лопаток являются актуальными научными задачами.

Цель диссертационной работы – определение рациональных параметров замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных газотурбинных двигателях летательных аппаратов с учетом особенностей их теплового и механического контакта.

Основные задачи диссертационной работы:

1. Разработать модели механического и теплового контакта металлических и керамических деталей, методики оценки контактной прочности и определения контактной термической проводимости в системе «керамика-металл».
2. Построить параметризованную модель высокого уровня рабочего колеса турбины перспективного газотурбинного двигателя летательного аппарата и исследовать с ее помощью теплонапряжённое состояние замкового соединения керамических лопаток типа «ласточкин хвост» по полётному циклу.
3. Теоретически обосновать конструкцию модельного рабочего колеса и провести его стендовые испытания для определения несущей способности замкового соединения керамических лопаток на режимах нагружения, соответствующих эксплуатационным.

Объект исследований – замковое соединение керамических лопаток с металлическим диском в рабочем колесе турбины перспективного

газотурбинного двигателя летательного аппарата.

Предмет исследований – модели теплового и механического контакта керамических и металлических деталей, параметризованная модель рабочего колеса турбины перспективного газотурбинного двигателя летательного аппарата.

Методология исследования основана на совокупности численных и экспериментальных методов исследования механических и теплофизических характеристик контактных пар «металл-керамика», анализе теплового и напряжённо-деформированного состояния замкового соединения керамических лопаток с металлическим диском в рабочем колесе турбины перспективного газотурбинного двигателя летательного аппарата.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны модели теплового и механического контакта керамических и металлических деталей, учитывающие характер эксплуатационных нагрузок в замковых соединениях турбин перспективных газотурбинных двигателей летательных аппаратов.

2. Впервые получены экспериментальные данные по контактной прочности, значения термической проводимости при уровне температур до 500 °С и контактных давлений – до 250 МПа для пар «сталь ЭИ961ш-керамика на основе нитрида кремния» и «сталь ЭИ961ш-керамика на основе карбида кремния».

3. Построена параметризованная модель высокого уровня рабочего колеса турбины перспективного газотурбинного двигателя летательного аппарата и с ее помощью исследовано теплонапряжённое состояние замкового соединения керамических лопаток типа «ласточкин хвост» по полётному циклу.

Практическая значимость:

1. Разработаны новые методики расчетно-экспериментального определения контактной прочности и контактной термической проводимости для пар «металл-керамика».

2. Создано программное обеспечение для проектирования замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском типа «ласточкин хвост» в рабочих колёсах турбин перспективных газотурбинных двигателей летательных аппаратов.

3. Теоретически обоснована и испытана на стенде конструкция модельного рабочего колеса, универсально пригодного для экспериментальной проверки несущей способности замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском на режимах нагружения, соответствующих эксплуатационным.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Методики расчетно-экспериментального определения контактной прочности и контактного термического сопротивления для замковых

соединений керамических лопаток с металлическим диском, полученные экспериментальные данные.

2. Модели и программное обеспечение для проектирования замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском типа «ласточкин хвост» в рабочих колесах турбин перспективных газотурбинных двигателей летательных аппаратов.

3. Технические решения, относящиеся к конструкции модельного рабочего колеса, методика его стендовых испытаний и результаты экспериментального определения несущей способности замкового соединения керамических лопаток.

4. Рекомендации по выбору формы, размеров замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском, теплофизическим и механическим характеристикам керамических материалов лопаток перспективных газотурбинных двигателей летательных аппаратов.

Рекомендации по внедрению:

Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании перспективных конструкций турбин с использованием керамических лопаток, а также в учебном процессе кафедры ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Предложенная методика передана во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Степень достоверности: подтверждается использованием математических моделей, основанных на фундаментальных законах механики и теплофизики, высоким уровнем метрологического обеспечения экспериментальных исследований, сравнением с результатами других авторов, а также хорошим согласием теоретических и экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях модельного рабочего колеса с керамическими лопатками.

Личный вклад автора заключается в создании программного обеспечения для проектирования рабочих колес турбин перспективных газотурбинных двигателей летательных аппаратов различной размерности с замковым соединением керамических лопаток в среде Ansys APDL и проведении расчётных исследований, в разработке и реализации методик расчетно-экспериментального определения контактной прочности и термической проводимости для пар «металл-керамика», в подготовке, проведении и анализе результатов стендовых испытаний модельной конструкции рабочего колеса с керамическими лопатками.

Апробация работы: Основные положения диссертации докладывались на ряде научных конференций: «Прочность конструкций ЛА» (г. Жуковский, Московская обл., 2012), XX Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (г. Обнинск, Калужская обл., 2013), Sino-Russian Symposium on Advanced Materials and Processing Technology (Qingdao,

China, 2014), Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2014), Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели 21 века» (г. Москва, 2015), Fourth International Conference on Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications (Wrexham, UK, 2015), XLI Академические чтения по космонавтике (Королевские) (г. Москва, 2017), а также на научных семинарах в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» и АО «ОНИИ «Технология» им. А.Г. Ромашина» (2014-2017).

Публикации: По тематике диссертационной работы опубликовано 11 научных работ, 4 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и один патент на полезную модель (общий объем 4,2 п.л.).

Структура и объём диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Работа представлена на 156 страницах основного текста, включающего 119 рисунков, 38 таблиц, список литературы из 159 наименований и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ публикаций по теме диссертационной работы. Рассмотрены конструктивные варианты соединения керамических лопаток с металлическим диском, приведены характеристики современных керамических материалов и методы расчёта на прочность рабочих колёс.

Вторая глава посвящена разработке моделей и методов исследования механического и теплового контакта керамических и металлических деталей.

В замковом соединении типа «ласточкин хвост» центробежная сила лопатки $F_{\text{л}}$ уравнивается усилиями N , действующими на боковые грани замка, и силами трения $F_{\text{тр}}$ (Рис. 1). При анализе напряженного состояния в области контакта диска с лопаткой, принимая допущение о несущественном влиянии растягивающих и изгибающих нагрузок и минимальном коэффициенте трения, можно провести аналогию с напряженным состоянием в задаче о вдавливании штампа в упругое полупространство.

