

Зубова Е.М., Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 38–48. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.04

Zubova E.M., Lobanov D.S., Strungar E.M., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Application of the acoustic emission technique to studying the damage accumulation in a functional ceramic coating. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 38-48. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.04



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.04

УДК 620.1

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Е.М. Зубова<sup>1</sup>, Д.С. Лобанов<sup>1</sup>, Е.М. Струнгарь<sup>1</sup>, В.Э. Вильдеман<sup>1</sup>, Ю.Б. Лямин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 10 февраля 2019 г.  
Принята: 20 марта 2019 г.  
Опубликована: 30 марта 2019 г.

#### Ключевые слова:

экспериментальная механика, механические испытания, одноосное растяжение, акустическая эмиссия, корреляция цифровых изображений, керамическое покрытие, деформирование, разрушение.

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена экспериментальному изучению механизмов накопления повреждений в функциональных керамических покрытиях с применением метода акустической эмиссии. Исследование и описание эволюции разрушения функционального покрытия в дальнейшем дает возможность определения момента нарушения работоспособности данного материала в условиях эксплуатации. Проводились механические испытания на одноосное квазистатическое растяжение стальных образцов и стальных образцов с нанесенным на них керамическим покрытием на универсальной электромеханической системе Instron 5989 при комнатной температуре. В ходе эксперимента осуществлялась непрерывная регистрация сигналов акустической эмиссии с помощью системы AMSY-6 и широкополосных датчиков AE144A с частотным диапазоном 100–500 кГц. В качестве дополнительного метода фиксации момента разрушения керамического покрытия была использована система для регистрации неоднородных полей перемещений и деформаций, основанная на методе корреляции цифровых изображений. В процессе испытаний осуществлялась синхронизация акустико-эмиссионной системы, оптической системы и испытательной машины. Зарегистрированные сигналы акустической эмиссии подвергались предварительной фильтрации по пороговому значению и фильтрации с использованием полосового цифрового фильтра. Благодаря возможности записи диаграмм формы волны, при помощи быстрого преобразования Фурье извлечены значения частот спектрального максимума. На базе полученных данных построены диаграммы зависимостей параметров акустической эмиссии (пиковые значения амплитуд, значения частот спектрального максимума, энергетический параметр) от времени для всех образцов. Проведен сравнительный анализ распределений амплитуд и частот спектрального максимума для образцов с покрытием и без покрытия, вследствие чего предложены диапазоны значений параметров сигналов акустической эмиссии, которые характеризуют процесс накопления повреждений и разрушения керамического покрытия. Таким образом, во время проведения данных работ была реализована методика оценки поведения функционального покрытия, нанесенного на материал, показана эффективность применения метода акустической эмиссии для решения данной задачи.

© ПНИПУ

© Зубова Екатерина Михайловна – аспирантка, e-mail: [cem.zubova@mail.ru](mailto:cem.zubova@mail.ru), [ID: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).  
Лобанов Дмитрий Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: [cem.lobanov@gmail.com](mailto:cem.lobanov@gmail.com), [ID: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X).  
Струнгарь Елена Михайловна – аспирантка, e-mail: [cem.spaskova@mail.ru](mailto:cem.spaskova@mail.ru), [ID: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638).  
Вильдеман Валерий Эрвинович – д.ф.-м.н., проф., e-mail: [wildemann@pstu.ru](mailto:wildemann@pstu.ru), [ID: 0000-0002-6240-4022](https://orcid.org/0000-0002-6240-4022).  
Лямин Юрий Борисович – г.с., e-mail: [uniikm@yandex.ru](mailto:uniikm@yandex.ru), [ID: 0000-0002-1452-1566](https://orcid.org/0000-0002-1452-1566).

Ekaterina M. Zubova – PhD Student, e-mail: [cem.zubova@mail.ru](mailto:cem.zubova@mail.ru), [ID: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).  
Dmitry S. Lobanov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: [cem.lobanov@gmail.com](mailto:cem.lobanov@gmail.com), [ID: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X).

Elena M. Strungar – PhD Student, e-mail: [cem.spaskova@mail.ru](mailto:cem.spaskova@mail.ru), [ID: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638).  
Valery E. Vildeman – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: [wildemann@pstu.ru](mailto:wildemann@pstu.ru), [ID: 0000-0002-6240-4022](https://orcid.org/0000-0002-6240-4022).

Yuriy B. Lyamin – Chief Specialist, e-mail: [uniikm@yandex.ru](mailto:uniikm@yandex.ru), [ID: 0000-0002-1452-1566](https://orcid.org/0000-0002-1452-1566).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## APPLICATION OF THE ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE TO STUDYING THE DAMAGE ACCUMULATION IN A FUNCTIONAL CERAMIC COATING

E.M. Zubova<sup>1</sup>, D.S. Lobanov<sup>1</sup>, E.M. Strungar<sup>1</sup>, V.E. Wildemann<sup>1</sup>, Y.B. Lyamin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Ural Research Institute of Composite Materials, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 10 February 2019

Accepted: 20 March 2019

Published: 30 March 2019

#### Keywords:

experimental mechanics, mechanical tests, uniaxial tension, acoustic emission, digital image correlation, ceramic coating, deformation, failure.

### ABSTRACT

The article is devoted to an experimental study of the mechanisms of damage accumulation in functional ceramic coatings by using the acoustic emission technique. The study and description of the damage evolution in a functional coating makes it possible to determine the destruction moment of this material under operating conditions. Mechanical tensile tests were conducted on steel samples and steel samples coated with a ceramic coating on the universal electromechanical system Instron 5989 at room temperature. A continuous recording of acoustic emission signals was conducted using the AMSY-6 system and AE144A broadband sensors with a frequency range of 100–500 kHz. As an additional method of fixing the moment of destruction of a ceramic coating a system was used to register non-uniform fields of displacements and deformations based on the method of correlation of digital images. During the tests the acoustic emission system, the optical system, and the testing machine were synchronized. The recorded acoustic emission signals were filtered by a threshold value and were filtered using a band-pass digital filter. The frequencies of the spectral maximum are extracted using the fast Fourier transform. Diagrams of dependences of acoustic emission parameters (peak amplitudes, frequencies of the spectral maximum, energy parameter) versus time for all the samples were plotted. A comparison of the obtained graphs for the samples with and without coating is made. The ranges of amplitudes and frequencies that characterize the damage accumulation and destruction of the ceramic coating were determined. Thus, during these works, a technique was implemented to evaluate the behavior of the functional coating applied to the material. The effectiveness of applying the method of recording and analyzing acoustic emission signals to solve this problem was shown.

© PNRPU

### Введение

Использование теплозащитных покрытий (ТЗП) в современной аэрокосмической отрасли обусловлено необходимостью обеспечения более продолжительного срока эксплуатации элементов двигателя, которые подвержены влиянию высоких температур. Следовательно, допускается более высокая рабочая температура двигателя, которая может повысить эффективность и производительность его работы. К данному виду покрытий выдвигаются высокие требования, такие как способность выдерживать высокие термомеханические нагрузки при высоких рабочих температурах конструкции. Данным требованиям полностью удовлетворяют покрытия из высокотемпературной керамики [1–4].

