

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОБНАРУЖЕНИЮ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА РАБОЧИХ РЕЖИМАХ

И.К. Андрианов  
М.С. Гринкруг  
М. Кара Балли

ivan\_andrianov\_90@mail.ru  
grin@knastu.ru  
mohamadkarabally@gmail.ru

ФГБОУ ВО «КНАГУ», г. Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация

---

### Аннотация

Предложен подход к обнаружению трещин, возникающих в лопатках газовых турбин при работе авиационных двигателей. Согласно гипотезе исследования, предлагаемая система представляет собой капсулы с веществом, проявляющим ионизирующие свойства при высоких температурах, помещаемые в тело лопатки при ее проектировании. В процессе развития и раскрытия трещины в области капсулы за счет разности давлений снаружи и внутри капсулы происходит выброс ионизирующего вещества в проточную часть турбины, где и регистрируется за счет скачка тока при попадании вещества на датчики. В рамках данного исследования рассмотрены и решены модельные задачи с целью оценить возможности реализации предлагаемого подхода на примере цилиндрической оболочки с заранее созданным прямоугольным вырезом, внутри которой помещалась тонкостенная капсула. Создан стенд для проведения экспериментальных исследований, оснащенный системой контроля сигнала при появлении активного вещества, работающего при температурах, соответствующих газотурбинным двигателям. Проведены экспериментальные исследования щелочных растворов разных концентраций для выявления наиболее перспективного при использовании в качестве ионизирующего вещества. Определены возможности создания давления внутри тонкостенной капсулы, достаточного для разрушения ее оболочки при допустимых ограничениях по толщине. На основании серии численных и натурных экспериментов исследовано влияние ширины созданного выреза в толстостенной оболочке

### Ключевые слова

*Турбинная лопатка, газовая турбина, оболочечный элемент, напряжение, прочность, диагностика повреждений, ионизация*

и толщины оболочки тонкостенной капсулы на Поступила 27.02.2023  
значение давления в ней, необходимого для ее раз- Принята 07.04.2023  
рушения © Автор(ы), 2024

---

*Работа поддержана грантом РФФ № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости»*

**Введение.** Наиболее напряженными деталями в авиационных газотурбинных двигателях являются рабочие и сопловые лопатки турбин. Это обусловлено сложными условиями их работы, к которым относятся высокая температура, вибрации, неравномерность температурного поля лопаток и связанные с ней термические напряжения, а также общий высокий уровень механических нагрузок от центробежных сил и изгибающих моментов. Актуальная проблема в настоящее время заключается в диагностировании трещины в турбинной лопатке до момента ее ускоренного роста в режиме работы газотурбинного двигателя.

Согласно обзору научных работ по проблематике исследования, можно отметить, что вопрос диагностирования повреждений лопаток турбин в режиме полета малоизученный, а вопросы мониторинга трещин в турбинных лопатках, как правило, рассмотрены при условии неработающего двигателя. Оценка защиты газотурбинного двигателя и его частей рассмотрена в [1, 2], применение датчиков для анализа состояния рабочих частей турбины — в [3]. Вопросы экспериментального и численного расчетов повреждений лопаток турбин исследованы в [4, 5]. Поскольку одной из причин развития трещин является усталостное разрушение, важным представляется вопрос прогнозирования роста усталостной трещины в лопатках газовых турбин [6, 7]. Опыт эксплуатации показывает, что эти трещины, как правило, имеют направления, перпендикулярные профилю лопатки. Оценка усталостной прочности конструкции самолета в режиме полета, а также вопросы конечно-элементного анализа с учетом критериев разрушения приведены в [8–10]. Тепловое состояние, применение теплозащитных покрытий лопаток турбин исследованы в [11–15]. Вопросы оптимизации систем охлаждения и форм лопаток рассмотрены в [16–20].

В настоящее время расчет лопаточных аппаратов авиационных газотурбинных двигателей выполняется по критерию длительной прочности материала с учетом необходимых коэффициентов запаса прочности. Распространение трещины занимает достаточно большое время. Обычно лопатка разрушается, когда площадь трещины превышает 40 % площади

сечения профиля лопатки [6]. Последствия разрушения лопаток, как правило, приводят к возникновению аварийной ситуации для самолета. Это делает задачу разработки способа обнаружения трещин в лопатках газотурбинных двигателей самолета во время полета очень актуальной.