Для исследования контакта «металл-керамика» в работе предложена модель, состоящая из штампов с круговым основанием: керамический образец толщиной h_1 и диаметром d_1 расположен между двумя металлическими образцами толщиной h_2 и диаметром d_2 (Рис. 2). Сверху к образцам прикладывается сжимающее давление от прессы p , возникает контактный слой толщиной h_3 , зависящий от качества обработки поверхностей и влияющий на момент разрушения. Разработана специальная

оснастка для передачи сжимающего усилия и центровки модели.

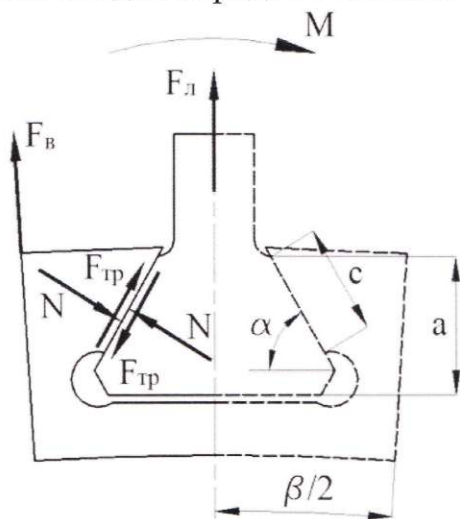


Рис. 1. Усилия в замковом соединении

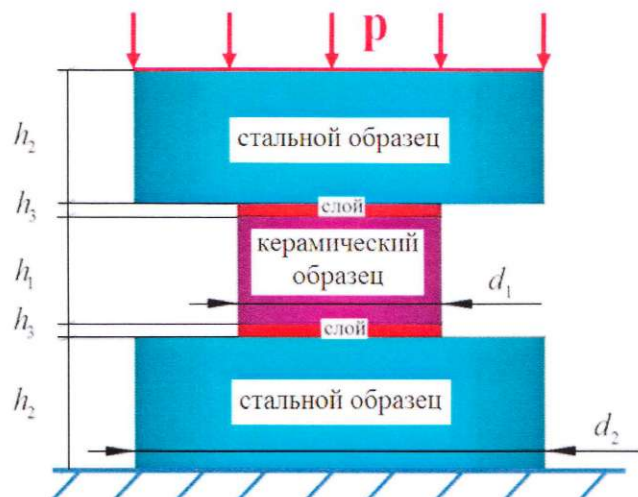


Рис. 2. Модель механического контакта

Исследовался контакт образцов стальных (ЭИ961ш) с керамическими: а) на основе карбида кремния, армированного алмазными частицами – с модулем упругости 520000 МПа, плотностью 3200 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 300 Вт/(м·°С), с двумя разными чистотами обработки контактных поверхностей; б) из горячепрессованного нитрида кремния – с модулем упругости 240000 МПа, плотностью 3450 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 19 Вт/(м·°С). Контактные поверхности стальных образцов обрабатывались шлифованием. Испытания проводились на машине Instron 5985 с непрерывным нагружением до момента разрушения. Минимальная контактная прочность карбидных образцов с меньшей шероховатостью составила 138 МПа («К», Рис. 3), с большей шероховатостью – 163 МПа («ш К», Рис. 3), нитридных образцов – 1339 МПа («Н», Рис. 4).

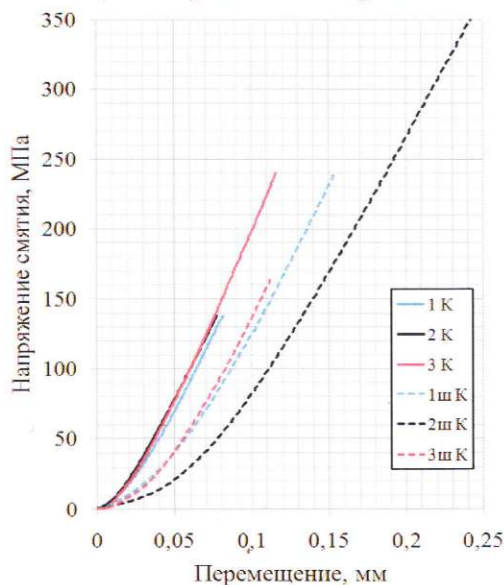


Рис. 3. Контактные испытания «К»

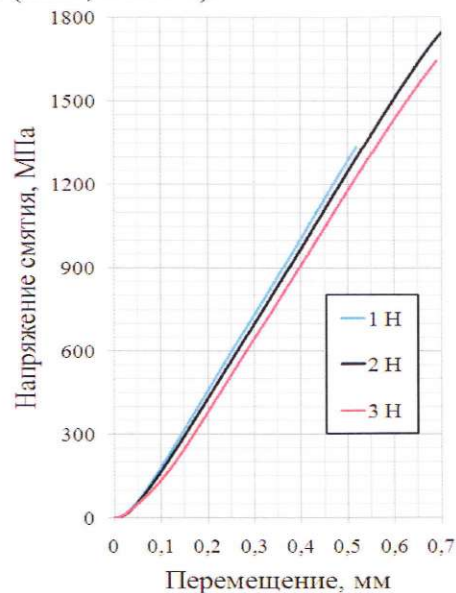


Рис. 4. Контактные испытания «Н»

Исследование контактных поверхностей керамических образцов на микроскопе Leica 3D до и после испытаний показало, что в «К» среднее значение шероховатости уменьшалось от 2,1 до 1,5 мкм, «ш К» – от 21,0 до 11,8 мкм; а «Н» – от 0,9 до 0,7 мкм. Фрактография образца «Н» (Рис. 5) выявила два очага разрушения: в нижней части образца с краю и в верхней части образца по середине площадки контакта. Это свидетельствует о существенном влиянии локальной концентрации напряжений, обусловленной особенностями микрогеометрии керамических образцов. Расчетно выявить область и момент контактного разрушения не представляется возможным. Поэтому на начальном этапе проектирования замковых соединений керамических лопаток требуется проведение контактных испытаний, предложенных в данной главе.