Несмотря на существенные преимущества использования ТЗП, существует проблема термохимического взаимодействия материалов покрытия и подложки. Несоответствие коэффициентов линейного термического расширения материалов покрытия и подложки приводит к возникновению напряжений по границам раздела фаз, что приводит к повреждению покрытия и образованию трещин [1].

В последние годы появился значительный прогресс, достигнутый в анализе поведения и надежности функциональных керамических покрытий, тем не менее имеются проблемы в прогнозировании эволюции по-

вреждений с точки зрения инициирования и роста трещины, что в конечном счете и приводит к растрескиванию и отслоению покрытия. Изучению процесса накопления повреждений в покрытии во время механических воздействий посвящено множество научных статей. Целый ряд неразрушающих методов испытаний, таких как спектроскопические методы, дифракция рентгеновских лучей и фотолюминесценция [5–7], были применены для обнаружения трещины и эволюции поврежденности в покрытиях. Среди методов дефектоскопии стоит выделить метод акустической эмиссии.

Акустическая эмиссия (АЭ) – физическое явление, связанное с излучением упругих волн исследуемым объектом при нелинейных трансформациях его структуры [8]. Эти волны могут быть обнаружены на поверхности образцов при помощи пьезоэлектрических датчиков и соответствующих устройств сбора и интерпретации данных. Из этого следует, что данный метод дает возможность следить за процессами, происходящими в материалах, в режиме реального времени, что позволяет обнаруживать развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты.

Анализ результатов теоретического и экспериментального изучения процессов накопления повреждений в керамических покрытиях с использованием метода АЭ описаны в работах [9–20]. Так, коллективом авторов J.-H. Park, J.S. Kim, K.-H. Lee [12–13] исследовались

образцы с покрытием после термоциклирования, оценивались амплитуда, кумулятивная энергия и количество сигналов АЭ во время испытаний. Наблюдалось снижение числа зарегистрированных сигналов после определенного числа циклов, и сделан вывод о снижении адгезии между покрытием и подложкой из-за образования микротрещин, откальвания и пластической деформации, вызванных термической усталостью. Позднее этими авторами было исследовано влияние лазерной обработки слоев теплозащитного покрытия. Согласно результатам анализа сигналов АЭ, количество пересечений порога и энергетический параметр, как правило, увеличиваются по мере увеличения мощности лазера [21]. В работе [15] коллективом авторов L. Yang, Y.C. Zhou, W.G. Mao и др. были проанализированы параметры сигналов АЭ, включая количество событий, амплитуду и частотный спектр, реализованный с помощью быстрого преобразования Фурье, для получения информации о поведении трещин в ТЗП при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение. Этими авторами вводится понятие поверхностной вертикальной трещины (*surface crack*) и трещины вдоль границы раздела фаз (*interface crack*). В условиях испытаний на растяжение выявлено, что повреждение покрытия возникает из-за образования поверхностной вертикальной трещины в верхнем слое покрытия, после чего происходит расслаивание и окончательное разрушение покрытия. Установлено, что анализ параметров сигналов АЭ в сочетании с анализом частотного спектра предоставляет полезную информацию об эволюции повреждений и структуре повреждений в ТЗП. В работе [22] показано, что образование поверхностных вертикальных трещин и трещин вдоль границы раздела фаз может быть идентифицировано с помощью точки излома, появляющейся в ряду акустико-эмиссионных событий. Установлено, что плотность трещин линейно коррелирует с энергетическим параметром сигналов АЭ. Позднее этими авторами была проведена работа по определению энергии межфазной адгезии теплозащитных покрытий с применением метода АЭ, что важно для понимания механизмов разрушения и прогнозирования эксплуатационного ресурса [17]. В работе M.P. Appleby, D. Zhua, G.N. Morscher [23] исследовались процессы накопления повреждений в образцах с ТЗП при механических испытаниях на одноосное растяжение. Локализация разрушений определялась с помощью мониторинга АЭ и записью полей перемещений и деформаций.

Анализируя работы, посвященные теоретическому и экспериментальному изучению процессов накопления повреждений в керамических покрытиях методом АЭ, можно сделать вывод, что исследование состояния материалов во время приложенных нагрузок данным методом позволяет получить данные об инициации и распространении трещины в покрытии, что ведет к снижению адгезии между покрытием и подложкой, к дальнейшему отслоению покрытия и снижению его защитных функций. Полученная информация является важной для дальнейшего контроля изделий с точки

зрения безопасной эксплуатации и своевременного обслуживания элементов конструкций с целью увеличения срока их эксплуатации. Таким образом, данное направление исследований можно отнести к числу актуальных в области экспериментальной механики и механики разрушения.

Целью работы является экспериментальное изучение и описание процесса возникновения и роста трещины в функциональном керамическом покрытии в процессе механических испытаний на одноосное растяжение стальных образцов.

## 1. Материалы, оборудование и методика испытаний

Экспериментальные исследования осуществлялись на базе современного оборудования ЦКП Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета. Для регистрации сигналов АЭ из функционального керамического покрытия были изготовлены образцы, размер и эскиз которых представлен на рис. 1. В качестве материала применялась Сталь 45, имеющая сравнительно высокий модуль упругости, что позволяет проводить исследования керамического покрытия в более широком диапазоне действующих нагрузок. Выбор металлического материала в качестве подложки на данном этапе исследования обоснован также и тем, что зарегистрированные сигналы АЭ в процессе деформирования таких материалов обладают меньшими значениями параметров, чем значения сигналов, зарегистрированных при деформировании композитов, кроме того, отмечается меньшая акустико-эмиссионная активность в процессе разрушения металлов [24–25]. Это связано с различными процессами деформирования, происходящими в металлах и композитах в ходе нагружения. Так, источниками АЭ при пластическом деформировании металлов и сплавов являются процессы, связанные с зарождением и движением дислокаций [26–27], а при разрушении волокнистых композитов имеют место такие механизмы, как нарушение адгезии между волокном и матрицей, растрескивание матрицы, вытягивание и разрушение волокна [28].

Керамическое покрытие наносилось методом плазменного напыления с применением порошка оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия с двух сторон на поверхности Б (см. рис. 1), толщина покрытия составляла  $(250 \pm 50)$  мкм. Рабочая температура плазменной струи составляет от 5000 до 15000 К, что позволяет наносить тугоплавкие соединения на металлическую подложку. Плазменные покрытия на основе оксида циркония обладают высокой плотностью, хорошей адгезией с подложкой и предохраняют материал подложки от окисления в условиях работы окислительного высокотемпературного газового потока. Плоская форма образцов на растяжение и сжатие выбиралась исходя из удобства крепления датчиков АЭ.