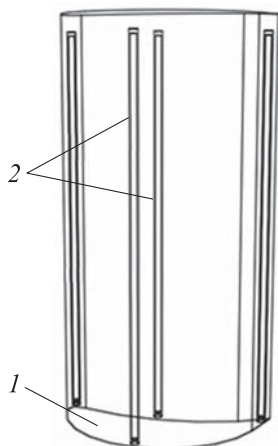
Согласно проведенному анализу, существует проблема диагностирования повреждений лопаток газовых турбин в рабочем режиме. *Цель настоящей работы* — разработка подхода к диагностированию повреждений в турбинной лопатке при нестационарных условиях. Согласно гипотезе исследования, для обнаружения трещин в лопатках авиационных турбин при нестационарных условиях в теле лопатки на этапе ее проектирования размещают тонкостенные капсулы (рис. 1), содержащие активное вещество под давлением, проявляющее ионизирующие свойства при высоких температурах. При возникновении и раскрытии трещины в лопатке вблизи оболочки капсулы под действием разности давлений капсула разрушается, и активное вещество поступает в проточную часть газовой турбины. В выхлопном тракте турбины за последними рядами рабочих лопаток располагаются датчики, которые реагируют на появление ионизирующего вещества, тем самым сигнализируя о наличии повреждений. В проточной части турбины устанавливаются электроды в виде пластин или сеток, к которым приложено напряжение. В этом случае в качестве активного материала предлагается использовать вещество с низким потенциалом ионизации (щелочные или щелочноземельные элементы). При выбросе ионизирующего вещества в проточную часть между электродами возникнет скачок тока, который фиксируется как сигнал.

**Постановка задачи исследования.** Учитывая многообразие факторов, влияющих на механизмы зарождения и распространения трещин в лопатках турбин, а также сложность прогнозирования их развития и определения места локализации, необходимо рассмотреть решение модельных задач в упрощенной постановке. Объекты исследования — это тонкостенная цилиндрическая капсула, помещенная в толстостенную цилиндрическую оболочку с поперечным прямоугольным вырезом (рис. 2), и щелочные растворы, проявляющие ионизирующие свойства.

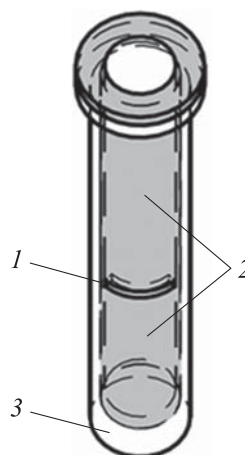
*Допущения и упрощения при проведении исследования.* Поскольку турбинные лопатки находятся под действием растягивающих центробежных сил, на порядок превышающих действие изгибных сил, обусловленных давлением газа, то последние в данном исследовании не учитывались. Соответственно, напряжения, возникающие в теле лопатки постоянного сечения при действии только центробежных сил, не зависят от площади поперечного сечения лопатки [21]:

$$\sigma(r) = \frac{\rho\omega^2}{2}(R^2 - r^2),$$

где  $\sigma$  — растягивающее напряжение;  $\rho$  — плотность;  $\omega$  — угловая скорость вращения;  $R$  — расстояние от оси до периферийного сечения;  $r$  — расстояние от оси до выбранного сечения.



**Рис. 1.** Конструктивная схема лопатки 1 газотурбинного двигателя с размещенными в ней капсулами 2



**Рис. 2.** Конструктивная схема образца с прямоугольным вырезом 1 и тонкостенной капсулой 2, помещенной внутри толстостенной оболочки 3

Ввиду того, что наиболее часто в лопатках турбин встречаются трещины поперечного отрыва, моделирование выреза в толстостенной оболочке проводилось только в поперечном направлении.

Предлагаемый подход может быть использован в системе обнаружения поперечных трещин лопаток турбин, где капсулы с ионизирующим веществом располагаются в продольном направлении. Таким образом, подход не может быть использован для обнаружения трещин в замковой части лопатки.

На основании принятых допущений сформулированы задачи исследования.

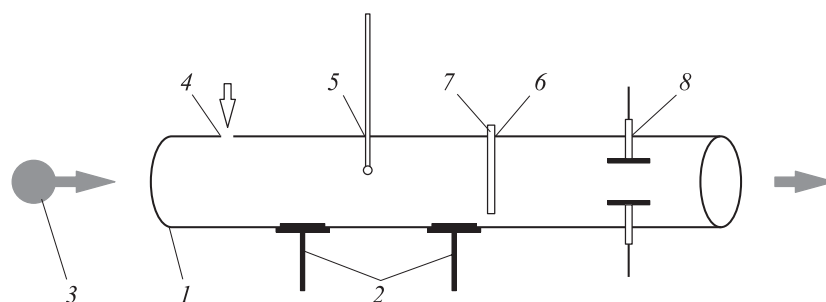
1. Оценить возможность обнаружения ионизирующего вещества в высокотемпературном газовом потоке с помощью созданного стенда для проведения экспериментальных исследований, оснащенного системой контроля сигнала при появлении ионизирующего вещества, работающего при температурах, соответствующих газотурбинным двигателям.

2. Выполнить натурные эксперименты с целью проанализировать значения скачка тока между электродами для различных ионизирующих веществ и концентраций.

3. Оценить возможность создания давления внутри тонкостенной капсулы, достаточного для разрушения ее оболочки, при допустимых ограничениях по ее толщине.

4. Провести численные и натурные эксперименты по оценке разрушающего давления внутри тонкостенной капсулы при различных значениях ширины поперечного прямоугольного выреза (1,1, 1,4 и 1,6 мм) в толстостенной оболочке и различных значениях толщины стенки капсулы (0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 мм).

