

ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТРЕЩИН В ГАЗОТУРБИННЫХ ЛОПАТКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ

© 2024 г. А.О. Чулков^{1,*}, В.П. Вавилов¹, О.М. Жуков²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

²ПАО «ОДК-Сатурн»,

Россия 152903 Рыбинск, пр-т Ленина, 163

E-mail: *chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 16.04.2024; после доработки 03.05.2024

Принята к публикации 06.05.2024

Описаны результаты неразрушающего контроля лопатки турбины из жаропрочного сплава с керамическим покрытием методом теплового контроля с ультразвуковой (УЗ) стимуляцией. Цель исследования заключалась в определении возможностей метода по обнаружению трещин в лопатке турбины и ее керамическом покрытии. Обработку термограмм проводили методом анализа главных компонент, который позволяет «подчеркнуть» дефектные отметки. Полученные данные показали хорошее соответствие результатам капиллярного неразрушающего контроля при значительно меньшем времени проведения испытания. Продемонстрирована особенность теплового контроля с ультразвуковой стимуляцией при обнаружении сомкнутых трещин керамического покрытия и трудноулавливаемых подповерхностных трещин.

Ключевые слова: тепловой контроль, ультразвуковая стимуляция, ультразвуковая инфракрасная термография, дефект, трещина, лопатка турбины.

THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF CRACKS IN TURBINE BLADES BY USING ULTRASONIC STIMULATION

© 2024 A.O. Chulkov^{1,*}, V.P. Vavilov¹, O.M. Zhukov²

¹National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia 634050 Tomsk, Lenin Av., 30

²UEC-Saturn PJSC,

Russia 152903 Rybinsk, Lenin Av., 163

E-mail: *chulkovao@tpu.ru

The results of nondestructive testing (NDT) of a turbine blade made of a heat resistant alloy with a ceramic coating were obtained by using ultrasonic infrared (IR) thermography. The purpose of the study was to determine possibilities of this NDT technique in detecting cracks in the blade and the coating. Image processing was performed by using principal component analysis, which allows to underline defect indications in IR images. The obtained test results were in a good accordance with the results obtained by means of penetrants with a considerably shorter inspection time. Potentials of IR ultrasonic thermography in the detection of “kissing” cracks and cracks located in difficult to reach sites was demonstrated.

Keywords: thermal testing, ultrasonic stimulation, ultrasonic infrared thermography, defect, crack, turbine blade.

DOI: 10.31857/S0130308224040052

ВВЕДЕНИЕ

Использование механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты для стимуляции тепловыделения дефектов в комбинации с регистрацией тепловых полей с помощью инфракрасных (ИК) камер было предложено в 1970-х годах Хеннеке и др. [1]. Соответствующий способ неразрушающего контроля (НК) в зарубежной литературе получил несколько названий: ультразвуковая ИК-термография, акустическая термография, термоакустика с использованием упругих волн, вибротермография, а также метод VibroIR (торговая марка) [1—7]. В России такой способ называют тепловым контролем с ультразвуковой стимуляцией или термоакустическим контролем [8, 9]. Несмотря на различия в названиях, во всех случаях стимуляцию тепловыделения дефектов осуществляют механическими колебаниями со звуковой или УЗ частотой с помощью источника, прижимаемого к поверхности объекта контроля. Такие колебания приводят к локальному повышению температуры в зонах дефектов вследствие преобразования механической энергии в тепловую в результате внутреннего трения, пластической деформации,

механического гистерезиса и эффекта термоупругости. Механизмы повышения температуры в зоне дефектов при термоакустическом контроле до сих пор составляют предмет дискуссии [4, 8—15].

Характерными особенностями метода являются:

- проведение испытаний в реальном времени и на сравнительно большой площади вокруг точки УЗ стимуляции (до $0,25 \text{ м}^2$) [10];
- отсутствие нагрева бездефектной области материала в ходе испытаний, что повышает вероятность обнаружения малых дефектов, генерирующих слабые температурные сигналы;
- возможность избирательного обнаружения трудно выявляемых другими способами «спящих» дефектов, в которых возникает интенсивное выделение тепла;
- прямая зависимость предельных размеров и глубины выявляемых дефектов от мощности УЗ стимуляции; однако повышение мощности стимуляции может привести к повреждению объектов контроля в точке ввода ультразвуковых колебаний.

УЗ возбуждение при реализации термоакустического метода может быть непрерывным, модулированным или импульсным, в соответствии с чем различают синхронный и импульсный режимы, а также ультразвуковую стимуляцию с использованием меняющейся частоты акустического сигнала [1, 10, 11, 14, 15].

В 1990-х годах Фавро и др. из Университета Уэйна (США) опубликовали результаты исследований по выявлению трещин в металлических образцах при импульсном УЗ возбуждении [5, 6]. В качестве источника УЗ стимуляции был использован излучатель фирмы Branson, генерировавший импульсы мощностью до 1 кВт и длительностью от 30 до 200 мс на несущей частоте 20 кГц. Ультразвук вводили в объект контроля через иммерсионную пасту и волновод в виде стального диска диаметром 13 мм.

В Национальной Ливерморской лаборатории (США) термоакустический контроль был использован для контроля качества сварных швов в изделиях сложной геометрической формы [7]. Дефектные швы характеризовались специфическими температурными сигнатурами, возникавшими под действием УЗ импульсов мощностью до 300 кВт и длительностью 100 мс (при несущей частоте 30 кГц). Преимуществом данного метода контроля была слабая зависимость результатов от положения точки УЗ возбуждения, а недостатком — возможность инициации новых дефектов в результате ввода столь мощного ультразвука. Теми же исследователями было выполнено сравнение возможностей радиографии, классического УЗ контроля и теплового контроля с ультразвуковой стимуляцией при выявлении дефектов в панели космического челнока, которая была выполнена из 36-слойного углепластикового композита, покрытого карбидом кремния.