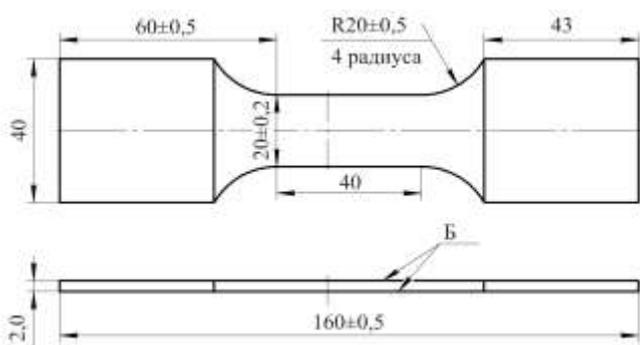


Рис. 1. Эскизы образцов для испытаний на одноосное растяжение

Fig. 1. Sketches of the uniaxial tensile test samples

Механические испытания проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5989 при комнатной температуре. Образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 2 мм/мин. Непрерывная регистрация данных АЭ и данных формы волны проводилась с использованием многоканальной системы AMSY-6 фирмы Vallen Systeme GmbH до разрушения образцов. Использовались пьезоэлектрические датчики AE144A с частотным диапазоном 100–500 кГц и предусилители с коэффициентом усиления 34 дБ. Частота дискретизации данных составляла 10 МГц. Датчики крепились на образцы с помощью вакуумной силиконовой смазки Wacker Silicon и крепежной системы. Осуществлялась синхронизация испытательной системы и системы AMSY-6 для записи приложенной нагрузки. Фото образца в захватах испытательной машины с прикрепленным датчиком представлено на рис. 2.

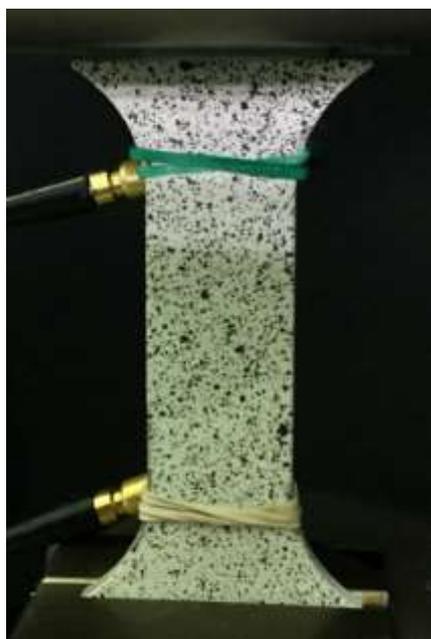


Рис. 2. Фото образца в захватах испытательной системы с прикрепленным датчиком АЭ

Fig. 2. The sample in the grips of the test system with an attached AE sensor

Параметры регистрации данных АЭ выбраны исходя из параметров проведения механических испытаний (скорость нагружения). Осуществлялась предварительная фильтрация по пороговому значению 30,2 дБ и фильтрация с использованием полосового фильтра 25–850 кГц.

Регистрация данных АЭ для всех образцов осуществлялась с помощью специальной аппаратной опции, которая дает возможность возведения в квадрат и интегрирования сигнала, в результате чего можно получить значение энергетического параметра сигнала [28, 31]. В этом случае энергетический параметр вычисляется в единицах энергии ( $eu$ ,  $1 eu = 10^{-14} B^2c$ ) [29]. Суммируя значения энергетического параметра за все предыдущие временные интервалы, можно ввести понятие кумулятивной энергии ( $E$ ,  $B^2c$ ), которая отражает степень накопления дефектов в материале:  $E = \sum_{i=1}^n E_i$ , где  $E_i$  – энергетический параметр сигнала АЭ.

Данный параметр был описан в работах [30–33]. С помощью специального программного модуля были обработаны все волновые формы, и извлечены значения частоты спектрального максимума (ЧСМ, характеристика быстрого преобразования Фурье). Частота спектрального максимума – это частота с наибольшей величиной в спектре быстрого преобразования Фурье, генерируемая механизмами повреждения [34–35].

Регистрация неоднородных полей перемещений и деформаций на поверхности образца осуществлялась с использованием бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D (Correlated Solutions), математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений (КЦИ) [34]. Съемка видеосистемой осуществлялась с помощью двух цифровых черно-белых камер Q-400 с разрешением до 4 Мп, скорость съемки составила 15 кадров в секунду. В программном обеспечении видеосистемы Vic-3D предусмотрено использование разных корреляционных критериев математической оценки соответствия цифровых изображений. В работе используется критерий нормированной суммы квадратов разностей (NSSD – normalized sum of squared difference). Данный критерий менее чувствителен к изменению освещенности (яркости) образца в процессе деформирования, обеспечивает наилучшее сочетание временных затрат и точности результатов [35]. Для реализации метода КЦИ на поверхность образца наносилось мелкодисперсное покрытие с помощью аэрозольной черной краски.

В ходе постобработки системой Vic 3D осуществлялось вычисление компонент продольных деформаций ( $\epsilon_{yy}$ ) с помощью тензора конечных деформаций в представлении Лагранжа  $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j})$ .

Схема проведения испытания совместно с системой для регистрации сигналов АЭ и оптической видеосистемой представлена на рис. 3.

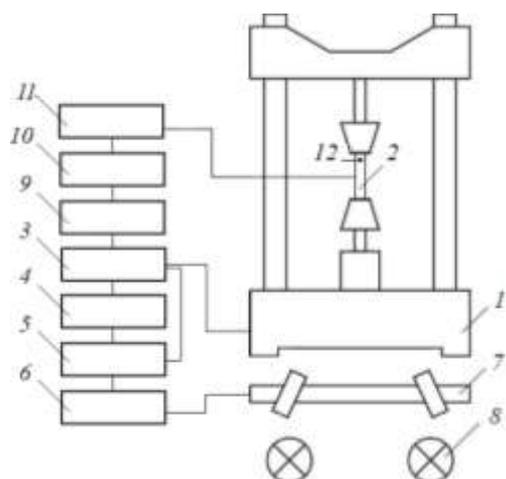


Рис. 3. Схема проведения испытания совместно с системой для регистрации сигналов АЭ: 1 – испытательная машина; 2 – образец, установленный в захваты; 3 – контроллер испытательной системы; 4 – ПК, с которого производится управление машиной; 5 – блок синхронизации; 6 – ПК, с которого производится управление видеосистемой; 7 – камеры, установленные на штативе; 8 – система подсветки; 9 – блок регистрации и обработки сигналов АЭ; 10 – предусилитель сигнала АЭ; 11 – ПК с ПО для регистрации и обработки АЭ; 12 – датчик АЭ