**Методика исследования.** Разработка схемы экспериментальной установки. Для проведения экспериментов по оценке ионизации веществ в высокотемпературном газовом потоке и разрушающего давления в оболочке разработана схема, приведенная на рис. 3. Основу эксперименталь-



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки:

1 — труба; 2 — опоры; 3 — горелка; 4 — отверстие для впрыскивания активного вещества; 5 — отверстие для термодатчика; 6 — оболочка; 7 — капсула; 8 — электрод

ной установки составляет стальная труба 1 на опорах 2. Для нагрева до высоких температур воздуха, протекающего через трубу, на одном конце трубы установлена бензиновая горелка 3, которая также обеспечивает поток воздуха через трубу. В стенках трубы имеются три отверстия:

– первое 4 предназначено для впрыскивания в трубу ионизирующего вещества;

– во второе 5 помещена термодатчик для измерения температуры потока газа;

– третье служит для установки толстостенной оболочки 6 с вырезом и тонкостенной капсулой 7. В толстостенной цилиндрической оболочке сделан разрез постоянной ширины, моделирующий трещину. В цилиндри-

ческую оболочку вставлена тонкостенная капсула, заполненная насыщенным раствором ионизирующего вещества, который при повышенных температурах представляет собой газовую смесь. Цилиндрическая оболочка с тонкостенной капсулой герметично соединена с манометром высокого давления.

При движении высокотемпературного газового потока в капсуле с ионизирующим веществом создается высокое давление за счет нагрева. Для регистрации появления ионизирующего вещества в конце проточной части размещены два электрода в виде пластин. Схема расположения электродов приведена на рис. 4.

Оценка разрушающего давления внутри тонкостенной капсулы. Для оценки напряженного состояния участка тонкостенной капсулы в области прямоугольного выреза будем считать, что разность давлений  $\Delta p$  внутри и снаружи тонкостенной оболочки вызывает силу, действующую на оболочечный элемент (рис. 5), которая в момент разрушения уравнивается силами, возникающими из-за напряжений по плоскостям среза:

$$\Delta p L h = 2 \tau L t, \quad (1)$$

где  $L, h$  — длина и ширина прямоугольного выреза;  $\tau = \sigma_b/2$  — касательное напряжение,  $\sigma_b$  — предел прочности материала при данной температуре;  $t$  — толщина оболочки капсулы.

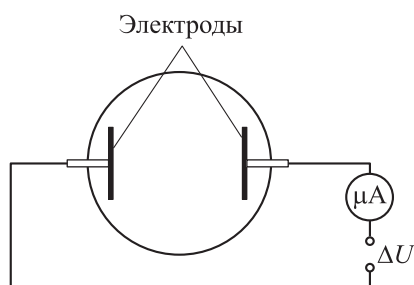


Рис. 4. Схема расположения электродов в проточной части стэнда

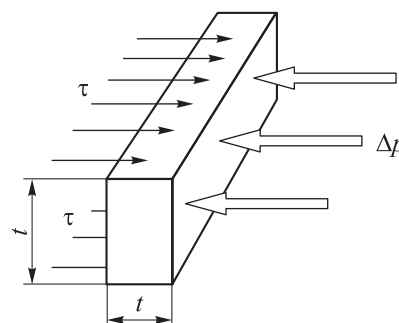


Рис. 5. Расчетная схема элемента тонкостенной оболочки капсулы

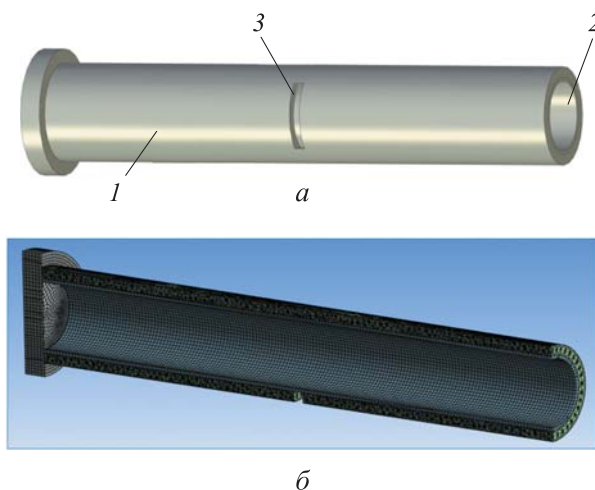
Согласно уравнению (1), давление в тонкостенной капсуле, при котором происходит ее разрушение, определяется как

$$p_k = p + \sigma_b t / h, \quad (2)$$

где  $p$  — атмосферное давление.

Для проверки возможности использования формулы (2) с целью оценить разрушающее давление внутри тонкостенной капсулы необхо-

димо выполнить прочностной анализ капсулы в толстостенной оболочке с прямоугольным вырезом методом конечных элементов. Твердотельная и конечно-элементная модели в программном комплексе Ansys приведены на рис. 6, а, б.



**Рис. 6.** Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели тонкостенной капсулы 2 и толстостенной оболочки 1 с вырезом 3

К внутренней поверхности капсулы прикладывалось давление  $p_k$  и проводилась оценка напряженного состояния на основании интенсивности напряжений  $\sigma_i$ :

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения, возникающие в элементе.

