

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

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

УДК 666.3:532.526.75].017:621.9.048.6

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА С ИЗНОСОМ КЕРАМИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СТАЛЬНЫМ ДИСКОМ

С использованием разработанной методики установлена полная корреляция между размерами участка износа на образцах оксидно-карбидной керамики и среднеквадратичным значением виброускорения в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц при фрикционном взаимодействии со стальным диском. Выявленную взаимосвязь рекомендовано использовать для разработки вибродиагностирования состояния керамических режущих инструментов и деталей трибоузлов.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Появление эксплуатационных дефектов на изделиях, в том числе керамических, способен зафиксировать виброакустический (ВА) сигнал, который отличается высокой чувствительностью к изменению характеристик колебательного процесса технической системы [1–8]. Современные методики, средства и алгоритмы диагностирования состояния машинного оборудования с использованием ВА сигнала позволяют идентифицировать вид дефекта и определить его расположение [9–14]. Установлено [15], что чувствительность ВА сигнала можно применять для диагностирования состояния керамических инструментов и деталей трибоузлов и, соответственно, для решения их основных проблем (внезапные отказы, эксплуатационная надежность). Однако создание методики эффективного вибродиагностирования технических объектов, эксплуатируемых в экстремальных условиях, предполагает использование формализованных взаимосвязей параметров разных дефектов на поверхностях трибоузлов, контактирующих между собой или с внешней средой, с характеристиками ВА

сигнала [16]. Их отсутствие в настоящее время определяет актуальность настоящего исследования.

Показано [17, 18], что состояние керамических инструментов при эксплуатации определяется двумя основными видами дефектов: участком «чистого» износа и областью локального разрушения (скол, вырыв), поразному влияющих на вероятность отказов. Идентификация этих дефектов по ВА сигналу значительно затрудняется единой природой их образования (хрупкое разрушение), сильным взаимным влиянием (износ, как правило, сопровождается образованием областей локального разрушения), одновременным появлением нескольких дефектов и малым изменением ВА сигнала [19, 20]. Между тем существует особенность в образовании этих дефектов: формирование и стабильное увеличение размера участка «чистого» износа происходит за счет разрушения поверхностного слоя (ПС) керамики, а в локальном разрушении задействованы как ПС керамики, так и ее внутренние (подповерхностные) объемы [17, 18]. В первом случае интенсивность процесса определяется состоянием (структурой) ПС керамики, во втором — состоянием ПС и внутреннего объема керамики, а также границами между ними. Эту особенность авторы настоящей статьи использовали для решения задачи идентификации основных дефектов при фрикционном взаимодействии (ФВ) с заготовкой и контртелом.



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

Цель работы — выявить взаимосвязь размера участка «чистого» износа на керамическом образце с изменением среднеквадратичного значения (СКЗ) виброускорения при ФВ со стальным диском для разработки методики вибродиагностирования состояния керамических режущих инструментов и деталей трибозулов.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

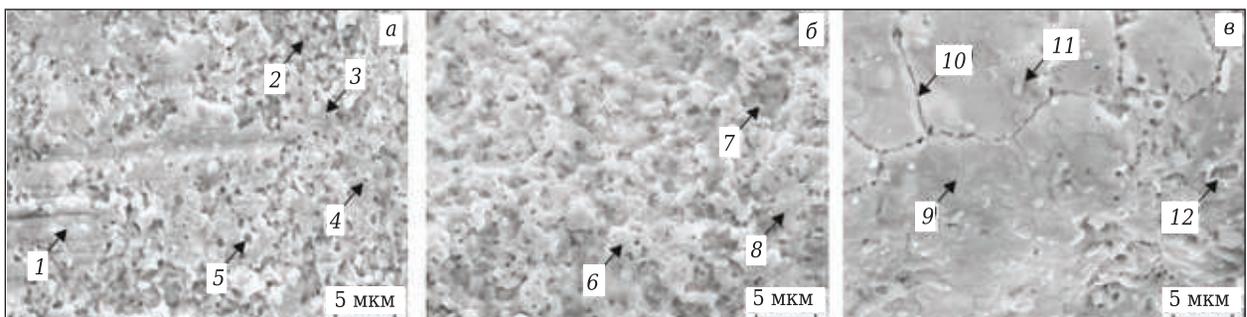
Основное требование к разработанной методике заключалось в получении экспериментальных данных для анализа цепочки взаимосвязей состояния ПС керамики — разрушение ПС — образование участка «чистого» износа — изменение СКЗ виброускорения при отсутствии влияния внутреннего (подповерхностного) объема керамики на элементы этой цепочки. При разработке методики учли выводы [16–18], в которых установлена взаимосвязь структуры и морфологии ПС оксидно-карбидной керамики с СКЗ виброускорения (далее СКЗ) при ФВ со стальным диском [16] и определены основные закономерности разрушения ПС оксидно-карбидной керамики при ФВ, учитывающие его состояние [17, 18].