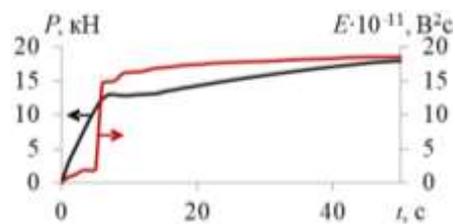
Fig. 3. Testing scheme in conjunction with the system for registration of AE signals: 1 – testing machine; 2 – the sample installed in the grippers; 3 – controller of test system; 4 – PC from which the machine is controlled; 5 – sync block; 6 – PC, from which the video system is controlled; 7 – cameras mounted on a tripod; 8 – backlight system; 9 – block registration and processing of AE signals; 10 – preamp signal AE; 11 – PC with software for registration and processing of AE; 12 – AE sensor

## 2. Результаты механических испытаний и анализ экспериментальных данных

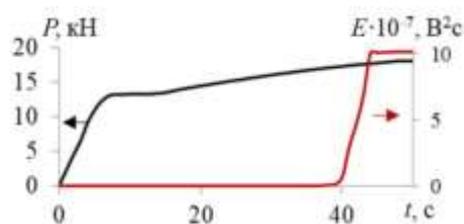
Основным источником АЭ при испытаниях стальных образцов с нанесенным на них керамическим покрытием является растрескивание покрытия и отслоение его от образца [22]. Для сравнения акустико-эмиссионного поведения образцов с нанесенным покрытием и без него приведены характерные графики зависимости кумулятивной энергии от времени, совмещенные с графиком нагружения (рис. 4), график распределения пиковых значений амплитуд по времени, совмещенный с графиком нагружения (рис. 5), распределение пиковых значений амплитуд (рис. 6), график распределения частот спектрального максимума в зависимости от времени, совмещенный с графиком нагружения (рис. 7), ступенчатая диаграмма ЧСМ (рис. 8). Были рассмотрены участки нагружения образцов с момента начала испытаний до момента времени, равного 50 с, далее на образцах с покрытием наблюдалось отслоение покрытия.

Проводилось сравнение акустико-эмиссионного поведения при испытаниях на одноосное растяжение образцов без покрытия и образцов с покрытием и отмече-

но, что рост кумулятивной энергии во время испытания образцов без покрытия начинается с момента времени  $t \approx 10$  с и совпадает с моментом перехода с верхнего предела текучести на нижний (рис. 4, а), а рост кумулятивной энергии во время испытания образцов с покрытием начинается с момента времени  $t \approx 40$  с (рис. 4, б).



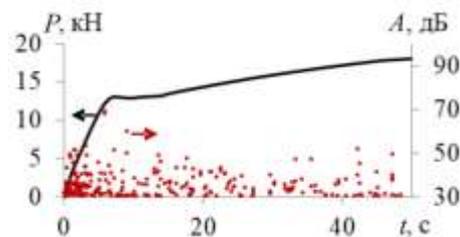
а



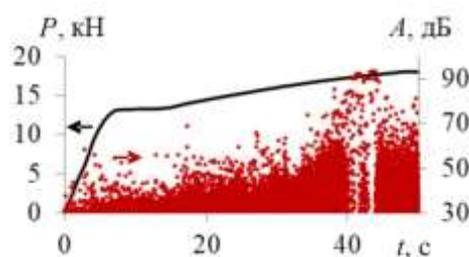
б

Рис. 4. График зависимости кумулятивной энергии ( $E$ ) от времени ( $t$ ), совмещенный с графиком нагружения для образца без покрытия (а) и образца с покрытием (б)

Fig. 4. Graph of cumulative energy ( $E$ ) versus time ( $t$ ), combined with the loading curve for the sample without coating (а) and the coated sample (б)



а



б

Рис. 5. График распределения пиковых значений амплитуд ( $A$ ) по времени ( $t$ ), совмещенный с графиком нагружения для образца без покрытия (а) и образца с покрытием (б)

Fig. 5. The graph of the distribution of peak amplitudes ( $A$ ) versus time ( $t$ ), combined with the load curve for the sample without coating (а) and the sample with coating (б)

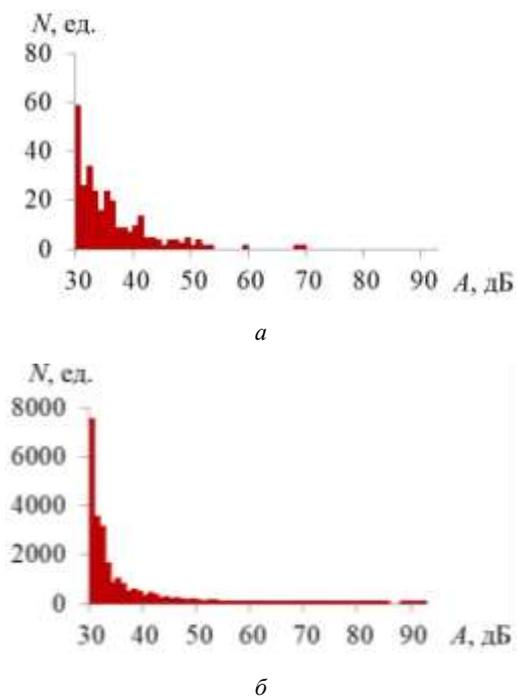


Рис. 6. Распределение пиковых значений амплитуд для образца без покрытия (а) и образца с покрытием (б)

Fig. 6. The distribution of peak amplitudes for the sample without coating (a) and the sample with coating (b)

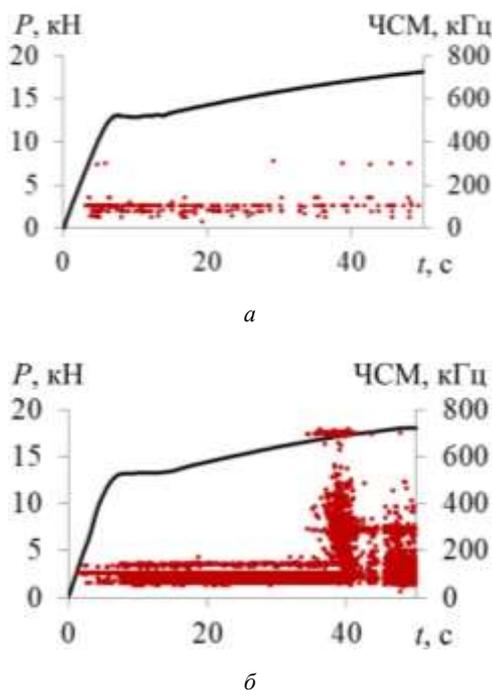


Рис. 7. График распределения ЧСМ в зависимости от времени ( $t$ ), совмещенный с графиком нагружения для образца без покрытия (а) и образца с покрытием (б)

Fig. 7. The graph of the distribution of the frequency of spectral maximum from time ( $t$ ), combined with the schedule of loading for the sample without coating (a) and the sample with coating (b)

В этот момент времени на поверхности образца наблюдается растрескивание и отслоение керамического покрытия. Значения кумулятивной энергии при ис-

пытании образцов с нанесенным керамическим покрытием выше на 4 порядка и совпадают со значениями энергетического параметра для керамического материала, схожего по составу [36]. В момент времени  $t \approx 40$  с для образца с покрытием наблюдается увеличение пиковых значений амплитуд, которые достигают значений 95 дБ.