Приложенное давление  $p_k$  внутри капсулы пошагово увеличивалось до тех пор, пока не было выполнено условие  $\sigma_i = \sigma_B$ .

**Результаты исследования.** На первом этапе согласно схемам на рис. 3, 4 была собрана экспериментальная установка для обнаружения ионизирующих веществ в высокотемпературном газовом потоке (рис. 7). При сборке использована термопара типа ТМ-0.1 TDM, предел измерения температуры которой составлял 1000 °С, предварительно отградуированная по термометру в диапазоне температур 0...350 °С. В качестве регистрирующего прибора использован милливольтметр М-105 класса точности 0,5. При тарировке термопары для определения температуры газового потока получено уравнение вида  $T = 12,3x - 26,2$ , где  $x$  — показания милливольтметра.



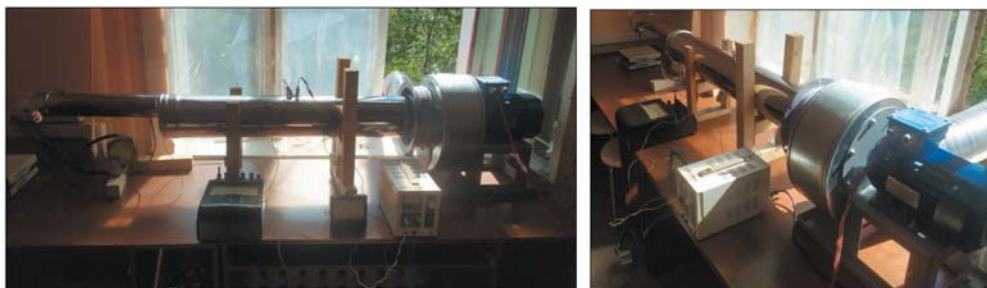


Рис. 7. Установка для проведения натуральных экспериментов

Электроды, расположенные в конце проточной части, изготовлены из латуни в виде пластин площадью  $12,8 \text{ см}^2$ . Разность потенциалов от источника напряжения, приложенную к электродам, можно регулировать от 0 до 5000 В. В цепь электродов включен микроамперметр М-906 с пределом измерения 300 мкА (класса точности 1,5). Во время испытания стенда с герметичной капсулой, помещенной в оболочку без выреза, температура газового потока составила  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , избыточное давление внутри капсулы — 50 МПа.

Для определения вида активного вещества, наиболее пригодного для использования в предложенном подходе для обнаружения повреждений лопаток турбин, в проточную часть стенда при температуре потока газа  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  впрыскивали растворы различных солей. Использованы соли щелочных и щелочноземельных металлов, так как они имеют низкий потенциал ионизации и их легче обнаружить с помощью электрических полей. Эксперимент проведен со следующими веществами: монофосфат калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), сульфат магния ( $\text{MgSO}_4$ ), нитрат кальция ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), гидрокарбонат натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ), хлористый калий ( $\text{KCl}$ ), нитрат калия ( $\text{KNO}_3$ ). Объем впрыскиваемого вещества составлял 2 мл при концентрации раствора 15 г вещества на 100 мл воды. Процесс впрыскивания длился в течение 1 с. Эксперимент повторялся для каждого вещества 7 раз. В течение 2...3 с наблюдалось скачкообразное увеличение тока между электродами с последующим уменьшением тока до первоначального значения. Для различных веществ установлены следующие значения скачка тока между электродами:  $\Delta I = 0,5 \text{ мкА}$  ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ),  $0,8 \text{ мкА}$  ( $\text{MgSO}_4$ ),  $3 \text{ мкА}$  ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ),  $3,5 \text{ мкА}$  ( $\text{NaHCO}_3$ ),  $4 \text{ мкА}$  ( $\text{KCl}$ ),  $16 \text{ мкА}$  ( $\text{KNO}_3$ ).

Далее выполнено исследование по влиянию температуры газового потока на значение скачка тока в цепи между электродами. При температурах газового потока  $600$ ,  $700$  и  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  в проточную часть стенда впрыс-



квивали насыщенный раствор наиболее активного вещества  $KNO_3$ , значения скачка тока  $\Delta I$  между электродами при этом составляли 21, 500 и 2300 мкА соответственно.