Исследователи из Университета Айовы (США) применили широкодиапазонное УЗ возбуждение сравнительно низкой мощности с плавающей несущей частотой [16—18]. Результаты исследований показали, что УЗ стимуляция низкой мощности способна обеспечить регистрируемые изменения температуры благодаря эффекту внутреннего трения в микронеоднородностях (при температурной чувствительности тепловизоров до 20 мК). Использование качающейся несущей частоты акустического сигнала позволило определить резонансные частоты различных дефектов.

Следуя этой концепции, Солодов и Буссе из Штуттгартского Университета (Германия) выдвинули идею локального резонанса дефектов с целью повышения чувствительности термоакустического метода при использовании маломощных УЗ излучателей [19]. При возникновении локального резонанса акустическая энергия эффективно преобразуется дефектом в тепловую энергию. Аналогичная методика была предложена Паем и Адамсом в 1981 г. при обнаружении сдвиговых трещин в стекло- и углепластиковых композитах путем возбуждения резонансных вибраций [20].

Для проведения НК термоакустическим методом наиболее широко используют мощные УЗ преобразователи, работающие на определенной частоте (от 22 до 100 кГц). Этому способствует коммерческая доступность и удобство эксплуатации соответствующих УЗ излучателей. В стандартных испытаниях волновод УЗ преобразователя прижимают к объекту контроля с определенным усилием. Однако такой контакт может быть нестабильным в процессе ввода колебаний, что может приводить к получению плохо воспроизводимых температурных откликов дефектов. Для преодоления этого недостатка используют оснастки, надежно закрепляющие объект контроля и удерживающие излучатель УЗ колебаний.

В качестве УЗ преобразователей для задач термоакустического НК применяют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) или магнитострикционные преобразователи (МП) [21]. Применение МП в качестве источника УЗ стимуляции позволяет преобразовывать до нескольких киловатт электрической мощности аппаратуры с выходным сигналом фиксированной частоты около 22 кГц. Пьезоэлектрические преобразователи, используемые в термоакустиче-

ском контроле, также имеют свою резонансную частоту, в пределах которой их использование становится максимально эффективным.

В Томском политехническом университете (ТПУ) исследования по тепловому контролю с УЗ стимуляцией были начаты в 2010 г. на базе магнитострикторов [9, 22] и первоначально были связаны с НК ударных повреждений углепластиковых и углерод-углеродных композитов, в том числе в комбинации с классическим тепловым контролем [11, 13, 14, 21—23]. В частности, было определено, что мощность, выделяющаяся в зонах ударного повреждения в углепластике, составляет несколько десятков мВт [23].

В последние годы исследования ТПУ были сосредоточены на обнаружении трещин в керамических покрытиях и лопатках турбин, а также оценке возможностей термоакустического контроля применительно к лопаткам, изготовленным из композитов. В настоящей статье приведены результаты термоакустического контроля лопатки турбины, полученные с использованием МП.

ОБЪЕКТ КОНТРОЛЯ

На рис. 1 показана лопатка с наработкой в составе турбины ГТД, выполненная из жаропрочного никелевого сплава с керамическим покрытием. Лопатка прошла капиллярный контроль, обнаруживший ряд выходящих на поверхность трещин. Целью термоакустического контроля было подтверждение результатов капиллярного контроля и выявление возможных трещин в пере лопатки, находящихся под керамическим покрытием.

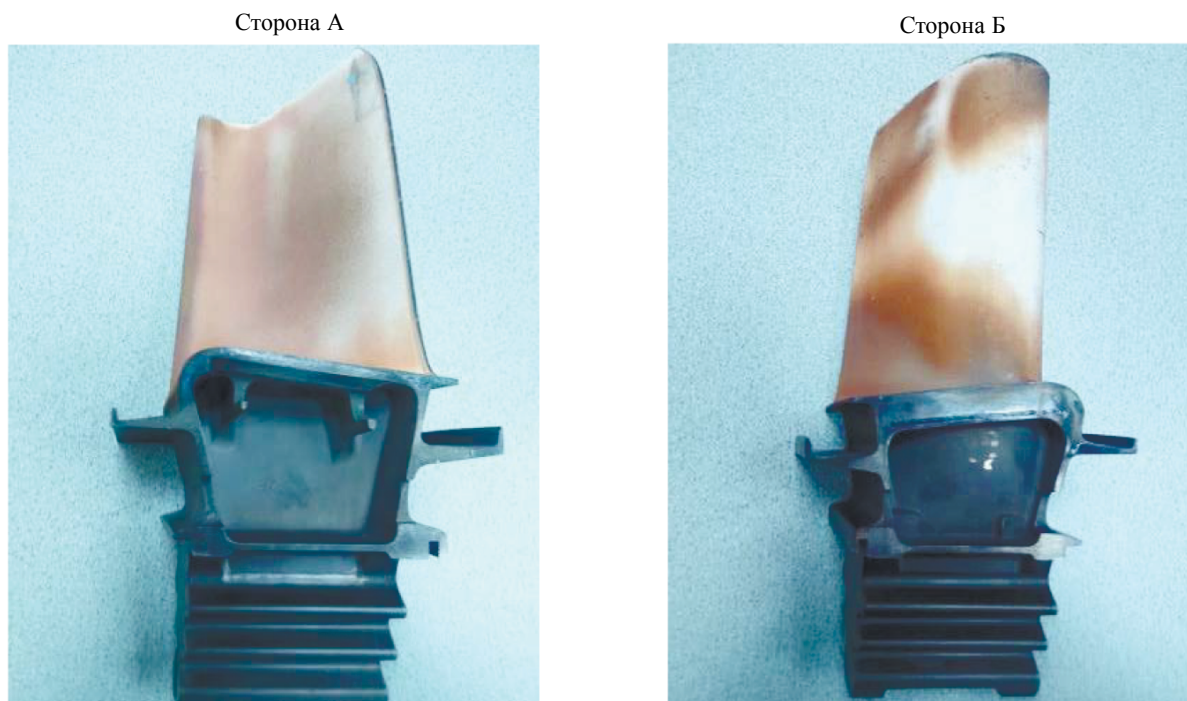


Рис. 1. Лопатка турбины ГТД с керамическим покрытием после наработки.