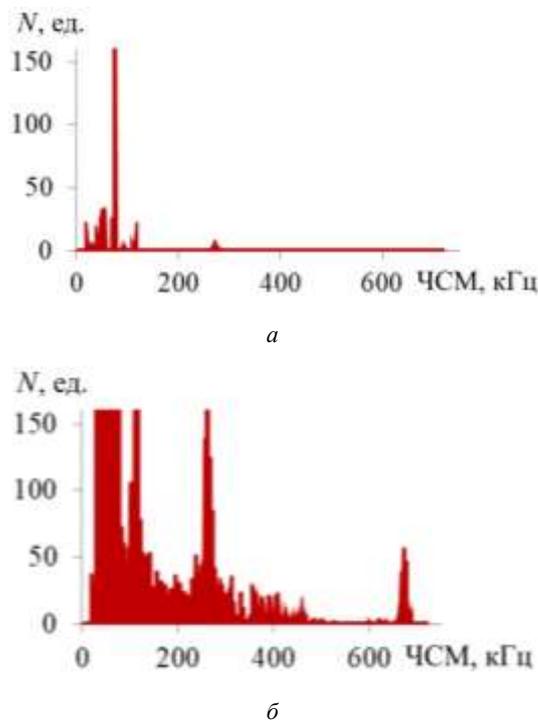


Рис. 8. Распределение частот спектрального максимума для образца без покрытия (а) и образца с покрытием (б)

Fig. 8. The distribution of the frequency of spectral maximum for the sample without coating (a) and the sample with coating (b)

Для контроля растрескивания покрытия в работе также используется бесконтактная трехмерная цифровая оптическая система Vic-3D, математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений DIC. По результатам испытаний на одноосное растяжение были построены эпюры распределения продольных деформаций  $\epsilon_{yy}$  по всей длине испытываемого образца по линии, которая соответствует геометрическому центру образца. На рис. 10 вынесены эпюры, соответствующие полям деформаций (рис. 9), по которым можно судить, в какой момент времени происходило растрескивание покрытия. Первичное растрескивание отмечается в момент времени, равный  $t = 39,6$  с, последующее нагружение приводит к проявлению трещин на поверхности по всему покрытию, о чем свидетельствуют поля продольных деформаций. Неоднородное поле (рис. 9) в момент времени  $t = 47$  с предшествует полному отслоению покрытия от поверхности образца.

Во время испытания образцов без покрытия значения амплитуд находятся в диапазоне от 30 до 60 дБ (см. рис. 5). Стоит отметить, что на образцах без покрытия зарегистри-

стрировано большее количество сигналов АЭ, чем на образцах с покрытием (см. рис. 6). Видно, что максимальное количество сигналов находится в диапазоне от 30 до 50 дБ в обоих случаях. Распределение значений частот спектрального максимума для образцов с покрытием и без находится в диапазоне от 30 до 300 кГц. Для образцов с покрытием наблюдается увеличение значений ЧСМ с момента времени  $t \approx 40$  с до 700 кГц, увеличение числа зарегистрированных сигналов в диапазоне от 50 до 200 кГц и от 250 до 300 кГц (см. рис. 7, б) (момент, когда начинается растрескивание и отслоение керамического покрытия). Важно обозначить, что сигналы АЭ в диапазоне частот от 150 до 250 кГц отсутствуют на образцах без покрытия и присутствуют на образцах с покрытием. Ступенчатая диаграмма частот спектрального максимума (см. рис. 8, б) также свидетельствует о том, что при разрушении образцов с покрытием регистрируются сигналы в диапазоне частот от 150 до 250 кГц. В процессе нагружения в образцах без покрытия данный диапазон частот не регистрируется.

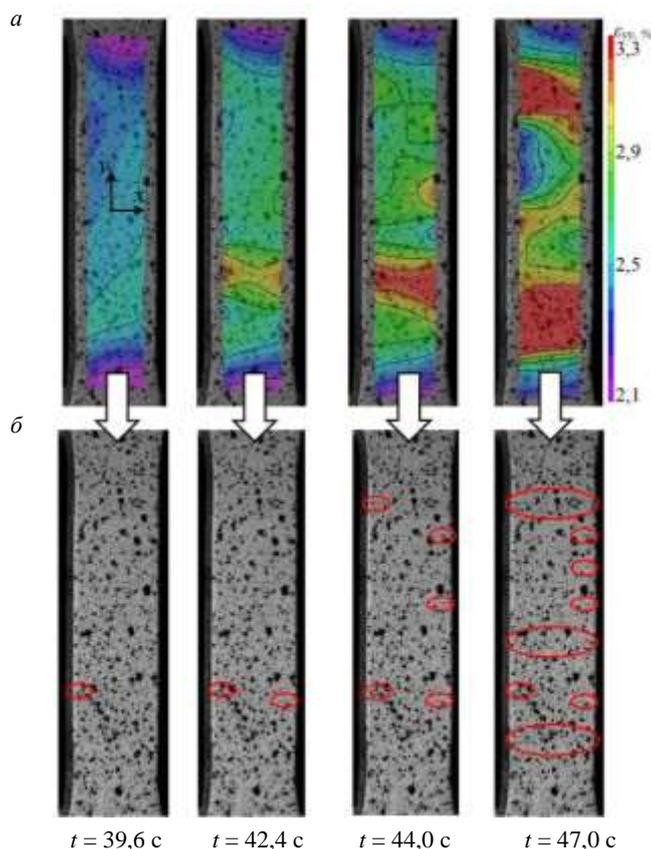


Рис. 9. Неоднородные поля продольных деформаций  $\varepsilon_{yy}$  в соответствующий момент времени  $t$  (а) и черно-белые фотографии эволюции развития трещин на покрытии (б)

Fig. 9. Heterogeneous fields of longitudinal deformations  $\varepsilon_{yy}$  at the appropriate time  $t$  (a) and black and white photographs of the evolution of the development of cracks of the coating (b)

Для образцов с покрытием и без были построены диаграммы растяжения до момента времени  $t = 50$  с. На рис. 11 приведена характерная диаграмма. Условно раз-

делив диаграммы на три стадии, которые соответствуют участку упругого деформирования (I), площадке текучести (II) и участку упрочнения материала (III), вычислили значения некоторых параметров сигналов АЭ для образцов без покрытия и образцов с покрытием для каждой стадии. Характерные значения для количества сигналов АЭ и кумулятивной энергии для образцов с покрытием и без представлены в таблице.

