

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **М. П. Козочкин**, д. т. н. **С. Н. Григорьев**,
К. т. н. **С. Ю. Федоров**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

УДК 666.3:532.526.75].017:621.9.048.6

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА К ИЗМЕНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИКИ ПРИ ТРЕНИИ

Установлена высокая информативность виброакустического сигнала в частотном диапазоне 10–16 кГц к изменению состояния поверхностного слоя керамического образца при фрикционном взаимодействии со стальным диском. Полученные результаты указывают на возможность использования систем вибродиагностики для контроля состояния керамических деталей при эксплуатации и натурных испытаниях.

Ключевые слова: керамика, виброакустический (ВА) сигнал, поверхностный слой (ПС), среднеквадратичное значение (СКЗ) виброускорения, фрикционное взаимодействие (ФВ), износ, разрушение.

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокотемпературных установок с принципиально новым уровнем выходных характеристик возможно в результате замены деталей из жаропрочных сплавов на керамику [1, 2]. Керамические детали, изготовленные с использованием современных технологий и методов поверхностной инженерии, имеют более высокую температуру службы, чем детали из жаропрочных сплавов [3]. Однако данных о позитивной разнице других характеристик нет, что является сдерживающим фактором в расширении области применения конструкционной керамики [4]. Более того, отсутствие информации о взаимосвязи свойств керамики с поведением керамических деталей при эксплуатации создает многочисленные риски при использовании высокотемпературного материала [5]. В этой связи сбор первичной информации о поведении керамических деталей при высокотемпературной эксплуатации и последующая систематизация этой информации — актуальная научная задача.

Один из путей решения этой задачи — использование косвенных методов контроля над состоянием керамических деталей при эксплуатации и натурных испытаниях. С учетом

многолетнего опыта авторов статьи в создании систем диагностирования технологических систем с использованием виброакустического (ВА) сигнала [6, 7] в МГТУ «Станкин» проведен комплекс исследований по оценке перспектив применения вибродиагностики керамических деталей для контроля их состояния. Основной упор сделан на изучение взаимосвязи разрушение керамики – ВА сигнал: 1 — для прогнозирования частичного разрушения керамических деталей по косвенным информативным признакам в режиме непрерывного снятия и обработки ВА сигнала; 2 — для определения вибропрочности керамики и предельно допустимых вибраций при эксплуатации; 3 — для уточнения области приоритетного внедрения керамических деталей с использованием результатов вибродиагностики. Результаты этих исследований будут представлены в серии статей.

В настоящей работе поставлена цель — разработать методику экспериментального исследования и оценить чувствительность вибросигнала к изменению состояния (структуры и морфологии) поверхностного слоя (ПС) керамики в начальный момент фрикционного взаимодействия (ФВ) с контртелом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в три этапа: *первый* — запись и анализ ВА сигнала при трении, *второй* — изучение исходной структуры ПС керамики и состояния контактных площадок через определенные интервалы ФВ образцов с диском, *третий* — анализ взаимосвязи среднеквадратично-



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

го значения (СКЗ) виброускорения (далее СВЗ) с состоянием ПС керамики при ФВ и выявление природы этой зависимости. Выбор СКЗ в качестве базового диагностического параметра для анализа состояния ПС керамики связан с его высокой информативностью в области высоких частот и хорошим отображением импульсного взаимодействия во фрикционном контакте [7].

Эксперименты по трению проводили на лабораторном стенде [8] для исследования схемы вращающийся диск – неподвижный образец (рис. 1, а). Стенд оснащен вибродиагностическим комплексом в составе акселерометра, предусилителя 6, усилителя 7, аналого-цифрового преобразователя 8 и компьютера 9 с соответствующим программным обеспечением [9]. К вращающемуся диску 1 диаметром 80 мм и толщиной 2,8 мм из стали 45 (50–52 HRC), закрепленному в патроне токарного станка, поджимали образец 2 из оксидно-карбидной керамики ВСК-71 размерами 12×12×4,7 мм, закрепленный в тисках на рычаге 3 с помощью груза 4. Датчик 5 крепили на рычаге с противоположной стороны образца. Режим трения: частота вращения диска 750 мин⁻¹, сила прижима образца к диску F 30 Н, время фрикционного контакта t 15 с. После каждого эксперимента диск протачивали резцом без демонтажа со стенда; предельное значение радиального биения диска не превышало 0,015 мм.