Турбинная лопатка является особо ответственной деталью, поэтому контролю ее состояния в ходе работы следует уделить особое внимание. В процессе эксплуатации на пере лопатки могут образовываться такие дефекты, как трещины и отслоения керамического покрытия. Наибольшую опасность представляют трещины, поскольку из керамического покрытия они могут распространиться в материал лопатки, что впоследствии может привести к ее разрушению [24].

Выявление трещин капиллярным контролем (набор ЛЮМ1-ОВ) имеет некоторые трудности, поскольку керамическое покрытие изначально имеет пористую структуру, а в процессе эксплуатации в результате температурно-эрозионного воздействия на лопатку поверхность покрытия может становиться грубее.

Таким образом, трещины в керамическом покрытии являются недопустимым дефектом. Выявление трещин традиционным капиллярным методом является длительным процессом. Интерпретация результатов капиллярного контроля так же усложняется вследствие фонового свечения всей поверхности пера лопатки, что подчеркивает интерес к изучению термоакустического метода неразрушающего контроля, исключающего наличие «ложных» засветок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Типичная экспериментальная установка для термоакустического контроля (см. схему установки на рис. 2) состоит из УЗ преобразователя, который для ввода механических колебаний прижимают к объекту контроля, ИК-камеры, с помощью которой регистрируют температурное поле объекта контроля, и компьютера, на который передают данные для их дальнейшей обработки и анализа качества изделия на наличие дефектов.

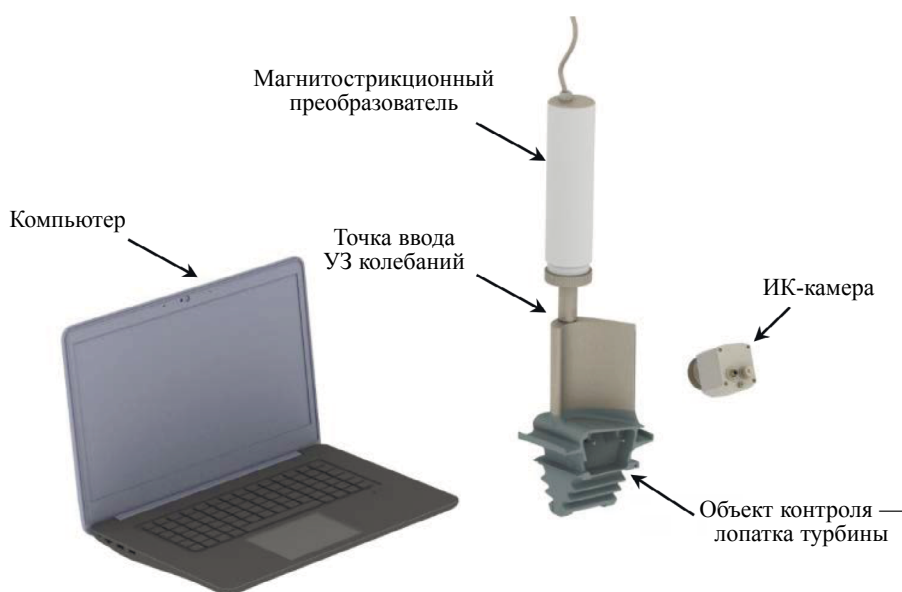


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки термоакустического контроля.

В проведенных исследованиях в качестве источника УЗ стимуляции использовали МП с рабочей частотой 22 кГц и соответствующий генератор с потребляемой мощностью 300 Вт. В качестве ИК-камеры использовали тепловизионный модуль Optiris PI 450 с разрешением 382×288 точек и температурной чувствительностью 40 мК. Управление процедурой контроля и обработку результатов проводили на компьютере с использованием отечественного программного обеспечения ThermoFit Pro (ТПУ).

В результате контроля и обработки данных были получены ИК-термограммы поверхностей лопатки при УЗ стимуляции. Ниже приведены характерные термограммы с расшифровкой наблюдаемых тепловых аномалий, представляющих собой локальные теплые зоны на фоне «холодного» изделия.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ

На рис. 3 приведены фотография процесса УЗ стимуляции лопатки и соответствующая термограмма. Стимуляцию проводили в течение 10 с при частоте записи термограмм 10 Гц. В результате были выявлены три зоны повышения температуры, которые обозначены Д1, Д2, Д3 и могут быть интерпретированы как дефекты керамического покрытия.

Локальная теплая зона в нижней части пера лопатки (обозначена Ш-шум) соответствует контакту лопатки с подложкой.