При исследовании теплового контакта керамических и металлических деталей, как и в случае механического контакта, использовалась модель с образцами цилиндрической формы (штампы с круговым основанием), Рис. 6, а. Сталь имеет теплопроводность λ_1 , керамический материал λ_2 , промежуточный контактный слой λ_3 . Тепловой поток обеспечивается за счёт перепада температур в модели: $\Delta T = T_A - T_B$.

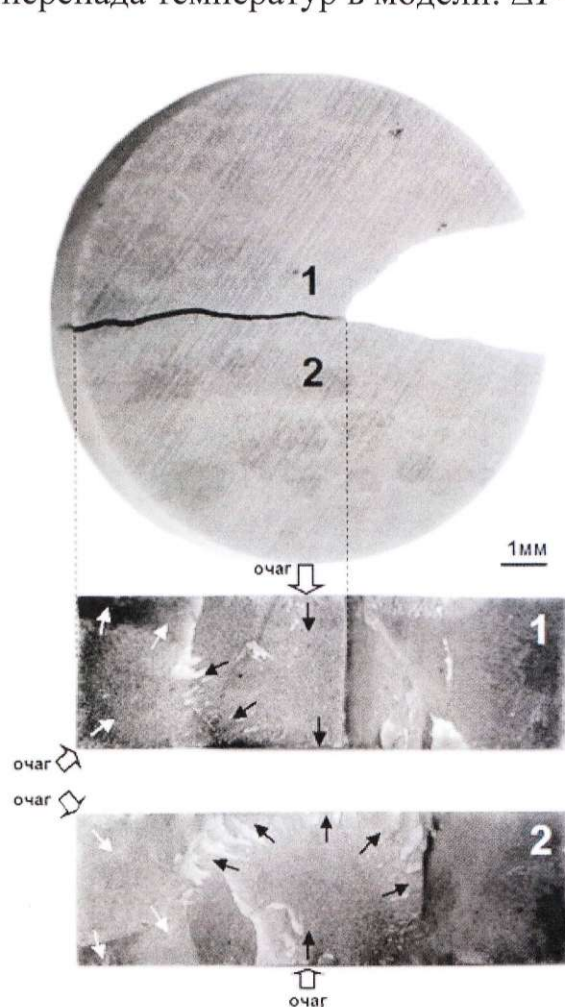


Рис. 5. Фрактография образца «Н»

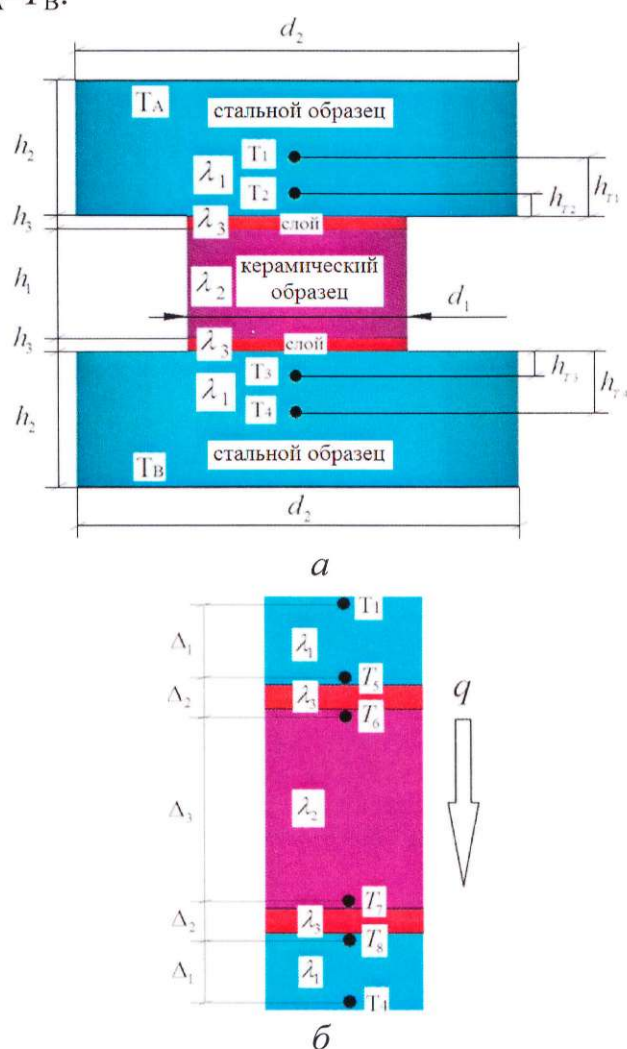


Рис. 6. Модель теплового контакта

С целью определения термического контактного сопротивления для пар «металл-керамика» предложена следующая методика:

1) При установившемся тепловом режиме с параметрами $\Delta T^* = T_1 - T_4$ и $\Delta T_{\text{ср}} = (T_1 + T_4)/2$ проводятся измерения температур в четырех сечениях по толщине модели, расположенных от границ контакта на расстояниях h_{T1} , h_{T2} , h_{T3} , h_{T4} : T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , определяется плотность теплового потока q при помощи закона Фурье (Рис. 6, а); затем коэффициент теплопроводности контактного слоя λ_3 и тепловая контактная проводимость α_k (Рис. 6, б).

2) Для получения более достоверных данных, учитывающих тепловые потери в модели в трёхмерной постановке, проводится построение конечно-элементной модели данной системы. В данной модели задаются температуры T_1 и T_4 , а также условие конвективного теплообмена с окружающей средой (воздух). В качестве первичного приближения для контактного слоя задаётся значение λ_3 , полученное в 1). После проведения теплового расчёта определяются тепловые потери на границах модели, которые затем прикладываются, как тепловые нагрузки, и заново пересчитывается q .