Каждый эксперимент включал холостой (без трения) и рабочий (с трением) режимы, причем длительность этих режимов составляла 1 и 15 с соответственно. ВА сигнал (в направлении оси z) записывали в течение всего эксперимента, а затем из него с помощью фильтров выделяли с шагом 0,1 с СКЗ в трех частотных диапазонах: 2–4, 5–6 и 10–14 кГц, которые анализировали в десяти временных интервалах. Характер изменения СКЗ в диапазоне 0–14,4 с оценивали с использованием статистических характеристик (наименьших, наибольших, средних) и стандартного отклонения s . Статистиче-

ский анализ данных проводили с помощью программного комплекса Statistica.

В качестве примера на рис. 1, б показана запись ВА сигнала по оси z , на котором видно значительное изменение амплитуды сигнала на холостом 1 и рабочем 2 режимах. ВА сигнал на режиме 1 формируется за счет возмущений на частотах вращения вала и кратных гармоник, а также за счет погрешностей изготовления и сборки опор шпиндельного узла. В момент появления фрикционного контакта амплитуда ВА сигнала резко возрастает за счет появления ударных импульсов, обусловленных взаимодействием неровностей поверхностей контактирующих тел и радиальным биением диска.

Состояние ПС на образцах изменяли с помощью импульсной лазерной обработки на установке U-15 RMI Laser. На опорных поверхностях образцов (по 5 шт. в каждой партии) обрабатывали контактные площадки размерами 5×5 мм. Обрабатывали образцы, помещенные в воду на глубину 1 мм, с шагом 40 мкм построчного перемещения лазерной головки по двум координатам $s_x = s_y$. При обработке изменяли мощность P импульсов (5–15 Вт) при частоте импульсов 30 кГц. В экспериментах использовали образцы O1, O2, O3 и O4, обработанные при P , равной 5, 10, 12 и 15 Вт соответственно.

После эксперимента на трение образцы очищали в ультразвуковой мойке Elmasonic S70, а затем с помощью оптического микроскопа Olympus BX51M, 3D измерительной системы MikroCAD Premium и сканирующего электронного микроскопа Vega 3LMH (Tescan) изучали морфологию их поверхности и характер разрушения ПС образцов на участке износа. Токопроводящую пленку углерода на образцы наносили в установке Quorum Q150R ES. Параметр шероховатости Ra обработанной поверхности измеряли на приборе Hommel Tester T8000.

Использовали единую систему координирования образцов при шлифовании, лазерной обработке и трении (см. рис. 1, а): ось x — продольное направление шлифования и плоскость вращения диска, ось y (не показана) — поперечное направление шлифования, ось z — направление, нормальное опорной поверхности образца при трении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования СКЗ в трех диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц для образцов O1, O2, O3 и O4, показанные на рис. 2, имеют свои особенности. *Первая особенность* — характер изменения СКЗ от времени существенно различается; наиболее хаотичный вид имеют кривые диапазона 2–4 кГц (см. рис. 2, а), а наиболее стабильный — кривые диапазона 10–16 кГц (см. рис. 2, в). *Вторая особенность* — СКЗ

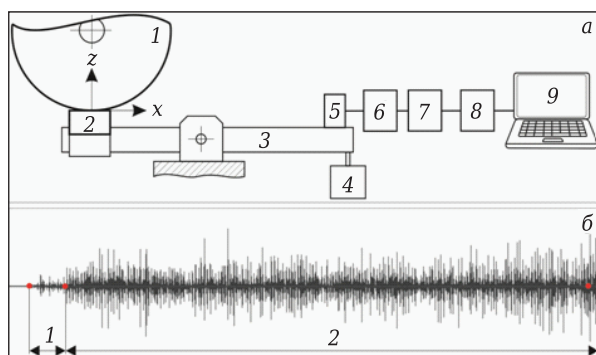


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для исследования вибрации при трении (а) и пример записанного ВА сигнала при проведении эксперимента (б)