Анализ температурных профилей рис. 4 показывает, что зоны Д2 и Д3 ведут себя одинаковым образом, а температура в них возрастает на 2,1—2,3 °С относительно начальной температуры в процессе УЗ стимуляции. Следует отметить, что после выключения работы магнитоэлектрического преобразователя температура в зонах дефектов Д2 и Д3 продолжала незначи-

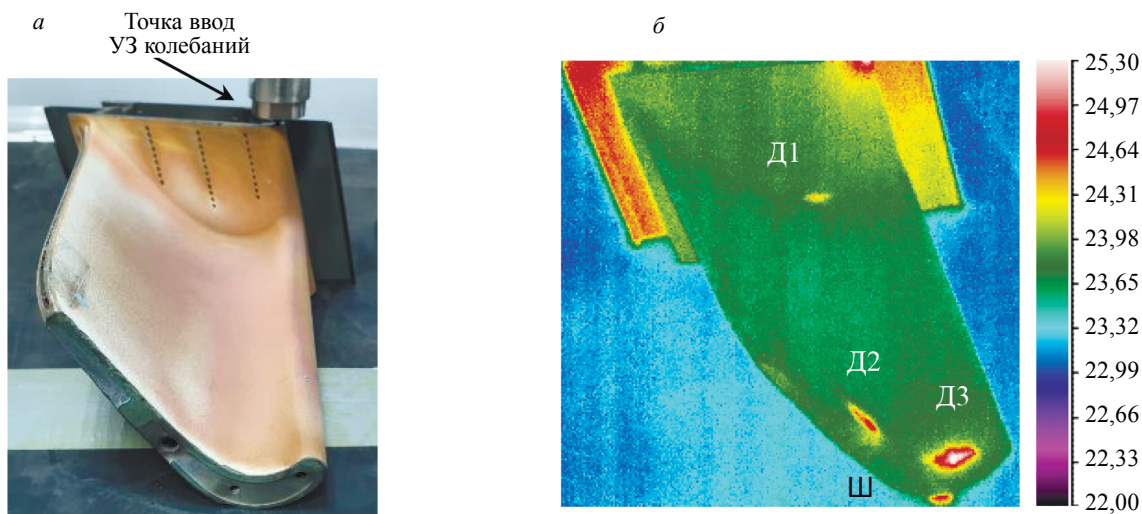


Рис. 3. Результат термоакустического контроля стороны А лопатки турбины (точка ввода УЗ колебаний № 1): лопатка турбины при УЗ стимуляции (а); термограмма лопатки турбины с выраженными температурными аномалиями (б).

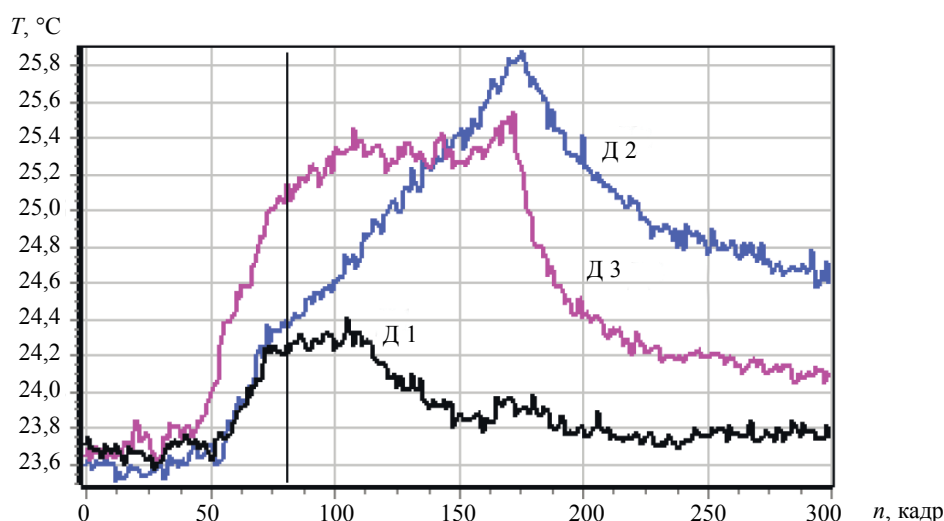


Рис. 4. Изменение температуры во времени в зонах Д1, Д2, Д3 при УЗ стимуляции лопатки турбины в точке № 1.

тельно расти, что может свидетельствовать о «всплывании» температурного сигнала дефекта, расположенного под керамическим покрытием. Подобная задержка температурных сигналов во времени может быть использована для оценки глубины залегания дефекта.

Зона Д1 ведет себя аномально по сравнению с Д2 и Д3, а именно, температура растет и достигает максимума, возрастая на 0,7 °C еще в ходе УЗ стимуляции. Затем температура в этой зоне снижается, несмотря на продолжающуюся стимуляцию. Подобное поведение может быть связано с расширением дефекта под действием УЗ колебаний, в результате чего снижается мощность внутреннего трения.

Результаты экспериментов, которые были проведены при контроле лопатки турбины со стороны А при вводе УЗ стимуляции в точку № 2 (длительность стимуляции 20 с), находящуюся в зоне замка лопатки, приведены на рис. 5. На исходной термограмме (см. рис. 5б) отчетливо видны две дефектные зоны Д2 и Д3 на торце пера лопатки. Обработка последовательности термограмм методом анализа главных компонент (АГК) позволила выявить плохо распознаваемую дефектную отметку Д1 (см. рис. 5в). На рис. 5г показаны графики изменения температуры в зонах Д1—Д3 для исходной последовательности термограмм. Видно, что в процессе УЗ стимуляции температура в области Д1 практически не изменяется, в то время как в областях Д2 и Д3 температура возрастает на 1-2 °C.