3) Пункты 1) – 2) выполняются до момента удовлетворительной сходимости расчётных значений T_2 и T_3 с экспериментальными.

В металлических образцах в каждом из четырех сечений выполнено по три канавки для установки термопар глубиной 5,5 мм и толщиной 0,7 мм, что позволяло снизить погрешность определения температур.

Для обеспечения заданного температурного режима испытаний в модели разработана система нагрева, включающая в себя следующие основные узлы: нагреватель, трансформатор, система управления (Рис. 7). Нагреватель был выполнен из жаропрочного сплава ВЖ98 и состоял из двух идентичных ветвей. Его разогрев осуществлялся пропусканием электрического тока от вторичной обмотки трансформатора. С целью получения необходимого перепада температур на ветвях нижнего нагревателя устанавливалась медная вставка, способствующая свободному протеканию тока за счёт низкого электросопротивления материала. Управление температурным режимом осуществлялось с помощью контроля мощности, подаваемую на нагреватель.

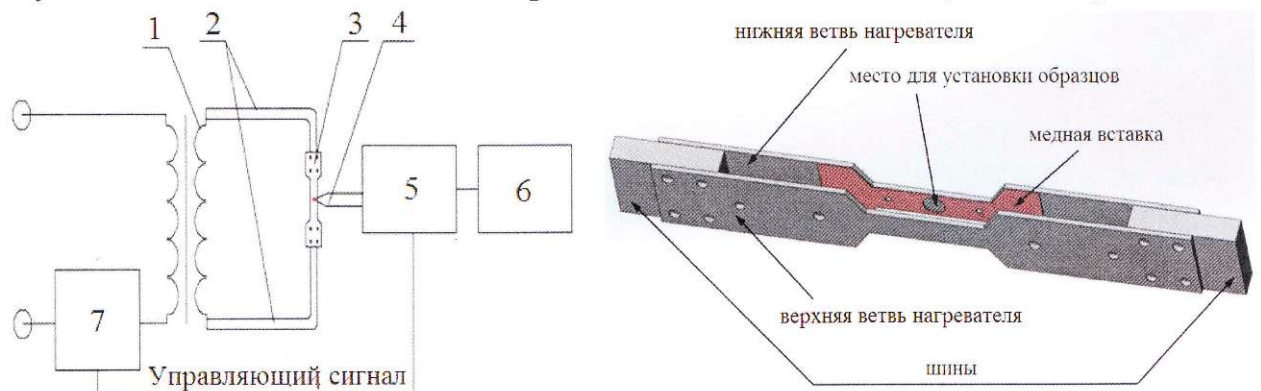


Рис. 7. Система нагрева: 1 – трансформатор, 2 – шины, 3 – нагреватель, 4 – термопара, 5 – регулятор температуры, 6 – реле времени, 7 – мощности

Термомеханические испытания проводились на машине Instron 5985 с поступенчатым увеличением нагрузки и выдержками на каждом режиме до момента установления стационарного температурного режима (Рис. 8). В парах «К»/«Н»–металл» контактная термическая проводимость α_k при давлении 1 МПа с возрастанием температур до 500°C изменялась слабо и не превышала 5350 Вт/(м²·°C). С увеличением давления от 1 до 250 МПа при температуре до 200°C α_k в паре «К»–металл» изменялась от 7500 до 15100 Вт/(м²·°C), а в «Н»–металл» – от 6010 до 12200 Вт/(м²·°C) (Рис. 9). Установлено, что при уровне напряжения смятия, соответствующему эксплуатационному (более 150 МПа), α_k можно принимать постоянной.



Рис. 8. Проведение термомеханических испытаний

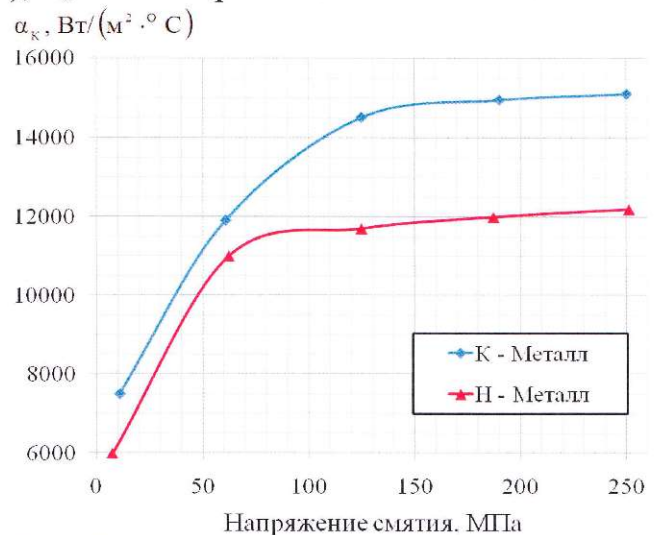


Рис. 9. Результаты термомеханических испытаний

В третьей главе предложена комплексная методика оптимального проектирования замкового соединения керамических лопаток и металлического диска, включающая в себя следующие этапы:

- выбор конструктивной схемы замкового соединения;
- разработка параметризованной модели конструкции в среде Ansys с использованием встроенного языка программирования APDL;
- построение КЭ-модели сектора рабочего колеса под одну лопатку;
- моделирование теплонапряжённого состояния рабочего колеса;
- оптимизация формы замкового соединения.

В параметризованной модели выбрано 7 наиболее значимых геометрических параметров (Рис. 10, красный цвет). Целевая функция формулировалась, как условие минимизации значения первого главного напряжения в хвостовике керамической лопатки. Вводились ограничения на максимальное значение эквивалентного напряжения по Мизесу в диске, напряжение смятия и массу диска. Для оптимизации использовался встроенный в Ansys программный модуль, основанный на методе нулевого порядка. В расчётах учитывались экспериментальные данные: значения

контактной термической проводимости и критических напряжений смятия. Предполагалось, что характеристика физической нелинейности материала диска соответствует модели упрочнения Multilinear Kinematic Hardening с критерием возникновения пластических деформаций Мизеса. Для керамических лопаток вводилось допущение о линейной зависимости напряжения от деформации вплоть до момента разрушения, а также об изотропности характеристик материала. При моделировании температурного состояния задавались коэффициенты конвективной теплоотдачи и температура окружающей среды на участках поверхности тела, полученные в независимых газодинамических расчётах.