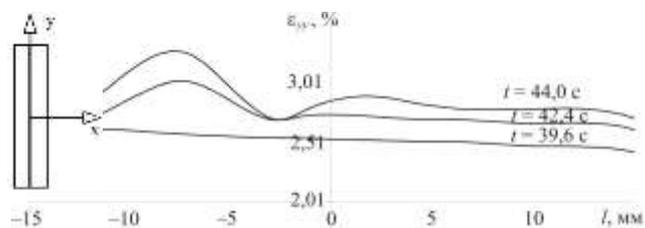


Рис. 10. Эпюры распределения продольных деформаций  $\varepsilon_{yy}$   
Fig. 10. Epure of the distribution of longitudinal deformations  $\varepsilon_{yy}$

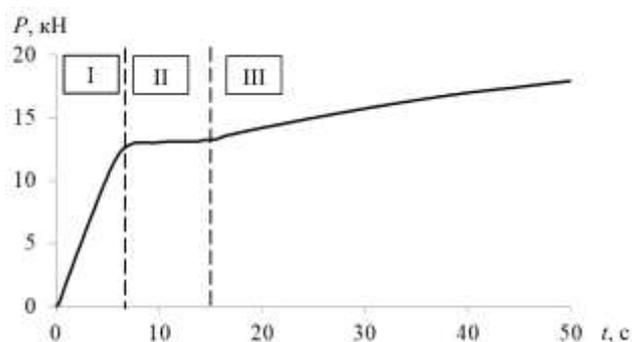


Рис. 11. Диаграмма растяжения образцов Сталь 45 с покрытием и без покрытия

Fig. 11. Diagram of stretching of samples steel 45 with coat without coat

Характерные значения параметров сигнала АЭ на трех участках при испытаниях образцов без покрытия и с покрытием

The characteristic values of the parameters of the AE signal in three areas by testing samples without coating and coated

Параметры	Металлические образцы без покрытия			Металлические образцы с покрытием		
	Участок					
	I	II	III	I	II	III
Количество сигналов, шт.	54	164	60	1471	7476	25336
Кумулятивная энергия, В с	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$11,0 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$
Кумулятивная энергия, %	25,4	39,7	34,9	0,2	0,1	99,3

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что при растяжении образца без покрытия максимальное число

зарегистрированных сигналов АЭ приходится на участок, соответствующий площадке текучести (II), на упругом участке (I) и участке упрочнения образца (III) для всех образцов регистрируется меньшее число сигналов. Данные явления могут быть связаны с движением пластической деформации и описаны в работе [37]. На I и II участках для образцов с покрытием зарегистрировано сигналов АЭ больше на 1–2 порядка в сравнении с теми же участками образцов без покрытия. Увеличение количества зарегистрированных сигналов соответствует процессу деформирования керамического покрытия и накопления повреждений в месте контакта системы «подложка-покрытие». Максимальное число зарегистрированных сигналов АЭ для образца с покрытием приходится на участок упрочнения (III). На данном участке наблюдается активный рост трещин (см. рис. 9) и разрушение покрытия с отслоением его от образца, которое происходит в момент времени  $t = 40$  с, что подтверждается данными с оптической видеосистемы.

Анализируя значения кумулятивной энергии на каждом участке, следует отметить, что для образцов без покрытия на всех трех участках полученные значения схожи. Для образцов с покрытием на участке I и II значения кумулятивной энергии выше на 2–3 порядка по сравнению со значениями на аналогичных участках для образцов без покрытия. Это также подтверждает наличие процессов деформирования покрытия. Кроме того, для образцов с покрытием наблюдается увеличение значений кумулятивной энергии на участке III, что составляет 99 % от значения кумулятивной энергии на рассмотренном участке диаграмм растяжения (до  $t = 50$  с).

## Вывод

В ходе экспериментального изучения процесса образования и роста трещин в функциональном керамическом покрытии при испытаниях на одноосное растяжение был проведен ряд механических испытаний на плоских металлических образцах с покрытием и плоских металлических образцах без покрытия. Проводился непрерывный контроль растрескивания покрытия с использованием системы для регистрации сигналов АЭ и бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы VIC-3D. Отмечается хорошее соотношение меж-

ду экспериментальными данными, полученными с обеих систем.

В ходе работы были построены и проанализированы графики зависимостей акустико-эмиссионных параметров (пиковые значения амплитуд, значения частот спектрального максимума, энергетический параметр) от времени.

В ходе сравнительного анализа полученных результатов акустико-эмиссионного отклика в процессе испытаний на одноосное квазистатическое растяжение отмечается, что процессы деформирования керамического покрытия, нанесенного на образцы из высокопрочного материала Сталь 45, начинаются на участке упругого деформирования (I). На участке упрочнения образца III происходит инициация и распространение трещин в покрытии. Данный процесс сопровождается увеличением параметров сигнала АЭ и фиксируется оптической видеосистемой. Определено, что во время разрушения керамического покрытия регистрируются сигналы в диапазоне амплитуд 60–100 дБ и в диапазоне частот 150–200 кГц. Анализ параметров АЭ на трех участках диаграммы растяжения образца показал, что смена механизмов деформирования и разрушения хорошо выражена для образцов с покрытием.

Стоит отметить, что методика, описанная в данной работе, дает возможность контроля над процессом накопления повреждений и разрушения покрытий, нанесенных на подложки из различных материалов, во время приложения нагрузки.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00452 мол\_а.

Часть работы была проведена в рамках государственного задания Минобрнауки России (9.7529.2017/9.10).

## Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research Project No. 18-31-00452 mol\_a.

Part of the work was carried out within the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (9.7529.2017/9.10).

## Библиографический список

1. Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications / R. Savino, L. Criscuolo, G.D. Di Martino, S. Mungiguerra // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – Vol. 38. – P. 2937–2953. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.043
2. Fahrenholtz W.G., Hilmis G.E. Ultra-high temperature ceramics: Materials for extreme environments // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 129. – P. 94–99. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.018
3. Tang S., Hu C. Design, Preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic compo-

sites for aerospace applications: a review // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – Vol. 33. – P. 117–130. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.08.004

4. Ultra-high temperature ceramic coating for carbon/carbon composites against ablation above 2000 K / Y. Zhang, H. Wang, T. Li, Y. Fu, J. Ren // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44. – P. 3056–3063. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.066

5. Jayaraj B., Vishweswaraiah S., Desai V.H. Electrochemical impedance spectroscopy of thermal barrier coatings as a function of isothermal and cyclic thermal exposure // Surface and Coa-

tings Technology. – 2014. – Vol. 177–178. – P. 140–158. DOI.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.092

6. Jordan D.W., Faber K.T. X-ray residual stress analysis of a ceramic thermal barrier coating undergoing thermal cycling // Thin Solid Films. – 1993. – Vol. 235. – P. 137–141. DOI: 10.1016/0040-6090(93)90256-0

7. Wang X., Mumm D.R., Hutchinson J.W. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Progress in Materials Science. – 2001. – Vol. 46. – P. 505–553. DOI.org/10.1016/S0079-6425(00)00020-7

8. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т 7: в 2 кн. Кн. 1. В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии; Кн. 2: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.