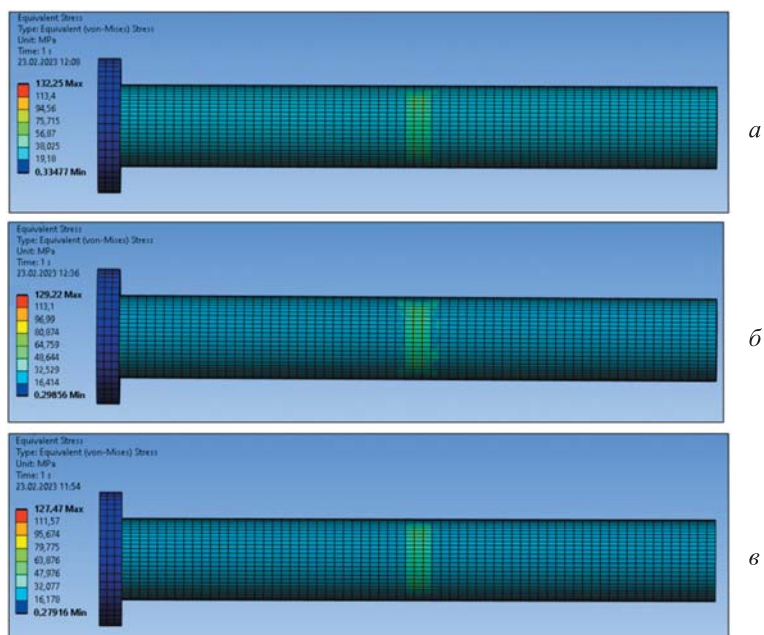
На втором этапе исследования проведены аналитический расчет согласно (2) и численный расчет с использованием метода конечных элементов разрушающего давления внутри тонкостенной капсулы, помещенной в толстостенную оболочку с прямоугольным вырезом. В качестве материала толстостенной оболочки с вырезом использована сталь марки X5. Геометрические характеристики толстостенной оболочки следующие: наружный и внутренний диаметры 14 и 11 мм, толщина стенки 1,5 мм, длина оболочки 80 мм (рис. 8). В толстостенных оболочках сделаны вырезы длиной 9,3 мм и шириной 1,1, 1,4 и 1,6 мм. Тонкостенные капсулы изготовлены из алюминиевого сплава АК8, толщина стенки капсулы составляла 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 мм.



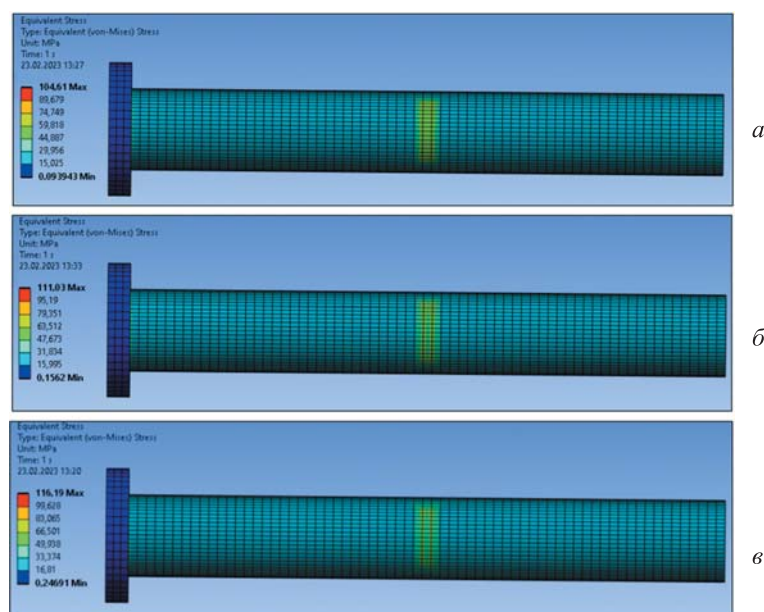
**Рис. 8.** Реальный образец оболочки с прямоугольным вырезом и помещенной внутрь тонкостенной капсулой для проведения натуральных экспериментов

В результате конечно-элементного расчета определено напряженное состояние в тонкостенной капсуле, соответствующее разрушению. Разрушающие давления в тонкостенной капсуле с постоянной толщиной стенки 0,5 мм при изменении ширины прямоугольного выреза в толстостенной оболочке и в капсуле, помещенной в оболочку с прямоугольным вырезом шириной 1,1 мм, при изменении толщины стенок приведены на рис. 9 и 10 (для наглядности наружная толстостенная оболочка скрыта). Видно наличие концентратора напряжений, достигающих предела прочности (50 МПа) в области расположения прямоугольного выреза толстостенной оболочки.

При проведении серии натуральных экспериментов по определению разрушающего давления в капсуле, помещенной в толстостенную оболочку с вырезом (см. рис. 8), достижение необходимого значения давления фиксировалось по манометру. При разрыве тонкостенной оболочки капсулы с активным веществом давление в ней резко падало до значения атмосферного давления. Одновременно с этим фиксировался скачок тока в цепи электродов.