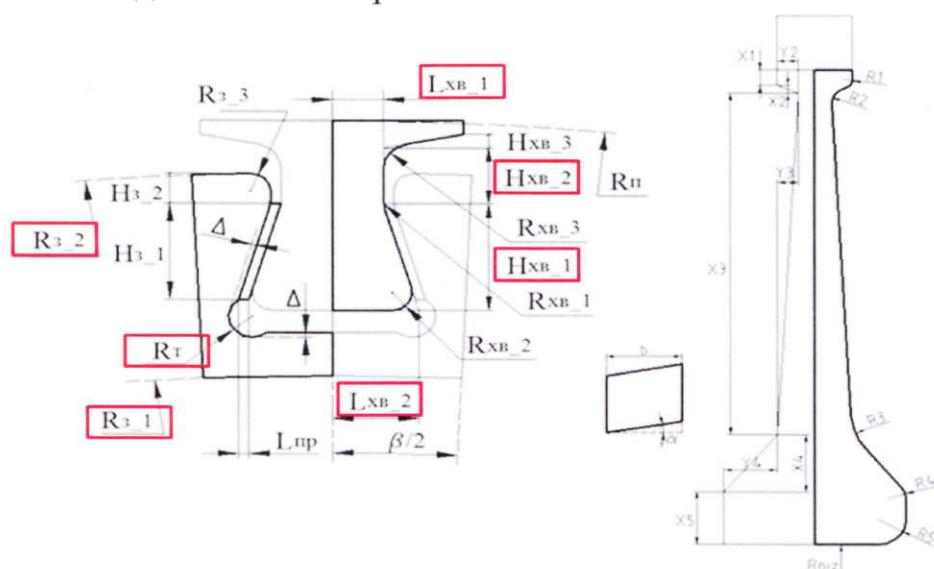


Рис. 10. Параметризованная модель рабочего колеса

Определен конструктивный облик рабочего колеса первой ступени турбины высокого давления с замковым соединением керамических лопаток «К» и «Н» перспективного газотурбинного двигателя среднемагистрального самолёта и исследовано теплонпряжённое состояние на режимах работы «Взлет», «Крейсер», «Земной малый газ» (Рис. 11-14).

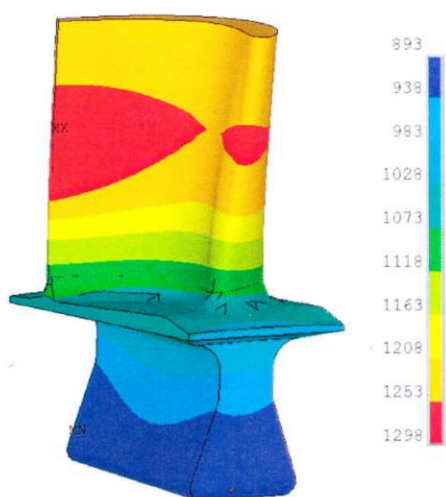


Рис. 11. Тепловое состояние лопатки «К» на режиме «Взлёт», °C



Рис. 12. Тепловое состояние лопатки «Н» на режиме «Взлёт», °C

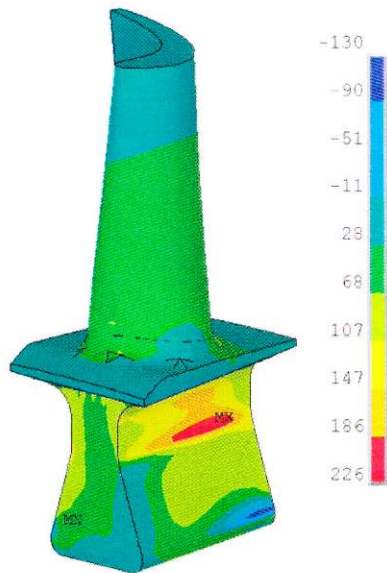


Рис. 13. Первые главные напряжения в лопатке «К» на режиме «Взлёт», МПа

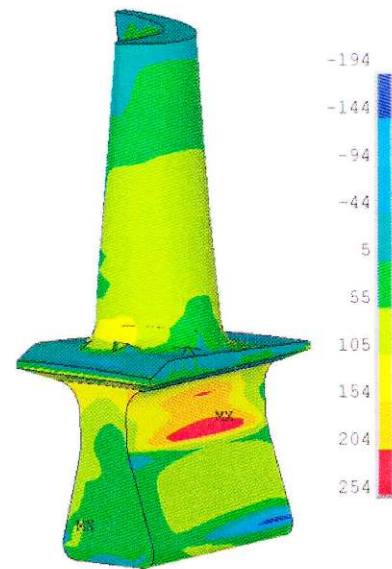


Рис. 14. Первые главные напряжения в лопатке «Н» на режиме «Взлёт», МПа

При оценке прочности керамических лопаток использовалось двухпараметрическое распределение Вейбулла. В данном случае минимальная прочность $[\sigma]$ при задаваемом уровне требуемой надёжности R_a с учётом отношения эффективных объёмов образца V_{ef1} и изделия V_{ef2} :

$$[\sigma] = \frac{\bar{\sigma}}{\Gamma(1+1/m)} \left[\frac{V_{ef1}}{V_{ef2}} \times \frac{\ln(1/R_a)}{2(m+1)^2} \right]^{1/m}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее значение прочности керамических образцов, полученное на призматических образцах при 3-х точечном изгибе; m – модуль Вейбулла; $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Долговечность t керамических лопаток в результате медленного роста трещины под действием постоянного напряжения σ определялась, как:

$$t = \frac{2 \cdot \sigma_0^{n-2} \cdot \ln(1/R_a)^{\frac{n-2}{m}}}{A \cdot (n-2) \cdot \sigma^n \cdot \pi \cdot K_{IC}^{n-2}}, \quad (2)$$

где A , n – параметры роста трещины, определяемые экспериментально с помощью методов динамической или статической усталости; K_{IC} – вязкость разрушения; m , σ_0 – параметры распределения Вейбулла.