9. Fu L., Khor K.A., Ng H.W. Non-destructive evaluation of plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 130. – P. 233–239. DOI.org/10.1016/S0257-8972(00)00700-3

10. Kawasaki A., Watanabe R. Thermal fracture behavior of metal/ceramic functional graded materials // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – Vol. 69. – P. 1713–1728. DOI.org/10.1016/S0013-7944(02)00054-1

11. Kucuk A., Berndt C.C., Senturk U. Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. II: Acoustic emission response // Materials Science and Engineering A. – 2000. – Vol. 284. – P. 41–50. DOI.org/10.1016/S0921-5093(00)00800-5.

12. Lee K.-H., Park J.-H., Ye K.-H. Acoustic Emission Source Analysis of Vacuum Plasma Sprayed CoNiCrAlY Coatings // Journal of the Korean Physical Society. – 2006. – Vol. 48. – P. 1691–1695.

13. Park J.H., Kimb J.S., Lee K.H. Acoustic emission characteristics for diagnosis of TBC damaged by high-temperature thermal fatigue // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 197–198. – P. 537–541. DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.219

14. Ma X.Q., Cho S., Takemoto M. Acoustic emission source analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings during four-point bend tests // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 139. – P. 55–62. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)00995-1

15. Acoustic emission evaluation of the fracture behavior of APS-TBCs subjecting to bondcoating oxidation / L. Yang, Y.C. Zhou, W.G. Mao, Q.X. Liu // Surface and Interface Analysis. – 2007. – Vol. 39. – P. 761–769. DOI: 10.1002/sia.2586

16. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings / L. Yang, Y.C. Zhou, W.G. Mao, C. Lu // Applied Physics Letter. – 2008. – Vol. 93. DOI: 10.1063/1.3043458 (accessed 12 July 2018).

17. Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model / W. Zhu, L. Yang, J.W. Guo, Y.C. Zhou, C. Lu // International Journal of Plasticity. – 2015. – Vol. 64. – P. 76–87. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.08.003

18. Quantitative assessment of the surface crack density in thermal barrier coatings / L. Yang, Z.C. Zhong, Y.C. Zhou, C.S. Lu // Acta Mechanica Sinica. – 2014. – Vol. 30. – No. 2. – P. 167–174. DOI: 10.1007/s10409-014-0019-8

19. Acoustic emission assessment of interface cracking in thermal barrier coatings / L. Yang, Z.-C. Zhong, Y.-C. Zhou, W. Zhu // Acta Mechanica Sinica. – 2016. – Vol. 32. – No. 2. – P. 342–348. DOI:10.1007/s10409-015-0514-6

20. Yang L., Zhou Y.-C., Lu C. Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: An acoustic emission method // Acta Material. – 2011. – Vol. 59. – P. 6519–6529. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.06.018

21. Effects of the laser treatment and thermal oxidation behavior of CoNiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8 wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coating / J.H. Park, J.S. Kim, K.H. Lee, Y.S. Song, M.C. Kang // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 201. – P. 331–335. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.192

22. Quantitative assessment of the surface crack density in thermal barrier coatings / L. Yang, Z.C. Zhong, Y.C. Zhou, C.S. Lu // Acta Mechanica Sinica. – 2014. – Vol. 30. – No. 2. – P. 167–174. DOI: 10.1007/s10409-014-0019-8

23. Appleby M.P., Zhua D., Morscher. G.N. Mechanical properties and real-time damage evaluations of environmental barrier coated SiC/SiC CMCs subjected to tensile loading under thermal gradients // Surface & Coatings Technology. – 2015. – Vol. 284. – P. 318–326.

24. Мозгалецкий А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.

25. Коллакот Р.А. Диагностика повреждений: пер. с англ. / под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Мир, 1989. – 516 с.

26. Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. – Л.: Наука, 1986. – 219 с.

27. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение кристаллов. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 158 с.

28. Разрушение твердых полимеров / под. ред. Б. Роузена; пер. с англ. – М., 1971. – 528 с.

29. AMSY-6 Handbook. Developed and manufactured by Vallen Systeme GmbH. – 2012.

30. Wildemann V.E., Spaskova E.M., Shilova A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation // Solid State Phenomena. – 2016. – Vol. 243. – P. 163–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.243.163.

31. Шилова А.И. Метод регистрации сигналов акустической эмиссии применительно к исследованию процессов разрушения конструкционных материалов: учеб. пособие / под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 56 с.

32. Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов / А.И. Шилова, Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 221–239. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.09

33. Исследования механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии / А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, Ю.Б. Лямин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 4. – С. 169–179.

34. Оценка работоспособности внедренных в композитный материал волоконно-оптических датчиков с использованием данных цифровой оптической видеосистемы анализа деформаций / В.Э. Вильдеман, Е.М. Струнгарь, Д.С. Лобанов, А.А. Воронков // Дефектоскопия. – 2018. – № 1. – С. 65–71.

35. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.

36. Экспериментальное исследование процессов разрушения полунатурных керамических элементов зубных протезов методом регистрации сигналов акустической эмиссии / А.Г. Рогожников, В.Э. Вильдеман, А.В. Биккулова, Е.М. Зубова, Г.И. Рогожников, О.А. Шулятникова // Российский журнал

биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 230–240. DOI: 10.15593/RZhBiomech/2018.2.07

37. Третьякова Т.В., Зубова Е.М. Оценка влияния дополнительного вибрационного воздействия на закономерности прерывистой текучести на примере Al-Mg сплава и углеродистой стали // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сб. тез. – 2018. – С. 406–407.

## References

1. Savino R., Criscuolo L., Di Martino G.D., Mungiguerra S. Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – V. 38. – pp. 2937–2953. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.043.

2. Fahrenholtz W. G., Hilmas G.E. Ultra-high temperature ceramics: Materials for extreme environments // Scripta Materialia. – 2017. – V. 129. – pp. 94–99. doi:10.1016/j.scriptamat.2016.10.018.

3. Tang S., Hu C. Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review // Journal of Materials Science & Technology. – 2017. – V. 33. – pp. 117–130. doi:10.1016/j.jmst.2016.08.004.

4. Zhang Y., Wang H., Li T., Fu Y., Ren J. Ultra-high temperature ceramic coating for carbon/carbon composites against ablation above 2000 K // Ceramics International. – 2018. – V. 44. – pp. 3056–3063. doi:10.1016/j.ceramint.2017.11.066.

5. Jayaraj B., Vishweswaraiyah S., Desai V.H. Electrochemical impedance spectroscopy of thermal barrier coatings as a function of isothermal and cyclic thermal exposure // Surface and Coatings Technology. – 2014. – V. 177 – 178. – pp. 140–158. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.092.

6. Jordan D.W., Faber K.T. X-ray residual stress analysis of a ceramic thermal barrier coating undergoing thermal cycling // Thin Solid Films. – 1993. – V. 235. – pp. 137–141. doi:10.1016/0040-6090(93)90256-O.

7. Wang X., Mumm D.R., Hutchinson J.W. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Progress in Materials Science. – 2001. – V. 46. – pp. 505–553. doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00020-7.