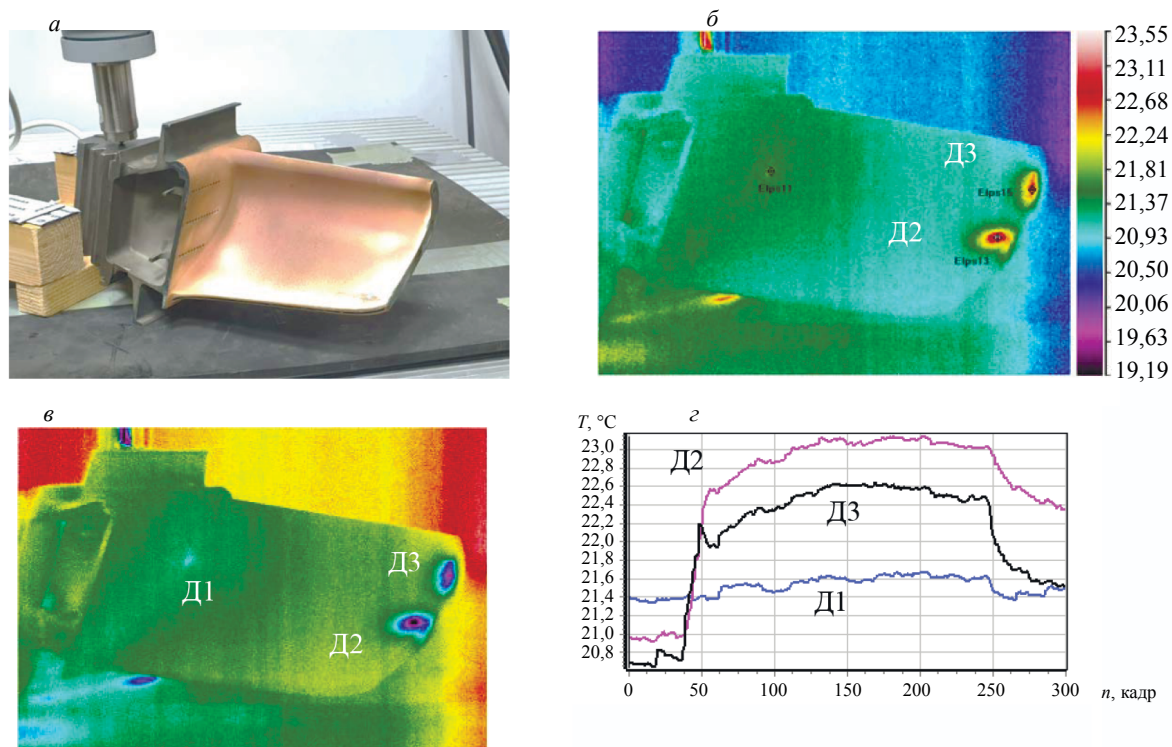


Рис. 5. Результат термоакустического контроля лопатки турбины (сторона А, УЗ стимуляция точки № 2): процесс теплового контроля при УЗ стимуляции точки № 2 (а); оптимальная термограмма исходной последовательности (б); первая компонента (АГК) (в); график изменения температур в зонах дефектов Д1—Д3 (г).

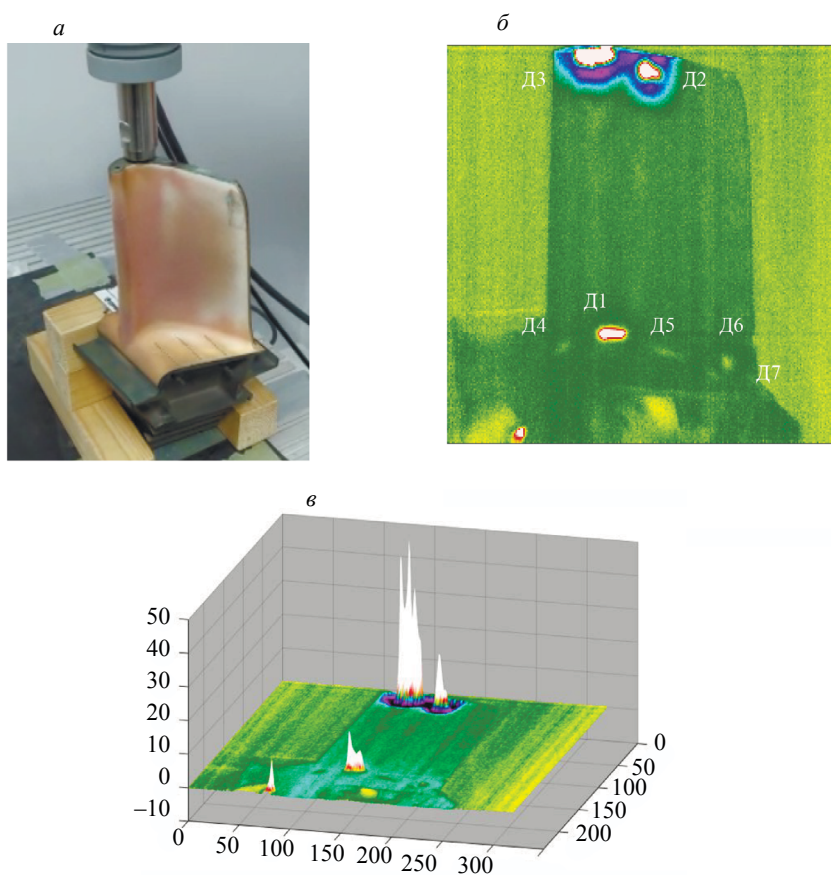


Рис. 6. Результат термоакустического контроля лопатки турбины со стороны А при стимуляции в точке № 3: положение магнитоотриктора при вводе УЗ колебаний (а); результат обработки последовательности термограмм методом АГК (б); трехмерное представление карты дефектов лопатки турбины (в).