Необходимые характеристики длительной прочности принимались в соответствии со справочными данными. Проводилась оценка циклической долговечности диска N для цикла 0-MAX-0 по формуле Мэнсона:

$$\Delta \varepsilon_t = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} \cdot N^{-0,6} + \frac{3,5}{E} \cdot (\sigma_B - \sigma_m) \cdot N^{-0,12}, \quad (3)$$

где $\Delta \varepsilon_1$ – размах деформаций; σ_B – предел прочности материала; σ_m – среднее напряжение в цикле; ψ – характеристика пластичности материала; E – модуль упругости материала.

Результаты расчётов показали, что на наиболее теплонагруженном режиме «Взлёт» не удаётся обеспечить прочность хвостовиков керамических лопаток с уровнем надёжности 0,99. Максимальный уровень растягивающих напряжений в хвостовиках «К» составил 226 МПа при допустимом не более 173 МПа; а для хвостовиков «Н» – 254 МПа при допустимом не более 238 МПа. Долговечность хвостовиков «Н» на режиме «Крейсер» не превышала 87 с, а на режиме «Земной малый газ» – 36111 ч. Одной из важных проблем при отсутствии охлаждения керамических лопаток являлся перегрев верхней части выступов металлических дисков: в случае модели с хвостовиками «К» – до 947°C, а «Н» – до 686°C. Вследствие перегрева снижался уровень механических характеристик металлических дисков и не выполнялись требования по длительной статической прочности и циклической долговечности. При численном моделировании подтверждена эффективность применения металлических проставок в соединении: они позволяют снизить уровень контактных напряжений и способствуют более равномерному распределению нагрузки. Расчетно показано, что для обеспечения прочности лопаток с уровнем надёжности $R_a=0,999999$ керамика должна иметь предел прочности на изгиб не менее 800 МПа при модуле Вейбулла более 20, контактная прочность должна быть не менее 170 МПа.

В четвёртой главе проводилось экспериментальное исследование несущей способности замкового соединения керамических лопаток с металлическим диском на эксплуатационных режимах нагружения.

С целью повышения надёжности работы замкового соединения керамических лопаток необходимо проводить: экспериментальное определение несущей способности соединения; испытания по отбраковке лопаток с низкими характеристиками; испытания с перегрузкой для отработки требуемого ресурса керамических лопаток. Уровень перегрузки n^* выбирается с учётом (2), чтобы обеспечить требуемую наработку t .

В работе предложено использовать уменьшенную модель диска с керамическими лопатками, позволяющую снизить трудоемкость испытаний. Было необходимо обеспечить одинаковый уровень напряжений смятия в реальной конструкции (1) и испытательной модели (2), при сохранении геометрического подобия замкового соединения. Выведены соотношения, определяющие радиус уменьшенной модели и число лопаток m :

$$R_{D2} = R_{D1} \cdot \left(N_1 / N_2 \right)^2; \quad 2 \leq m < n \cdot (R_{D2} / R_{D1}) \quad (4)$$

где n и m – число лопаток в реальной и модельной конструкциях; N_1 и N_2 – частоты вращения; R_{D1} , R_{D2} – радиусы дисков.

На основе выше описанной модели разработано специальное устройство (Рис. 15). Данное устройство представляло собой модельное рабочее колесо, включающее в себя диск «1» с 4-мя пазами типа «ласточкин хвост» под керамические лопатки «7». Покрывные диски «3» с упорной гайкой «2» обеспечивали осевую фиксацию керамических лопаток. Фиксация покрывных дисков в окружном направлении осуществлялась посредством винтов «5». Фторопластовая проставка «6» обеспечивала контакт керамических лопаток с диском в начальный момент времени. Для установки на разгонный стенд устройство предварительно собиралось со шпинделем тепловым методом. Паз профилировался при помощи разработанного кода, с минимизацией пластических деформаций в диске. Исследование проводилось на модельных лопатках из материала «К».

Перед проведением испытаний проводилось численное моделирование раскрутки рабочего колеса. Благодаря оптимальной форме паза, металлический диск кратковременно сохраняет работоспособность до уровня растягивающих напряжений в керамических хвостовиках не менее 430 МПа. По отношению к типовому режиму «Крейсер» может быть обеспечена перегрузка по уровню растягивающих напряжений в керамических хвостовиках $n^* > 2,3$. В предыдущих работах двигателестроительных фирм отмечалась сложность обеспечения $n^* > 1,3$ из-за недостаточной прочности металлических дисков. Поэтому предложенная модель также пригодна для ресурсных испытаний с перегрузкой.