в начальный момент ФВ для разных образцов значительно различаются, например для диапазона 10–16 кГц более чем в 2,5 раза. Третья особенность — присутствие узких и широких диапазонов изменения СКЗ в определенные временные интервалы. В диапазоне 2–4 кГц узкие диапазоны изменения СКЗ (10 мВ) зафиксированы в начальный момент трения и в интервале 10–12 с, широкий диапазон изменения СКЗ (40 мВ) зафиксирован в интервале 4–6 кГц (см. рис. 2, а). В диапазоне 5–8 кГц узкий диапазон изменения СКЗ (15 мВ) зафиксирован в интервале 4–6 с, широкий (31 мВ) — в интервале 8–10 с (см. рис. 2, б). В диапазоне 10–16 кГц узкий диапазон изменения СКЗ (7 мВ) зафиксирован в интервале 4–6 с, широкий (45 мВ) — в интервале 10–12 с (см. рис. 2, в).

Зависимость СКЗ от времени ФВ τ в диапазоне 2–4 кГц показана на рис. 2, а. Видно, что четыре кривые достаточно хаотично изменяются при общей закономерности к росту. Установлено, что СКЗ для образца О1 изменяется от 108 до 140 мВ при среднем значении 122,1 мВ и $s = 10,04$, для образца О2 — от 90 до 120 мВ при среднем значении 104,8 мВ и $s = 10,4$, для образца О3 — от 100 до 120 мВ при среднем значении 110,5 мВ и $s = 5,5$, для образца О4 — от 102 до 125 мВ при среднем значении 111,9 мВ и $s = 7,1$.

Зависимость СКЗ от τ в диапазоне 5–8 кГц показана на рис. 2, б. Видно, что кривые имеют более стабильный характер изменения, чем в диапазоне 2–4 кГц; четко прослеживается возрастающий ход всех кривых. Установлено, что СКЗ для образца О1 изменяется от 37 до 62 мВ при среднем значении 49,7 мВ и $s = 6,1$, для образца О2 — от 50 до 70 мВ при среднем значении 57,5 мВ и $s = 7,8$, образца О3 — от 58 до 75 мВ при среднем значении 66,3 мВ и $s = 8,6$, образца О4 — от 36 до 52 мВ при среднем значении 44,1 мВ и $s = 5,9$.

Зависимость СКЗ от τ в диапазоне 10–16 кГц показана на рис. 2, в. Видно, что кривые имеют достаточно стабильный и синхронный характер изменения при общей закономерности к росту. Установлено, что СКЗ для образца О1 изменяется от 11 до 29 мВ при среднем значении 20,5 мВ и $s = 5,5$, для образца О2 — от 24 до 50 мВ при среднем значении 34,8 мВ и $s = 9,4$, для образца О3 — от 26 до 52 мВ при среднем значении 37,4 мВ и $s = 6,9$. Четко просматриваются три временных диапазона с одинаковым характером хода всех кривых. В первом диапазоне от 0 до 6 с все кривые направлены вверх, во втором диапазоне от 7 до 10 с меняют направление, проходят минимум, а затем выходят на максимум, в третьем диапазоне от 11 до 14,4 с кривые ориентированы вниз.

Для выявления корреляции характера этих кривых с состоянием ПС керамики исследовали структуру и морфологию ПС образцов после