При вводе УЗ колебаний в торец пера лопатки (точка № 3) при контроле стороны А были обнаружены дефекты Д4—Д7, расположенные в зоне примыкания пера лопатки к полке (см. результаты на рис. 6). Наличие данных дефектов было подтверждено с помощью капиллярного НК (результаты схематично отмечены на рис. 7). Для большей наглядности уровня температурных сигналов в зонах дефектов Д1—Д3 по сравнению с температурными сигналами дефектов Д4—Д7, находящихся в зоне перехода пера лопатки в полку, на рис. 6в приведена термограмма в трехмерном представлении.

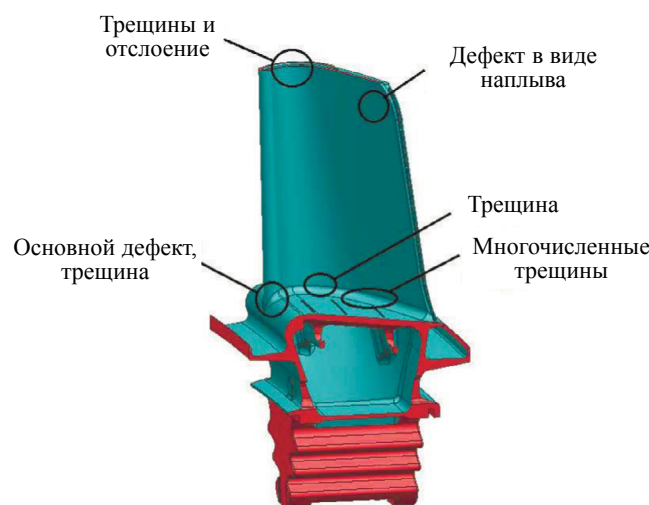


Рис. 7. Результаты обнаружения дефектов методом капиллярного НК.

При термоакустическом контроле лопатки турбины со стороны Б УЗ стимуляцию проводили в точках № 4 (рис. 8) и № 5 (рис. 9). В частности, при стимуляции точки № 4 была выявлена слабая дефектная отметка Д8 с повышением температуры на 0,8 °С (см. рис. 8б). Аналогичная отметка при таком же уровне температурного сигнала проявилась при вводе УЗ в точку № 5 (см. рис. 9), причем, как и в предыдущем случае, существенное улучшение результата испытаний было получено после применения метода АГК. Кроме того, при стимуляции точки № 5, находящейся на торце пера лопатки, и при контроле стороны Б были выявлены температурные аномалии, не подтвержденные результатами капиллярного НК. В частности, обширная зона А1, вероятно, характеризует разогрев колеблющейся кромки пера лопатки и обусловлена малой толщиной стенки пера в районе выходных отверстий вентиляционных каналов. Зона А2 по характеру изменения температуры может быть вызвана внутренним дефектом пера лопатки, в частности, в зоне перегородок вентиляционных каналов.

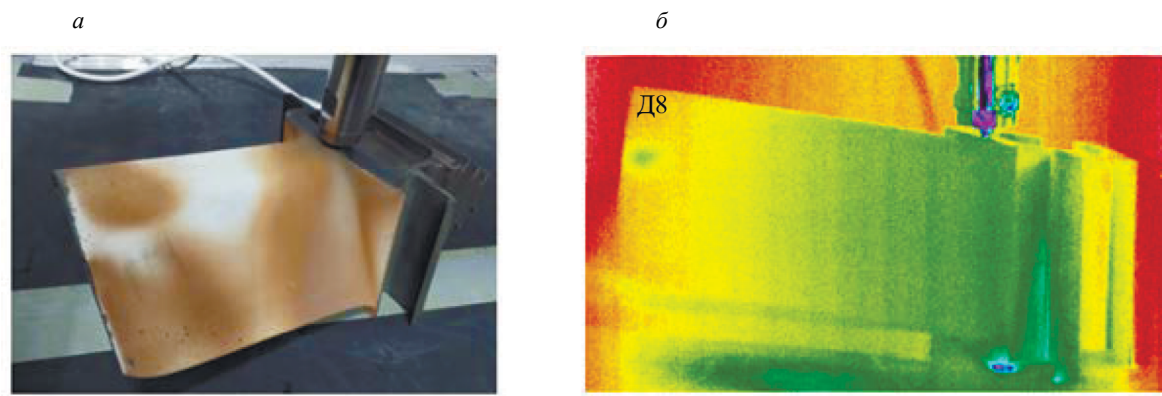


Рис. 8. Результаты термоакустического контроля лопатки турбины со стороны Б при вводе УЗ в точку № 4: ввод УЗ в точку № 4 (а); изображение первой компоненты (АГК) (б).