ФВ неподвижного образца оксидно-карбидной керамики ВОК-71 с вращающимся стальным диском (сталь 45, HRC 50–52) исследовали на лабораторном стенде, оснащённом вибродиагностическим комплексом в составе акселерометра, предусилителя, усилителя, аналогово-цифрового преобразователя и компьютера с соответствующим программным обеспечением. Режим ФВ: частота вращения диска 750 мин<sup>-1</sup>, сила прижима образца к диску 30 Н, длительность ФВ 15 с. Спектр вибросигнала фиксировали во временном диапазоне ФВ 0–15 с; СКЗ рассчитывали в трех частотных диапазонах: 2–4, 5–8 и 10–16 кГц для этого же диапазона времени. Более подробно этот раздел методики приведен в публикации [1].

Состояние ПС образцов изменяли импульсной лазерной обработкой на установке U-15 RMI Laser в водной среде. Изменение пара-

метров режима обработки (шаг перемещения пятна луча по двум координатам  $s_x = s_y = s$ , мощность импульса  $P$ , число импульсов в пачке  $n_n$ , число проходов  $N$ , частота импульсов  $f$ ) позволило трансформировать состояние ПС керамики в широком диапазоне. В качестве примера на рис. 1 показаны наиболее характерные состояния ПС образцов после обработки и основные элементы морфологического рисунка поверхности. Структура ПС керамики после обработки при менее интенсивных режимах сочетает элементы шлифованной и оплавленной поверхностей (см. рис. 1, а). На образцах имеются как участки шлифованной поверхности 1 с присущими выступами, впадинами, рисками, областями локального разрушения и трещинами, так и фрагменты аморфного слоя 2 с порами 3, кратерами 4 и впадинами 5 с развитой морфологией дна. После обработки образцов при режимах средней интенсивности формируется ПС с развитым бугристым рельефом (см. рис. 1, б), морфологический рисунок которого определяют выступы неправильной формы 6 с округлыми вершинами, впадины 7 со сглаженным дном и мелкие поры 8. Главной особенностью третьего морфологического рисунка является равномерно распределенная аморфная пленка 9, разделенная на фрагменты сеткой трещин 10, на поверхности которых присутствуют каплеобразные наплывы 11 и кратеры 12 (см. рис. 1, в).

Ширину  $h$  участка износа на образцах после 15-с ФВ с вращающимся стальным диском измеряли под микроскопом Olympus VX51M. В качестве примера на рис. 2 показан участок износа на образце с указанием его ширины  $h$ , поверхности после обработки 1, начальной 2 и конечной 3 границы участка износа, поверхности керамики после разрушения ПС 4 и наливов стали 5. Состояние ПС керамики после модификации и ФВ с диском изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3LMH (Tescan) на образцах, покрытых токопроводящей пленкой углерода в установке Quorum Q150R ES.