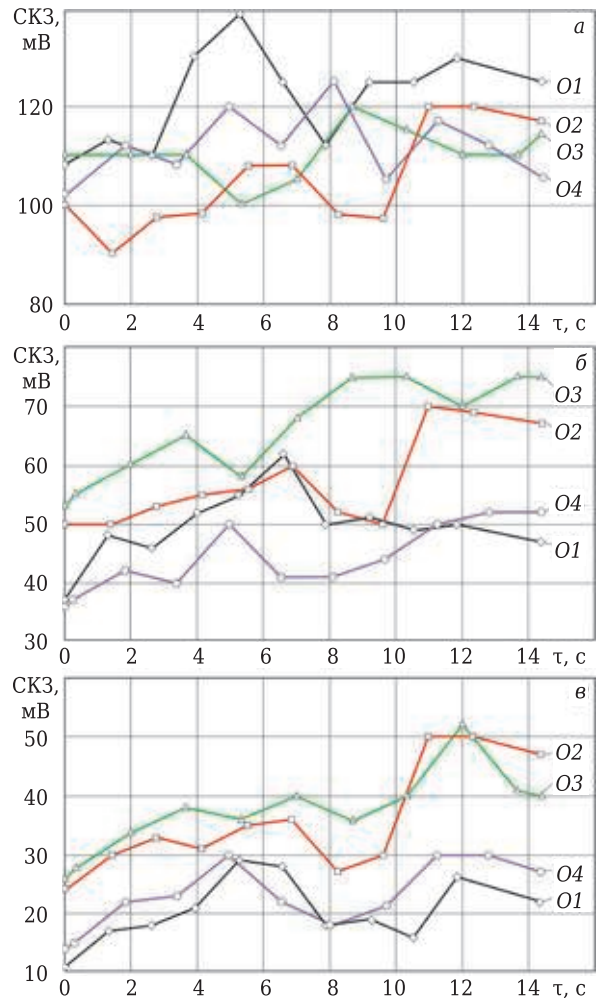


Рис. 2. Характер изменения СКЗ в диапазонах 2–4 (а), 5–8 (б) и 10–16 кГц (в) при ФВ образца с диском

лазерной обработки. Состояние ПС керамики после лазерной обработки характеризуется морфологическими рисунками трех видов [10, 11]. Первый вид — мелкозернистая плотная структура керамики, сформировавшаяся при спекании и проявляющаяся после разрушения ПС, образовавшегося в результате лазерной обработки. Второй вид — пластически деформированный слой с дефектной структурой, образовавшийся при алмазном шлифовании. Третий вид — аморфный слой с кратерами, порами, застывшими каплями и разнонаправленными трещинами после лазерной обработки. Соотношение площадей этих структур в общем случае определяет состояние ПС керамики после лазерной обработки.

Пример существенного влияния P при лазерной обработке на состояние ПС керамики показан на рис. 3 в виде микрофотографий поверхностей образцов О1, О2, О3 и О4, обработанных при P , равной 5, 10, 12 и 15 Вт соответственно. На поверхности образца О1 имеются крупные фрагменты шлифованной поверхности