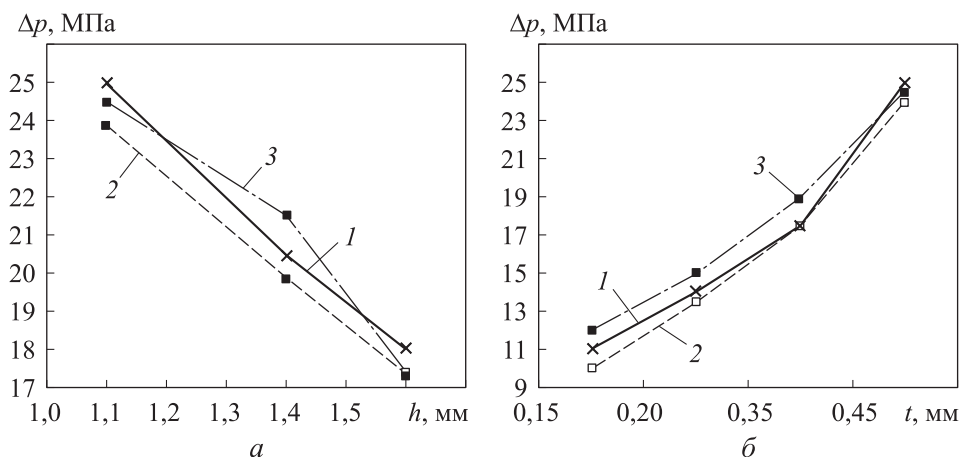


**Рис. 9.** Разрушающие давления в тонкостенной капсуле с постоянной толщиной стенки 0,5 мм при ширине прямоугольного выреза в толстостенной оболочке, равной 1,1 (*a*), 1,4 (*б*) и 1,6 мм (*в*)



**Рис. 10.** Разрушающие давления в тонкостенной капсуле с постоянной толщиной стенки 0,5 мм, помещенной в толстостенную оболочку с прямоугольным вырезом шириной 1,1 мм, при толщине стенки капсулы 0,2 (*a*), 0,3 (*б*) и 0,4 мм (*в*)

По результатам натурных экспериментов в целях сравнительного анализа на рис. 11 приведены зависимости разрушающего давления в капсулах от ширины выреза в толстостенной оболочке и толщины стенки капсулы.



**Рис. 11.** Зависимости разрушающего давления в капсулах от ширины выреза в толстостенной оболочке (а) и толщины стенки капсулы (б):

1 — натуральный эксперимент; 2 — аналитический расчет по (2);

3 — расчет методом конечных элементов

**Обсуждение результатов.** Согласно результатам натурных экспериментов лучшие ионизирующие свойства в высокотемпературном газовом потоке выявлены при использовании раствора нитрата калия  $KNO_3$ , что подтверждается высоким скачком тока ( $\Delta I = 16$  мкА) в системе обнаружения активных веществ. Исследована зависимость уровня сигнала от температуры газового потока и концентрации активного вещества: с увеличением этих факторов уровень сигнала растет.

Результаты аналитических, численных расчетов разрушающего давления в тонкостенной капсуле с достаточной точностью (менее 15 %) совпадают с результатами натурных экспериментов (см. рис. 11). Согласно результатам исследования, разрушающее давление, создаваемое внутри капсулы, увеличивается при уменьшении ширины прямоугольного выреза в наружной толстостенной оболочке, а также при увеличении толщины стенки капсулы.

**Заключение.** Решение модельных задач позволило сделать следующие выводы:

– предложенная система регистрации вещества, проявляющего ионизирующие свойства, в проточной части турбины является работоспособ-

ной и уверенно обнаруживает и регистрирует достаточно малое его количество;

– экспериментально доказана возможность достижения необходимого давления внутри тонкостенных капсул, достаточного для разрушения оболочки капсулы при появлении трещины вблизи капсулы.

Предложенный подход для обнаружения повреждений лопаток газотурбинных двигателей при нестационарных условиях является перспективным и может быть использован при разработке новых технологий в проектировании турбинных лопаток с системой обнаружения трещин. Результаты исследования в будущем могут повысить эффективность мониторинга состояния турбинных лопаток авиационных газотурбинных двигателей, тем самым повышая безопасность полетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комов А.А. Схема шасси самолета и защищенность двигателей. *Вестник МАИ*, 2022, т. 29, № 1, с. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-7-18>
- [2] Grinkrug M.S., Kara Balli M., Tkacheva J.I., et al. Experimental study for choosing an active substance in a microcracks detection system in the turbine blade. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1111, art. 012020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012020>
- [3] Ignatovich S.R., Menou A., Karuskevich M.V., et al. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2013, vol. 65, pp. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.05.004>
- [4] Сиротин Н.Н., Нгуен Т.Ш. Методика численного моделирования эксплуатационных повреждений рабочих лопаток ротора компрессора низкого давления турбореактивного двигателя. *Вестник МАИ*, 2021, т. 28, № 4, с. 131–150. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-4-131-150>
- [5] Szczepankowski A., Szymczak J. Initiation of damage to the hot part of aircraft turbine engines. *Research Works of AFIT*, 2016, vol. 38, no. 1, pp. 61–74.
- [6] Zhang Z., Yang G., Hu K. Prediction of fatigue crack growth in gas turbine engine blades using acoustic emission. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, art. 1321. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051321>
- [7] Нгуен Нгок Т., Коленко Г.С. Анализ механики разрушения и работоспособности лопатки газовой турбины при наличии трещины. *Материаловедение. Энергетика*, 2020, т. 26, № 3, с. 56–69. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26304>
- [8] Feng J., Geng R., Wu G., et al. AE characteristic analysis in aircraft fatigue test under flight loading condition. *J. Mech. Eng.*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 6–11.
- [9] Geng H., Zhou X., Yang B., et al. Design and simulation of gas turbine blade fatigue testing rig driven by electric magnet. *IEEE ICMA*, 2017, pp. 2034–2038. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8016131>