**Рис. 1.** Состояние ПС образцов после обработки при режимах: а —  $s = 50$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $n_n = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц; б —  $s = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $n_n = 20$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц; в —  $s = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $n_n = 20$ ,  $N = 1$ ,  $f = 50$  кГц

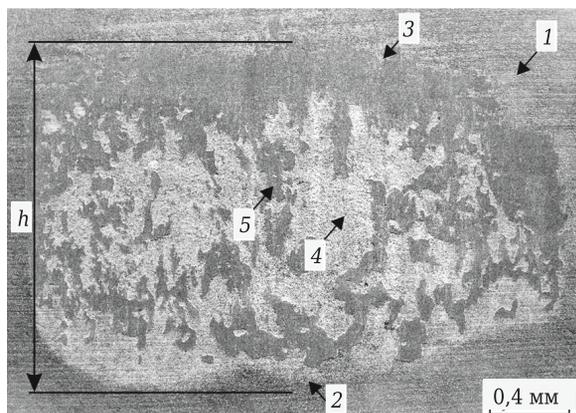


Рис. 2. Пример измерения ширины участка износа  $h$

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Влияние всех параметров режима обработки на СКЗ в трех частотных диапазонах и  $h$  показано на рис. 3–7. Характер этих зависимостей свидетельствует о практически полной идентичности влияния параметров режима обработки на СКЗ и  $h$ , а также зависимости вида кривых от состояния ПС керамики после обработки. Последовательно проанализируем эти зависимости.

Влияние шага перемещения пятна луча  $s$  ( $P = 12$  Вт,  $n_n = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ в трех частотных диапазонах и  $h$  имеет одинаковый характер (см. рис. 3). При повышении  $s$  от 10 до 30 мкм (первый участок кривой, см. рис. 3, а) СКЗ увеличивается от 130 до 135, от 48 до 60 и от 30 до 50 мВ в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц соответственно; дальнейшее повышение  $s$  до 50 мкм (второй участок кривой) приводит к уменьшению СКЗ до 82, 27 и 11 мВ в этих же частотных диапазонах. Последующее повышение  $s$  до 60 мкм (третий участок кривой) приводит к увеличению СКЗ до 120, 58 и 50 мВ в этих же частотных диапазонах. Аналогично изменяется  $h$  при повышении  $s$  (см. рис. 3, б): на первом участке  $h$  увеличивается от 1,68 до 1,72 мкм, на втором уменьшается до 1,54 мкм, на третьем увеличивается до 1,62 мкм.

Исследование модифицированного ПС керамики пояснило столь сложный характер кривых. После обработки при наиболее интенсивном режиме ( $s = 10$  мкм) на поверхности керамики формируется достаточно равномерный аморфный слой с напылами размерами до 5 мкм, единичными кратерами округлой формы размерами до 4 мкм и большим числом мелких пор. С повышением  $s$  до 30 мкм увеличивается число мелких пор и появляются тонкие трещины, соединяющие близлежащие кратеры. При обработке при  $s = 50$  мкм на поверхности керамики появляются участки шлифованной поверхности (занимающие до 20 % общей площади), окруженные аморфным слоем с мелкими порами и единичными кратерами размерами до 3 мкм. При повышении  $s$  до 60 мкм увеличивается площадь, занимаемая участками с шлифованной поверхностью (до 35 % общей площади), причем на границе шлифованная поверхность – аморфный слой образуются многочисленные области локального разрушения керамики размерами до 8 мкм, на дне которых видны оплавленные зерна исходной структуры керамики.

Сопоставление зависимостей  $s$  – СКЗ в трех диапазонах и  $s$  –  $h$  с состоянием ПС керамики позволяет отметить связь в выделенной цепочке: состояние ПС керамики – разрушение ПС – образование площадки износа – изменение СКЗ. Наименьшая дефектность аморфного слоя и практическое отсутствие поверхностных трещин объясняют формирование благоприятного состояния ПС по критерию наименьшей интенсивности его разрушения и, соответственно, по наибольшей износостойкости образцов. При образовании участка износа на керамике с менее дефектным ПС фиксируется ВА сигнал с наименьшими СКЗ, а при увеличении дефектности ПС керамики и повышении интенсивности износа образцов СКЗ увеличивается во всех частотных диапазонах.