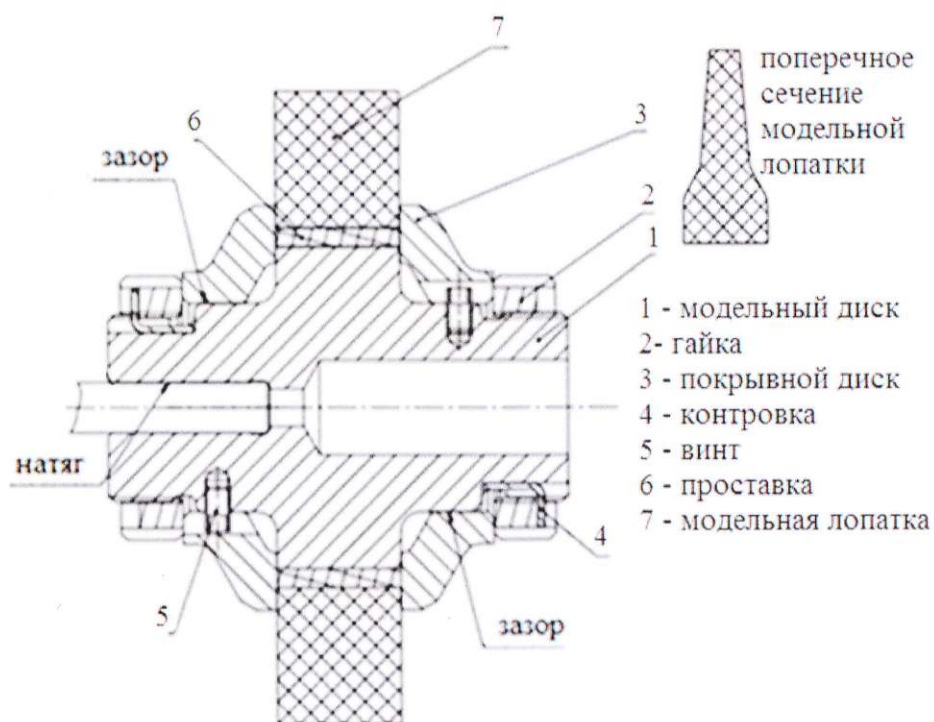


Рис. 15. Модельное рабочее колесо с керамическими лопатками

Испытания проводились на разгонном стенде с установленной приводной турбиной фирмы Test Devices Inc в свинцовой камере. Проводилось два типа испытаний: (1) без проставок и (2) с медными проставками толщиной 0,1 мм между лопатками и диском. Моменты разрушения определялись по диаграммам изменения частоты вращения и виброперемещения демпферной опоры приводной турбины (Рис. 16). В первом случае разрушение произошло при частоте вращения 67784 об/мин, а во втором – при 64702 об/мин. Различие полученных разрушающих частот вращения, не превысило 5%, и объяснялось разбросом механических характеристик керамики. Расчётное значение разрушающей частоты вращения при уровне надёжности 0,99 составило 64000 об/мин. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчётов.

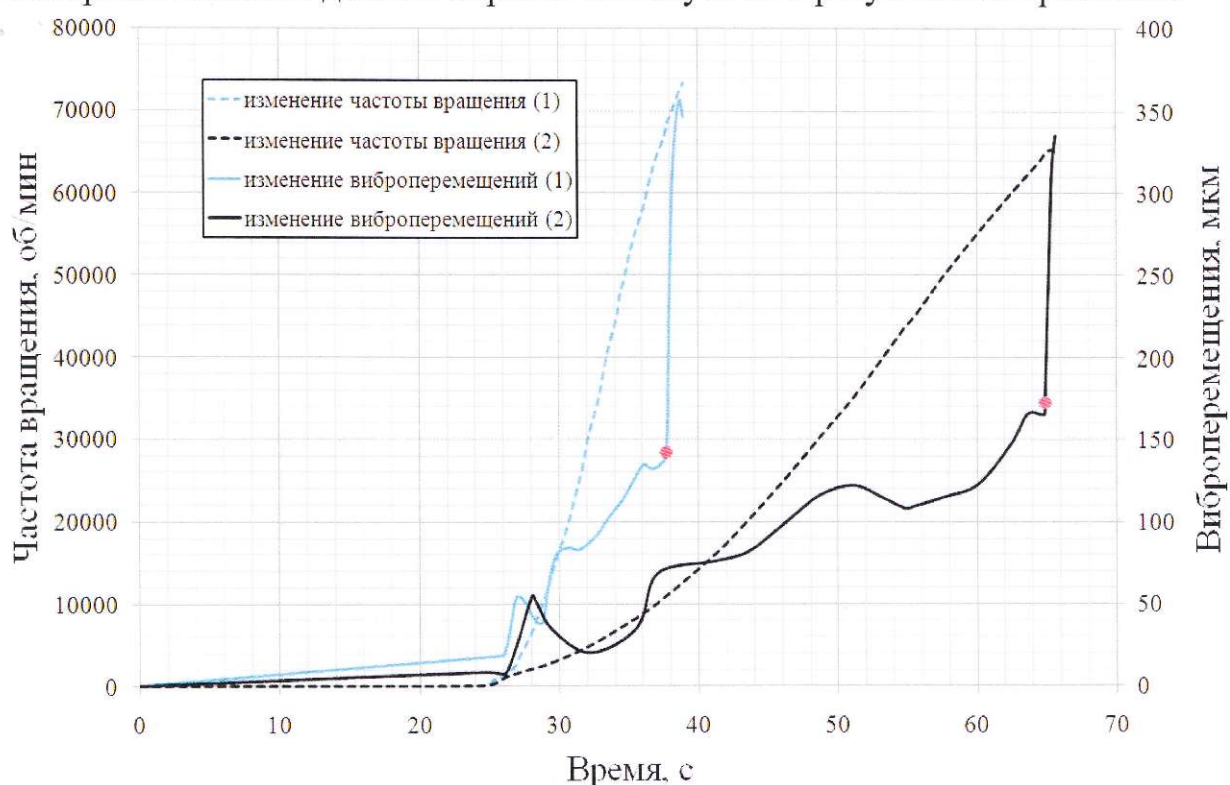


Рис. 16. Результаты стендовых испытаний

Разрушение керамических лопаток происходило в области с максимальным растягивающим напряжением – радиус перехода от контактной грани лопатки к ножке. При отсутствии проставок разрушение происходило также и в области контакта, однако момент разрушения по диаграммам выявить не удалось. Разрушающая частота в области контакта составила 44600 об/мин и была определена теоретически: посредством сопоставления с критическими значениями напряжений смятия в образцах простой формы (экспериментальные данные из главы 2). Отсюда следует целесообразность использования подобных проставок в области контакта металлического диска и керамических лопаток.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена комплексная методика проектирования замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском в перспективных газотурбинных двигателях летательных аппаратов, с учетом особенностей их теплового и механического контакта. Она включает в себя разработку параметризованной модели конструкции замкового соединения в среде Ansys APDL, моделирование её теплонапряженного состояния и оптимизацию по критериям прочности и массы. Данная методика универсальна и может быть использована при изменении формы узла соединения и применении керамик с улучшенными механическими характеристиками. При постановке исследования основное внимание было уделено конструкции соединения типа «ласточкин хвост», а для моделирования температурного и напряженно-деформированного состояния были выбраны два вида керамик: на основе карбида кремния, армированного алмазными частицами «К», и из горячепрессованного нитрида кремния «Н», имеющих высокий уровень механических характеристик и отлаженную технологию производства.