- [10] Семенов А.С., Грищенко А.И., Колотников М.Е. и др. Конечно-элементный анализ термоциклической прочности лопаток газовых турбин. Часть 1. Модели материала, критерии разрушения, идентификация параметров. *Вестник УГАТУ*, 2019, т. 23, № 1, с. 70–81.
- [11] Маскайкин В.А., Махров В.П. Исследование теплопроводности многослойной теплоизоляционной обшивки летательных аппаратов в условии полета. *Вестник МАИ*, 2021, т. 28, № 4, с. 118–130.  
DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-4-118-130>
- [12] Beghinia M., Bertinia L., Santusa C., et al. High temperature fatigue testing of gas turbine blades. *Procedia Struct. Integr.*, 2017, vol. 7, pp. 206–213.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.079>
- [13] Кортиков Н.Н. Неопределенности при моделировании теплового состояния охлаждаемой лопатки газовой турбины. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*, 2019, т. 25, № 4, с. 31–41.  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.25403>
- [14] Li B., Fan X., Li D., et al. Design of thermal barrier coatings thickness for gas turbine blade based on finite element analysis. *Math. Probl. Eng.*, 2017, vol. 3, art. 147830. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2147830>
- [15] Andrianov I.K., Grinkrug M.S., Vakuluk A.A. Numerical calculation of the heat sink parameters of the shell turbine vanes at the modeling of the heat-protective coating with a different number of layers. *Current problems and ways of industry development: equipment and technologies*, 2021, vol. 200, pp. 37–46.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_5)
- [16] Vikulin A.V., Yaroslavtsev N.L., Zemlyanaya V.A. Estimation of efficiency of the cooling channel of the nozzle blade of gas-turbine engines. *Therm. Eng.*, 2018, vol. 65, no. 2, pp. 88–92. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601517120102>
- [17] Соловьев М.С. Обзор конструкторских мероприятий по повышению эффективности пленочного охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин перспективных авиационных ГТД. *Вестник РГТА имени П.А. Соловьева*, 2021, № 4 (59), с. 30–36.
- [18] Kvasha Yu.A., Zinevych N.A., Petrushenko N.V. Features of blade shape variation in the aerodynamic improvement of aircraft gas-turbine engine compressors. *Tech. Mech.*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/itm2022.02.017>
- [19] Lepeshkin A., Remchukov S., Yaroslavtsev N., et al. Test technique for turbine cooled blades of gas turbine engines. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1925, art. 012086.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012086>
- [20] Cheng J., Dong Z., Zhao S., et al. Research on aerodynamic optimization method of multistage axial compressor under multiple working conditions based on phased parameterization strategy. *Math. Probl. Eng.*, 2021, vol. 1.  
DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5518507>
- [21] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М., Машиностроение, 1993.

**Андрианов Иван Константинович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Авиастроение» ФГБОУ ВО «КНАГУ» (Российская Федерация, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, д. 27).

**Гринкруг Мирон Соломонович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» ФГБОУ ВО «КНАГУ» (Российская Федерация, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, д. 27).

**Кара Балли Мохамад** — аспирант кафедры «Авиастроение» ФГБОУ ВО «КНАГУ» (Российская Федерация, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, д. 27).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Андрианов И.К., Гринкруг М.С., Кара Балли М. Разработка подхода к обнаружению трещин в лопатках авиационных газотурбинных двигателей на рабочих режимах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 4–20. EDN: AOJTEO

**DEVELOPMENT OF APPROACH TO DETECTING CRACKS  
IN THE AVIATION GAS TURBINE ENGINE BLADES  
IN THE OPERATION MODES**

**I.K. Andrianov**  
**M.S. Grinkrug**  
**M. Kara Balli**

ivan\_andrianov\_90@mail.ru  
grin@knastu.ru  
mohamadkarabally@gmail.ru

**Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure,  
Russian Federation**

---

**Abstract**

The paper proposes an approach to detecting cracks that appear in the gas turbine blades during the aircraft engine operation. According to the research hypothesis, the proposed system consists of capsules with a substance exhibiting the ionizing properties at high temperatures, which are positioned in the blade body during its design. During the crack development and opening in the capsule area, the ionizing substance is released due to the pressure difference outside and inside the capsule into the turbine flow part, where it is registered because of a current jump with the substance hitting the sensors. Part of this study was devoted to considering and solving the model problems to assess possibilities of implementing the proposed approach using the example of a cylindrical shell with the pre-created rectangular cutout, where

**Keywords**

*Turbine blade, gas turbine,  
shell element, stress, strength,  
damage diagnostics, ionization*



a thin-walled capsule was positioned. A bench was created to conduct the experimental research; it was equipped with a signal monitoring system to detect the active substance operating at temperatures corresponding to the gas turbine engines. Alkaline solutions of different concentrations were experimentally studied to identify those most promising ones and use them as the ionizing substance. Possibilities were found to create pressure inside a thin-walled capsule sufficient to destroy its shell following acceptable restrictions on its thickness. Based on a series of numerical and full-scale experiments, influence of the width of the created cutout in a thick-walled shell and the thickness of the shell of a thin-walled capsule on the pressure level in it required for its destruction was studied