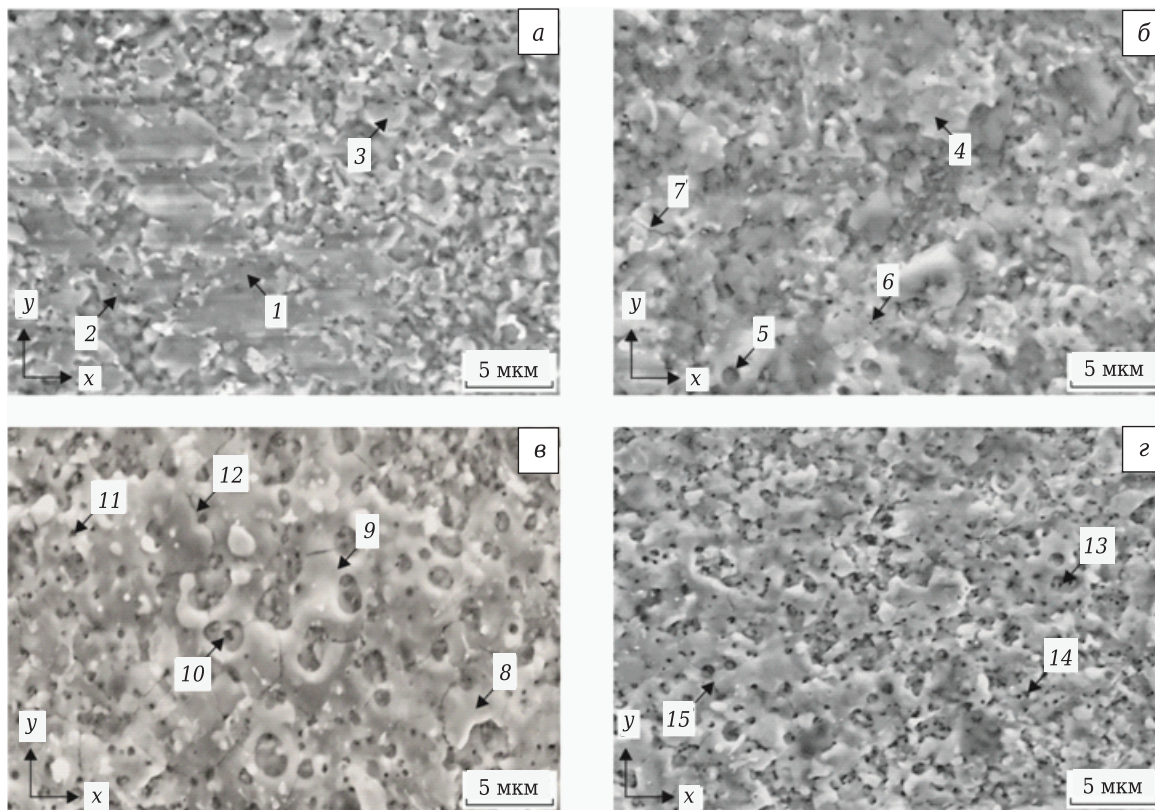


Рис. 3. Состояние ПС образцов О1 (а), О2 (б), О3 (в) и О4 (г)

1 с характерными параллельно расположенными впадинами и выступами, дополняемые областями локального разрушения, трещинами и рисками (см. рис. 3, а). Присутствуют также фрагменты исходной структуры керамики 2 с измельченными зернами керамики и оплавленными вершинами, фрагменты аморфного слоя 3 с кратерами и порами.

Морфология поверхности образца О2 показана на рис. 3, б. Видно, что большая часть поверхности покрыта мелкокапельной фазой 4, образующей дискретный слой аморфной структуры. В этом слое присутствуют многочисленные кратеры 5 размерами до 1 мкм, поры 6 размерами до 0,5 мкм и трещины 7, траектория роста которых проходит через соседние кратеры и поры. На поверхности этого образца обнаружены фрагменты исходной структуры керамики (на рисунке не показаны).

Морфологию поверхности образцов О3 формирует равномерно распределенный многоуровневый аморфный слой, образованный крупными расплюснутыми каплями 8 (см. рис. 3, в). На поверхности имеются пузырчатые вспучивания 9 размерами до 5 мкм, кратеры 10 размерами до 3 мкм и поры 11 размерами до 1 мкм. Соседние кратеры и поры соединяют трещины 12. Фрагменты шлифованной поверхности и исходной структуры керамики на этой поверхности отсутствуют.

Особенностью поверхности образца О4 является весьма развитая структура аморфного

слоя, образованного мелкими каплями (см. рис. 3, г). На поверхности имеются мелкие кратеры 13 размерами до 1 мкм, поры 14 размерами до 0,3 мкм и единичные трещины 15, проходящие через цепочки пор.

Очевидно, что столь существенные различия в состоянии ПС керамики разных образцов могут являться основной причиной значительной разницы в СКЗ в начальный момент ФВ образцов с диском. Это свидетельствует о высокой чувствительности ВА сигнала к структуре и морфологии ПС керамики.

Исследование контактных площадок на образцах О1, О2, О3 и О4 через 1, 5, 10 и 15 с показало, что изменения состояния ПС керамики при ФВ с диском в этот период времени можно разделить на *три этапа*. Проанализируем эти изменения, действующие механизмы и их взаимосвязь с СКЗ в диапазоне 10–16 кГц.

Установлено, что на *первом этапе* ФВ (0–6 с) происходит первичный контакт поверхностей образца и диска по выступам на них, в результате чего уже через 1 с после начала трения происходят локальные разрушения аморфного слоя, образовавшегося на поверхности образцов при лазерной обработке. В аморфном слое 1 под действием силовой и тепловой нагрузки происходит интенсивный рост трещин 2, приводящий к отслоению фрагментов 3, причем интенсифицируют этот процесс многочисленные дефекты 4 — кратеры и поры (рис. 4, а). Наибольшая интенсивность разру-