2. Разработаны универсальные методики расчетно-экспериментального определения контактной прочности и контактной термической проводимости, применимые и для других теплонагруженных узлов соединения «керамика-металл» в аэрокосмической технике.

3. Впервые получены экспериментальные данные по контактной прочности и контактной термической проводимости в парах «К»-сталь ЭИ961ш», «Н»-сталь ЭИ961ш».

4. Определен конструктивный облик рабочего колеса турбины высокого давления с керамическими лопатками перспективного газотурбинного двигателя среднемагистрального самолета. Результаты анализа теплонапряженного состояния его замкового соединения на трех типовых режимах («Взлет», «Крейсер», «Земной малый газ») показали, что для обеспечения прочности лопаток с уровнем надёжности $R_a=0,999999$ керамика должна иметь предел прочности на изгиб не менее 800 МПа при модуле Вейбулла более 20, контактная прочность должна быть не менее 170 МПа.

5. Теоретически обоснована конструкция модельного рабочего колеса для определения несущей способности замкового соединения керамических лопаток на режимах нагружения, соответствующих эксплуатационным, а также разработана методика ее стендовых испытаний. Экспериментально подтверждена эффективность применения промежуточных проставок в области контакта металлического диска и керамических лопаток. Предложенная конструкция модельного рабочего колеса также пригодна для ресурсных испытаний с перегрузкой и для испытаний по отбраковке керамических лопаток с низкими характеристиками.

Направлениями дальнейших исследований могут быть: совершенствование моделей исчерпания долговечности керамических лопаток, обусловленной ростом трещин от исходных дефектов, ползучестью, окислением и деградацией свойств материала; обеспечение прочности при вибрационном и ударном воздействии на керамические лопатки; определение рациональных параметров замковых соединений композиционных керамических лопаток с металлическим диском.

Труды по теме диссертации:

1. Резник С.В., Сапронов Д.В. Проектирование замкового соединения керамических лопаток и металлического диска в рабочем колесе газовой турбины // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тезисов докл. Международной научно-технич. конф. Обнинск: ОНПП «Технология», 2013. С. 25. (0,1 п.л./0,07 п.л.)
2. Резник С.В., Сапронов Д.В. Исследование статической прочности замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газовой турбины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №4. С. 3-10. (0,5 п.л./0,3 п.л.)
3. Резник С.В., Сапронов Д.В. Проектирование замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газовой турбины // Известия Высших учебных заведений. Машиностроение: 2014. №9. С. 29-38. (0,7 п.л./0,4 п.л.)
4. Резник С.В., Сапронов Д.В. Проектирование рабочего колеса газовой турбины с использованием керамических лопаток // Вестник СГАУ. 2014. №5(47). С. 222-229. (0,5 п.л./0,3 п.л.)
5. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Saprionov D.V. Design of the Aircraft Gas Turbine Engine Rotor Wheel with Ceramic Blades // Proceedings of Sino-Russian Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. 2014. P. 43. (0,1 п.л./0,04 п.л.)
6. Resnick S.V., Prosuntsov P.V., Saprionov D.V. Investigation of a ceramic vane with a metal disk thermal and mechanical contact in a gas turbine impeller // The European Physical Journal Web of Conferences. 2015. Vol. 82, 01034. (W/P). (0,5 п.л./0,3 п.л.)
7. Сапронов Д.В. Исследование кратковременной прочности замковых соединений керамических лопаток и металлических дисков рабочих колёс газовых турбин // Новые решения и технологии в газотурбостроении: Сб. тезисов докл. Всероссийской научно-технич. конф. молодых учёных и специалистов. М.: ЦИАМ, 2015. С. 266-267. (0,2 п.л./0,2 п.л.)
8. Лепешкин А.Р., Каримбаев К.Д., Сапронов Д.В. Численное исследование влияния теплопроводности на тепловое состояние рабочих

лопаток авиационных двигателей с учётом эксплуатационных факторов // Авиадвигатели XXI века: Сб. тезисов докл. Всероссийской научно-технич. конф. М.: ЦИАМ, 2015. С. 76-77. (0,2 п.л./0,07 п.л.)

9. Сапронов Д.В., Мезенцев М.А., Серветник А.Н. Расчётно-экспериментальное исследование кратковременной прочности замковых соединений керамических лопаток и металлических дисков рабочих колёс газовых турбин // Авиадвигатели XXI века: Сб. тезисов докл. Всероссийской научно-технич. конф. М.: ЦИАМ, 2015. С. 599-600. (0,2 п.л./0,05 п.л.)

10. Sapronov D.V., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Load-Carrying Capability Analysis of the Gas Turbine Engine Dovetail Connection Between Ceramic Blades and Rotor Wheel // Proceedings of Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications. 2015. P.19-20. (0,2 п.л./0,09 п.л.)

11. Исследование теплонапряженного состояния замкового соединения керамических лопаток и металлического диска турбины по полётному циклу перспективного летательного аппарата / А.С. Базунов, А.А. Лаврухин, С.В. Резник, Д.В. Сапронов // Сб. тезисов докл. XLI Академических чтений по космонавтике. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 47. (0,1 п.л./0,05 п.л.)

12. Модель для исследования замковых соединений керамических лопаток газотурбинного двигателя; пат. 155239 Рос. Федерация 2015: МКП G01M13/00 / Авторы и заявители Сапронов Д.В., Серветник А.Н.; патентообладатель ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». (0,9 п.л./0,7 п.л.)