8. Nerazrushayushij kontrol': spravochnik: 8 t./ pod obshh. red. V.V. Klyueva. T 7: v 2 kn. Kn. 1: V.I. Ivanov, I.EH. Vlasov. Metod akusticheskoy ehmissii; Kn. 2: F.YA. Balitskij, A.V. Barkov, N.A. Barkova [i dr.] Vibrodiagnostika. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 829 p.

9. Fu L., Khor K.A., Ng H.W. Non-destructive evaluation of plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 2000. – V. 130. – pp. 233–239. doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00700-3.

10. Kawasaki A., Watanabe R. Thermal fracture behavior of metal/ceramic functional graded materials // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – V. 69. – P. 1713–1728. doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00054-1.

11. Kucuk A., Berndt C.C., Senturk U. Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. II: Acoustic emission response // Materials Science and Engineering A. – 2000. – V. 284. – pp. 41–50. doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00800-5.

12. Lee K.-H., Park J.-H., Ye K.-H. Acoustic Emission Source Analysis of Vacuum Plasma Sprayed CoNiCrAlY Coatings // Journal of the Korean Physical Society. – 2006. – V. 48. – pp. 1691–1695.

13. Park J.H., Kimb J.S., Lee K.H. Acoustic emission characteristics for diagnosis of TBC damaged by high-temperature thermal fatigue // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 197–198. – pp. 537–541. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.219.

14. Ma X.Q., Cho S., Takemoto M. Acoustic emission source analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings during four-point bend tests // Surface and Coatings Technology. – 2001. – V. 139. – pp. 55–62. doi:10.1016/S0257-8972(01)00995-1.

15. Yang L., Zhou Y.C., Mao W.G., Liu Q.X. Acoustic emission evaluation of the fracture behavior of APS-TBCs subjected to bondcoating oxidation // Surface and Interface Analysis. – 2007. – V. 39. – pp. 761–769. doi:10.1002/sia.2586.

16. Yang L., Zhou Y.C., Mao W.G., Lu C. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings [Электронный документ] // Applied Physics Letter. – 2008. – V. 93. doi:10.1063/1.3043458. Проверено 12.07.2018.

17. Zhu W., Yang L., Guo J.W., Zhou Y.C., Lu C. Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model // International Journal of Plasticity. – 2015. V. 64. – pp. 76–87. doi:10.1016/j.ijplas.2014.08.003.

18. Yang L., Zhong Z.C., Zhou Y.C., Lu C.S. Quantitative assessment of the surface crack density in thermal barrier coatings // Acta Mechanica Sinica. – 2014. Vol. 30. No. 2. – pp. 167–174. doi: 10.1007/s10409-014-0019-8.

19. Yang L. Zhong Z.-C., Zhou Y.-C., Zhu W.. Acoustic emission assessment of interface cracking in thermal barrier coatings // Acta Mechanica Sinica. – 2016. V. 32. No. 2. – pp. 342–348. doi:10.1007/s10409-015-0514-6.

20. Yang L., Zhou Y.-C., Lu C. Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: An acoustic emission method // Acta Material. – 2011. – V. 59. – pp. 6519–6529. doi:10.1016/j.actamat.2011.06.018.

21. Park J.H., Kim J.S., Lee K.H., Song Y.S., Kang M.C. Effects of the laser treatment and thermal oxidation behavior of CoNiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8 wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coating // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – V. 201. – pp. 331–335. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.192.

22. Yang L., Zhong Z.C., Zhou Y.C., Lu C.S. Quantitative assessment of the surface crack density in thermal barrier coatings // Acta Mechanica Sinica. – 2014. V. 30. No. 2. – pp. 167–174. doi: 10.1007/s10409-014-0019-8.

23. Appleby M.P., Zhua D., Morscher. G.N. Mechanical properties and real-time damage evaluations of environmental barrier coated SiC/SiC CMCs subjected to tensile loading under thermal gradients // Surface & Coatings Technology. – 2015. – Vol 284. – pp. 318–326.

24. Mozgalevskij A.V., Gaskarov D.V. Tekhnicheskaya diagnostika. – M.: Vysshaya shkola, 1975. – 207 p.

25. Kollakot, R.A. Diagnostika povrezhdenij: Per. s angl. / R. Kollakot; Pod red. P. G. Babaevskogo. – M.: Mir, 1989. – 516 p.
26. Vladimirov V.I., Romanov A.E. Disklinatsii v Kristallakh. – L.: Nauka, 1986. – 219 p.
27. Kottrell A.K.H. Dislokatsii i plasticheskoe techenie kristallov. – Metallurgizdat, 1958. – 158 p.
28. Razrushenie tverdykh polimerov / Pod. red. B. Rouzena. Per. s angl. M., 1971. – 528 p.
29. AMSY-6 Handbook. Developed and manufactured by Vallen Systeme GmbH. – 2012
30. Wildemann V. E., Spaskova E. M., Shilova A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 243. – pp. 163-170. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.243.163.
31. Shilova A.I., Lobanov D.S., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Experimental study of the effect of fabric high temperature treatment on the composite strength properties. PNRPU Mechanics Bulletin. 2014. No. 4. Pp. 221-239. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.09.
32. Shilova A.I., Lobanov D.S., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Experimental study of the effect of fabric high temperature treatment on the composite strength properties. PNRPU Mechanics Bulletin. 2014. No. 4. Pp. 221-239. doi: 10.15593/perm.mech/2014.4.09.
33. Shilova A.I., Wildemann V.E., Lobanov D.S., Lyamin Y.B. Issledovaniya mekhanizmov razrusheniya uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na osnove mekhanicheskikh ispytaniy s registratsiej signalov akusticheskoy ehmissii // Vestnik PNRPU. Mekhanika. – 2013. – №4. – pp. 169-179.
34. Wildemann V.E., Strungar E.M., Lobanov D.S., Voronkov A.A. Ocenka rabotosposobnosti vnedrennyh v kompozitnyj material volokonno-opticheskikh datchikov s ispolzovaniem dannyh cifrovoj opticheskoy videosistemy analiza deformacij // Defektoskopiya. – №1. – 2018. – pp. 65-71.
35. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
36. Rogozhnikov A.G., Wildemann V.E., Bikkulova A.V., Zubova E.M., Rogozhnikov G.I., Shuliatnikova O.A. Experimental study of the processes of destruction of ceramic elements of teeth prosthesis by acoustic emission technique // Russian Journal of Biomechanics. – 2018. – T. 22. – №2. – pp. 230-240. doi:10.15593/RZhBiomech/2018.2.07.
37. Tretyakova T.V., Zubova E.M. Ocenka vliyaniya dopolnitelnogo vibracionnogo vozdejstviya na zakonmernosti preryvistoj tekuchesti na primere Al-Mg splava i uglerodistoj stali // Mekhanika resurs i diagnostika materialov i konstrukcij sbornik tezisov. – 2018. – pp.406-407.