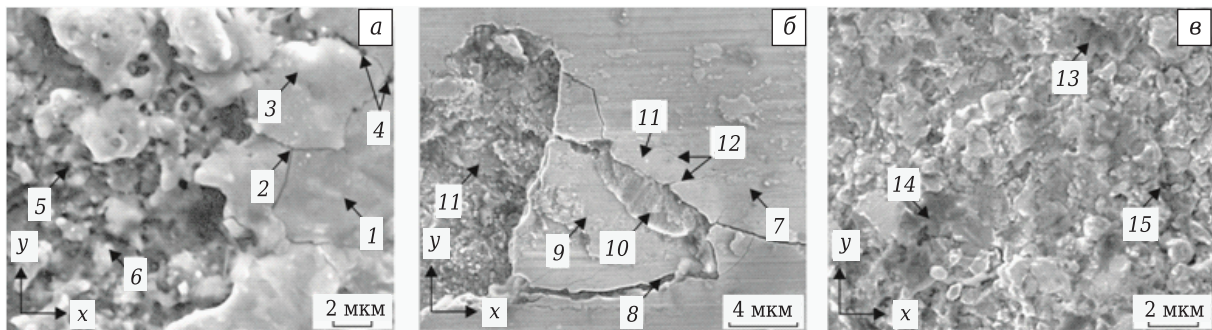


Рис. 4. Основные этапы изменения состояния ПС керамики при ФВ образца с диском

шения аморфного слоя зафиксирована на образце *O3*, наименьшая — на образце *O1*, что в полной мере коррелирует с соответствующими данными зависимости t –СКЗ в диапазоне 10–16 кГц в начальный момент ФВ (см. рис. 2, в).

После локального разрушения аморфного слоя обнажаются участки 5 исходной структуры керамики. Острые грани зерен керамики инициируют срезание с поверхности диска микростружки, которая заполняет пространство между зернами. Налипшие частицы-стружки 6 создают многочисленные «островки» для зарождения адгезионных мостиков. Повышение температуры в зоне контакта образца с диском приводит к уменьшению его поверхностной твердости и увеличению интенсивности образования адгезионных мостиков. Совокупность выявленных явлений, протекающих на первом этапе ФК, вполне может являться основной причиной увеличения СКЗ в диапазоне 10–16 кГц в период времени 0–6 с (см. рис. 2, в).

На *втором этапе* ФВ (7–10 с) запускается адгезионный механизм взаимодействия керамики со сталью, результатами которого являются интенсивное образование и разрушение налипов металла на контактной площадке образца. Первоначально налипы образуются на уже существующих адгезионных мостиках в областях локального разрушения аморфного слоя. После заполнения металлом этих областей налипы начинают «намазываться» на неразрушенный аморфный слой. Площадь налипов увеличивается, а форма вытягивается в направлении оси x , причем наиболее крупные налипы достигают размеров до 0,4 мм при толщине до 5 мкм. Замеры показали, что по окончании второго этапа ФВ площадь налипов занимает 45, 55, 40 и 30 % общей площади участка контакта на образцах *O1*, *O2*, *O3* и *O4* соответственно. При столь больших площадях, занимаемых налипами, и повышении температуры в зоне контакта образца с диском внешнее трение преобразуется во внутреннее, что является причиной уменьшения СКЗ в диапазоне 10–16 кГц (см. рис. 2, в) в период 7–10 с.

Третий этап ФВ (11–15 с) характеризуется явлениями, свойственными адгезионному из-

носу и приводящими к полному разрушению аморфного слоя и начальному разрушению исходной структуры керамики. Процесс разрушения налипа 7 проиллюстрирован на рис. 4, б. Видно, что в этом процессе принимают активное участие многочисленные растущие и ветвящиеся трещины 8, которые при своем развитии замыкаются друг на друга и отделяют частицы 9, которые затем скалываются. В этом процессе участвуют ранее отделившиеся частицы 10, которые выполняют функцию клина, приводящего к пластической деформации 11 тонкого слоя налипа и образованию трещин 12.