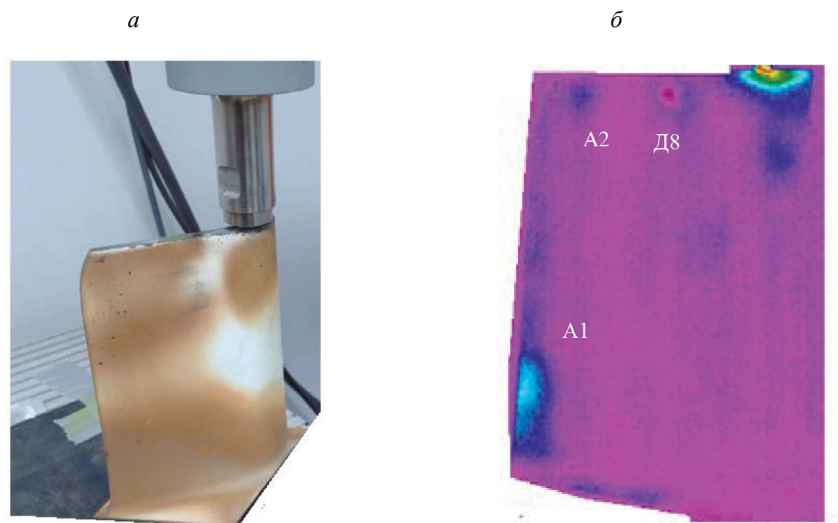


Рис. 9. Результаты термоакустического контроля лопатки турбины (а) со стороны Б при вводе УЗ в точке № 5 (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лопатка турбины из жаропрочного никелевого сплава с керамическим покрытием была проконтролирована с использованием сравнительно нового в отечественной практике теплового контроля с УЗ стимуляцией. Такой метод теплового контроля наиболее пригоден для выявления трещин с раскрытием от 1 мкм и более, а также трещин с нулевым раскрытием, берега которых, соприкасаясь, генерируют тепловую энергию под воздействием УЗ стимуляции.

Результатом контроля явились последовательности термограмм, характеризующие динамику температуры поверхности лопатки турбины при механическом воздействии. Для анализа термограмм использовали известные алгоритмы обработки ИК-изображений, в частности, метод АГК, который позволяет «подчеркнуть» дефектные отметки.

Термоакустический контроль проводили для двух (А и Б) поверхностей пера лопатки. Для стимуляции использовали МП с частотой 22 кГц и электрической мощностью 300 Вт. Большинство дефектов было обнаружено на поверхности А с хорошей корреляцией результатов термоакустического и капиллярного контроля. Следует подчеркнуть высокую производительность теплового контроля с УЗ стимуляцией, время проявления дефектов, которое близко к длительности УЗ стимуляции (нескольких секунд), и визуализации всей контролируемой поверхности пера лопатки турбины. Кроме того, следует иметь в виду парадоксальную особенность термоакустического метода НК, которая состоит в том, что наилучшим образом выявляются трещины, края которых сомкнуты, чем более заметные другими видами НК раскрытые трещины, что связано с большим локальным повышением температуры в сомкнутых трещинах ввиду трения их «берегов».

Наилучшие результаты, с точки зрения количества обнаруженных дефектов, были получены при вводе УЗ стимуляции в торец пера лопатки, однако по ряду причин данная точка не рекомендована для УЗ воздействия. В связи с этим авторами будут проведены дальнейшие исследования, направленные на выбор оптимальной точки УЗ стимуляции при контроле подобного типа лопаток турбин.

При контроле поверхности Б лопатки, для которой результаты капиллярного контроля отсутствовали, были обнаружены зоны слабой генерации тепла, по-видимому, связанные с наличием внутренних дефектов лопатки турбины, либо резонансных явлений тонких стенок пера лопатки. В связи с этим следует подчеркнуть еще одно преимущество исследуемого метода перед капиллярным НК: термоакустический контроль позволяет обнаруживать подповерхностные дефекты, генерирующие тепло под действием УЗ, не выявляемые с помощью пенетрантов, а именно трещины, находящиеся под керамическим покрытием, и трещины, раскрытие которых не выходит на контролируемую поверхность.

Основными недостатками термоакустического контроля, требующими оптимизации перед испытаниями конкретных изделий, являются: 1) зависимость результатов от положения точки ввода УЗ колебаний и обеспечение надежного контакта волновода УЗ излучателя с поверхностью объекта контроля; 2) потенциальная возможность повреждения поверхности объекта

контроля в точке УЗ стимуляции. Оба недостатка могут быть преодолены путем оптимизации системы термоакустического контроля и проведением исследований по определению оптимальной точки ввода ультразвука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henneke E.G., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. Thermography, An NDI Method for Damage Detection // Journal of Metal. 1979. P. 11—15.
2. Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th., Busse G. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging // Insight. 2007. V. 49. No. 5. P. 272—274.
3. Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L. Thermographic Investigation of High-Power Ultrasonic Heating in Materials // Ultrasonics. 1981. V. 7. P. 159—163.
4. Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The Mechanics of Vibrothermography, Mechanics of Nondestructive Testing / Ed. W.W. Stinchcomb. New York: Plenum Press, 1980. P. 249—276.
5. Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse / Proc. SPIE “Thermosense-XXII”. 2000. V. 4020. P. 182—185.
6. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic Chaos and Sonic Infrared Imaging // Applied Physics Letter. 2002. V. 81. P. 3188—3190.
7. Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory // Proc. SPIE. “Thermosense-XXVI”. 2004. V. 5405. P. 313—321.
8. Литвиненко О.В. Исследование термоакустических эффектов в кремниевых пластинах / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, 2003. 127 с.
9. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Ultrasonic infrared thermography in nondestructive testing: A review // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 4. P. 212—219.
10. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // Proc. SPIE “Thermosense-XXXVI”. 2014. V. 9105. P. 91050J.
11. Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms // Infrared Physics & Technology. 2013. V. 61. P. 101—110.
12. Pieczonka L., Szewdo M., Uhl T. Vibrothermography — Measurement System Development and Testing. Diagnostics — Diagnostics and Structural Health Monitoring. 2011. V. 2. Is. 58. P. 61—66.
13. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах // В мире НК. Март 2010. № 1 (47). С. 36—58.
14. Ширяев В.В., Хорев В.С. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции // Контроль. Диагностика. 2011 (спецвыпуск). С. 112—114.
15. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // Proc. of SPIE. 2004. V. 5405. P. 332—335.
16. Holland S.D., Uhl C., Renshaw J. Towards a Viable Strategy for Estimating Vibrothermographic Probability of Detection // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. 2008. V. 27. P. 491—497.
17. Holland S.D. First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System // Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. 2007. V. 2. P. 478—483.
18. Hiremath S.R., Mahapatra R., Srinivasan S. Detection of Crack In Metal Plate by Thermo Sonic Wave Based Detection Using FEM // JEST-M. 2012. V. 1. Is. 1. P. 12—18.
19. Solodov I., Busse G. Resonance Ultrasonic Thermography: Highly Efficient Contact and Air-coupled Remote modes // Applied Physics Letters. 2013. V. 102. Is. 6. Id. 061905. 3 p.
20. Pye C.J., Adams R.D. Detection of Damage in Fibre Reinforced Plastics Using Thermal Fields Generated During Resonant Vibration // NDT International. 1981. V. 14. Is. 3. P. 111—118.
21. Ермолов И.Н., Гутис М.Б., Королев М.В. и др. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
22. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // Rus. J. NDT. 2017. V. 53. No. 7. P. 530—538. DOI: 10.1134/S1061830917070099
23. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Quantitative study of local heat sources by Ultrasonic Infrared Thermography: An approach for estimating total energy released by low energy impact damage in C/C composite // Composites Part B: Engineering. V. 165. 15 May 2019. P. 167—173.
24. Naga V., Vakada N.R., Niranjan Kumar I.N., Prasad Katuru B., Madhulata N., Gurajrapu N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine – an overview // Intern. J. of Eng. Res. and Develop. August 2014. V. 10. Is. 8. P. 48—57.