Received 27.02.2023

Accepted 07.04.2023

© Author(s), 2024

---

*The work was supported by the Russian Science Foundation Grant no. 22-79-10114 “Development of a system for diagnosing damage to turbine blades and a method for optimizing heat removal under thermal fatigue conditions”*

## REFERENCES

- [1] Komov A.A. Aircraft landing gear scheme and engine protection. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 7–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-7-18>
- [2] Grinkrug M.S., Kara Balli M., Tkacheva J.I., et al. Experimental study for choosing an active substance in a microcracks detection system in the turbine blade. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1111, art. 012020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1111/1/012020>
- [3] Ignatovich S.R., Menou A., Karuskevich M.V., et al. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2013, vol. 65, pp. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.05.004>
- [4] Sirotin N.N., Nguen T.Sh. Numerical simulation technique for working blades operational damages of turbojet low-pressure compressor rotor. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 131–150 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-4-131-150>
- [5] Szczepankowski A., Szymczak J. Initiation of damage to the hot part of aircraft turbine engines. *Research Works of AFIT*, 2016, vol. 38, no. 1, pp. 61–74.
- [6] Zhang Z., Yang G., Hu K. Prediction of fatigue crack growth in gas turbine engine blades using acoustic emission. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 5, art. 1321. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051321>

- [7] Nguen Ngok T., Kolenko G.S. Analysis of the fracture mechanics and workability of a gas turbine blade in the presence of a crack. *Materialovedenie. Energetika* [Materials Science. Power Engineering], 2020, vol. 26, no. 3, pp. 56–69 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26304>
- [8] Feng J., Geng R., Wu G., et al. AE characteristic analysis in aircraft fatigue test under flight loading condition. *J. Mech. Eng.*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 6–11.
- [9] Geng N., Zhou X., Yang B., et al. Design and simulation of gas turbine blade fatigue testing rig driven by electric magnet. *IEEE ICMA*, 2017, pp. 2034–2038. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8016131>
- [10] Semenov A.S., Grishchenko A.I., Kolotnikov M.E., et al. Finite-element analysis of thermal fatigue of gas turbine blades. Part 1. Material models, failure criteria, parameter identification. *Vestnik USATU*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 70–81 (in Russ.).
- [11] Maskaykin V.A., Makhrov V.P. Thermal conductivity research of the aircraft heat-insulating skin under flight conditions. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2021, vol. 28, no. 4, pp. 118–130 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-4-118-130>
- [12] Beghinia M., Bertinia L., Santusa C., et al. High temperature fatigue testing of gas turbine blades. *Procedia Struct. Integr.*, 2017, vol. 7, pp. 206–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.079>
- [13] Kortikov N.N. Uncertainties in modeling the thermal state of cooled gas turbine blade. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg Polytechnical University. Journal of Engineering Sciences and Technology], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 31–41 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.25403>
- [14] Li B., Fan X., Li D., et al. Design of thermal barrier coatings thickness for gas turbine blade based on finite element analysis. *Math. Probl. Eng.*, 2017, vol. 3, art. 147830. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2147830>
- [15] Andrianov I.K., Grinkrug M.S., Vakuluk A.A. Numerical calculation of the heat sink parameters of the shell turbine vanes at the modeling of the heat-protective coating with a different number of layers. *Current problems and ways of industry development: equipment and technologies*, 2021, vol. 200, pp. 37–46. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_5)
- [16] Vikulin A.V., Yaroslavtsev N.L., Zemlyanaya V.A. Estimation of efficiency of the cooling channel of the nozzle blade of gas-turbine engines. *Therm. Eng.*, 2018, vol. 65, no. 2, pp. 88–92. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601517120102>
- [17] Solovyev M.S. Review of engineering measures to improve efficiency of film cooling of high-temperature gas turbine blades of advanced aircraft GTE. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solovyeva* [Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2021, no. 4 (59), pp. 30–36 (in Russ.).
- [18] Kvascha Yu.A., Zinevych N.A., Petrushenko N.V. Features of blade shape variation in the aerodynamic improvement of aircraft gas-turbine engine compressors. *Tech. Mech.*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/itm2022.02.017>

[19] Lepeshkin A., Remchukov S., Yaroslavtse N., et al. Test technique for turbine cooled blades of gas turbine engines. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1925, art. 012086.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1925/1/012086>

[20] Cheng J., Dong Z., Zhao S., et al. Research on aerodynamic optimization method of multistage axial compressor under multiple working conditions based on phased parameterization strategy. *Math. Probl. Eng.*, 2021, vol. 1.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5518507>

[21] Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost detaley mashin [Strength analysis of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993.

**Andrianov I.K.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aircraft Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Lenina prospekt 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013 Russian Federation).

**Grinkrug M.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Thermal Power Plants, Komsomolsk-na-Amure State University (Lenina prospekt 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013 Russian Federation).

**Kara Bally M.** — Post-Graduate Student, Department of Aircraft Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Lenina prospekt 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Andrianov I.K., Grinkrug M.S., Kara Balli M. Development of approach to detecting cracks in the aviation gas turbine engine blades in the operation modes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 4–20 (in Russ.). EDN: AOJTEO