После разрушения налипа обнажается исходная структура керамики, в которой обнаружены углубления от вырыва единичных зерен 13 и конгломератов зерен 14, а также разнонаправленные трещины 15 (рис. 4, в). При дальнейшем ФВ эти трещины приводят к разрушению керамики и образованию площадки износа. На образцах *O1*, *O2*, *O3* и *O4* зафиксированы площадки износа шириной 1,5, 1,7, 1,4 и 1,3 мм соответственно, которые хорошо согласуются с расположением кривых на рис. 2, в. Более того, циклическая природа адгезионного механизма износа отражается на характере изменения СКЗ в диапазоне 10–16 кГц (см. рис. 2, в) в период времени 11–15 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований с использованием разработанной методики проведена оценка чувствительности вибросигнала к изменению состояния (структуры и морфологии) ПС керамики при ФВ образца с диском и установлена высокая информативность ВА сигнала в диапазоне 10–16 кГц. Показано, что состояние ПС керамики существенно влияет на уровень СКЗ в диапазоне 10–16 кГц. Вскрыта физическая природа взаимосвязи состояния ПС керамики с ВА сигналом. Полученные результаты указывают на возможность использования систем вибродиагностики для контроля состояния керамических деталей при эксплуатации и натурных испытаниях.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

Библиографический список

1. **Wang, Xiulei.** Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review / *Xiulei Wang, Xiaodong Gao, Zhenghe Zhang* [et al.] // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2021. — Vol. 41, № 9. — P. 4671–4688.
2. **Sun, Liangbo.** Joining of C/SiC composites and Si₃N₄ ceramic with Y₂O₃–Al₂O₃–SiO₂ glass filler for high-temperature applications / *Liangbo Sun, Xiaosong Shi, Xinyu Liu* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2021. — Vol. 47, № 11. — P. 15622–15630.
3. **Vaferi, Kourosh.** Thermo-mechanical simulation of ultrahigh temperature ceramic composites as alternative materials for gas turbine stator blades / *Kourosh Vaferi, Mohammad Vajdi, Sahar Nekahi* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2021. — Vol. 47, № 1. — P. 567–580.
4. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / *V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova* [et al.] // *Applied Mechanics and Materials.* — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.
5. **Kuzin, V.** Effect of thermal loading on stresses in defective surface layer of ceramics / *V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Portnoy* // *Applied Mechanics and Materials.* — 2016. — Vol. 827. — P. 189–192.
6. **Kozochkin, M. P.** Effect of adhesion bonds in friction contact on vibroacoustic signal and autooscillations / *M. P.*

Kozochkin, A. N. Porvatov // *Journal of Friction and Wear.* — 2014. — Vol. 35, № 5. — P. 389–395.

7. **Kozochkin, M. P.** Study of frictional contact during grinding and development of phenomenological model / *M. P. Kozochkin* // *Journal of Friction and Wear.* — 2017. — Vol. 38, № 4. — P. 333–337.

8. **Kuzin, V. V.** Effect of conditions of diamond grinding on tribological behavior of alumina-based ceramics / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, A. E. Seleznev* // *Journal of Friction and Wear.* — 2016. — Vol. 37, № 4. — P. 371–376.

9. The certificate of state registration of computer programs № 2009613214 / *N. A. Kochinev, F. S. Sabirov, M. P. Kozochkin.*

10. **Kuzin, V. V.** Effect of pulsed laser radiation on the surface of ceramic VOK71 / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 390–393.

Кузин, В. В. Воздействие импульсного лазерного излучения на поверхность керамики ВОК71 / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2015. — № 7. — С. 48–52.

11. **Kuzin, V. V.** Features of pulsed laser radiation action on a ceramic VOK71 surface in water / *V. V. Kuzin, M. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov* [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 394–397.

Кузин, В. В. Особенности воздействия импульсного лазерного излучения на поверхность керамики ВОК71 в воде / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2015. — № 8. — С. 43–46. ■

Получено 27.04.21

© В. В. Кузин, М. П. Козочкин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



EGF 2021 — 6-й ЕВРОПЕЙСКИЙ ФОРУМ ПО ГРАФЕНУ
20–22 октября 2021 г. Милан, Италия

www.expo-europe.ru



Graphene 2021 — Европейская конференция и выставка графена и 2D-материалов
26–29 октября 2021 г. Гренобль, Франция

<http://www.grapheneconf.com/2021/venue.php>