REFERENCES

1. Henneke E.G., Reifsnider K.L., Stinchcomb W.W. Thermography, An NDI method for damage detection // Journal of Metal. 1979. P. 11—15.

2. Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th., Busse G. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging // *Insight*. 2007. V. 49. No. 5. P. 272—274.
3. Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke E.G., Reifsnider K.L. Thermographic Investigation of high-power ultrasonic heating in materials // *Ultrasonics*. 1981. V. 7. P. 159—163.
4. Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The Mechanics of Vibrothermography, Mechanics of Nondestructive Testing / Ed. W.W. Stinchcomb. New York: Plenum Press, 1980. P. 249—276.
5. Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse // *Proc. SPIE “Thermosense-XXII”*. 2000. V. 4020. P. 182—185.
6. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic chaos and sonic infrared imaging // *Applied Physics Letter*. 2002. V. 81. P. 3188—3190.
7. Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory / *Proc. SPIE. “Thermosense-XXVI”*. 2004. V. 5405. P. 313—321.
8. Litvinenko O.V. Investigation of thermoacoustic phenomena in silicon samples / PhD thesis, 2003. 127 p. (in Russian).
9. Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Ultrasonic infrared thermography in nondestructive testing: A review // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 4. P. 212—219.
10. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // *Proc. SPIE “Thermosense-XXXVI”*. 2014. V. 9105. P. 91050J.
11. Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms // *Infrared Physics & Technology*. 2013. V. 61. P. 101—110.
12. Pieczonka L., Szewedo M., Uhl T. Vibrothermography – Measurement System Development and Testing. *Diagnostyka — Diagnostics and Structural Health Monitoring*, 2011. V. 2. Is. 58. P. 61—66.
13. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Khorev V.S. Ultrasonic Infrared technique for detecting impact damage and fatigue cracks in metals and composites // *In the NDT World*. March 2010. V. 1 (47). P. 36—58 (in Russian).
14. Shirayev V.V., Khorev V.S. Thermal NDT of impact damage in carbon reinforced plastic by applying ultrasonic stimulation // *Control. Diagnostics*. 2011 (special issue). P. 112—114 (in Russian).
15. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // *Proc. of SPIE*. 2004. V. 5405. P. 332—335.
16. Holland S.D., Uhl C., Renshaw J. Towards a viable strategy for estimating vibrothermographic probability of detection // *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2008. V. 27. P. 491—497.
17. Holland S.D. First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System // *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2007. V. 2. P. 478—483.
18. Hiremath S.R., Mahapatra R., Srinivasan S. Detection of Crack In Metal Plate by Thermo Sonic Wave Based Detection Using FEM // *JEST-M*. 2012. V. 1. Is. 1. P. 12—18.
19. Solodov I., Busse G. Resonance Ultrasonic Thermography: Highly Efficient Contact and Air-coupled Remote modes // *Applied Physics Letters*. 2013. V. 102. Is. 6. Id. 061905. 3 p.
20. Pye C.J., Adams R.D. Detection of Damage in Fibre Reinforced Plastics Using Thermal Fields Generated During Resonant Vibration // *NDT International*. 1981. V. 14. Is. 3. P. 111—118.
21. Ermolov I.N., Ghitis M.B., Korolev M.V. Ultrasonic transducers for nondestructive testing. Mashinostroyeniye Publisher, Moscow. 1986. 280 p. (in Russian).
22. Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffin A.K. Detecting low-energy impact damages in carbon-carbon composites by ultrasonic infrared thermography // *Rus. J. NDT*. 2017. V. 53 (7). P. 530—538. DOI: 10.1134/S1061830917070099.
23. Umar M.Z., Vavilov V., Abdullah H., Ariffin A.K. Quantitative study of local heat sources by Ultrasonic Infrared Thermography: An approach for estimating total energy released by low energy impact damage in C/C composite // *Composites Part B: Engineering*. V. 165. 15 May 2019. P. 167—173.
24. Naga V., Vakada N.R., Niranjana Kumar I.N., Prasad Katuru B., Madhulata N., Gurajapapu N. Failure mechanisms in turbine blades of a gas turbine engine — an overview // *Intern. J. of Eng. Res. and Develop.* August 2014. V. 10. Is. 8. P. 48—57.