Влияние мощности импульсов  $P$  ( $s = 10$  мкм,  $n_n = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ в трех частотных диапазонах и  $h$  показано на рис. 4. Видно, что с повышением  $P$  от 5 до 15 Вт СКЗ увеличивается от 78 до 90, от 47 до 65 и от 26 до 31 мВ в частотных диа-

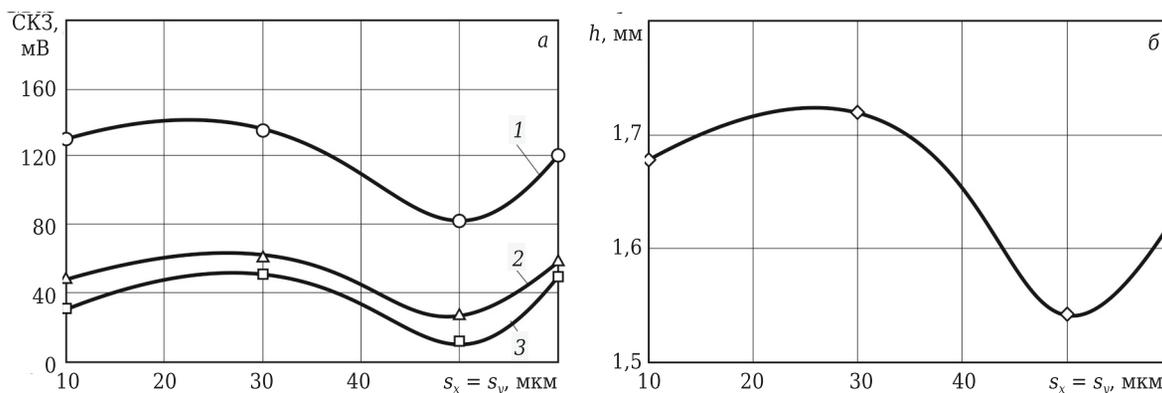
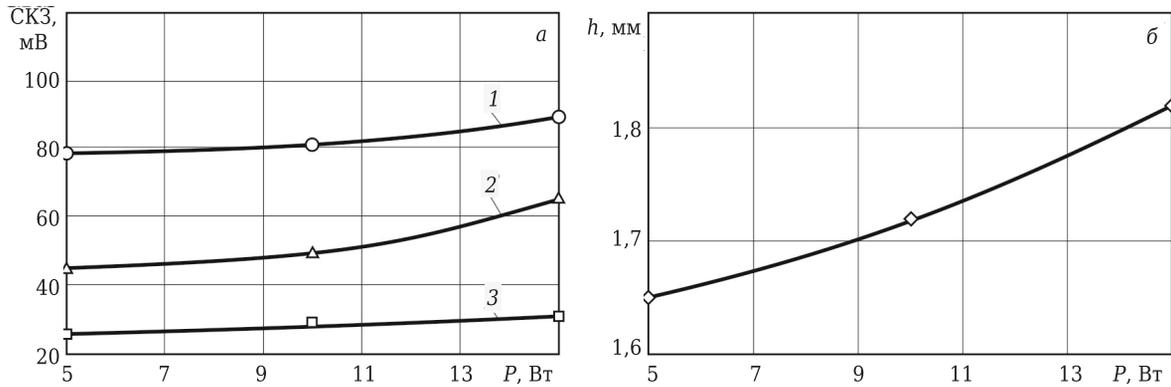


Рис. 3. Влияние шага перемещения лазерного луча  $s$  ( $P = 12$  Вт,  $n_n = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ (а) в частотных диапазонах 2–4 кГц (1), 5–8 кГц (2), 10–16 кГц (3) и  $h$  (б)



**Рис. 4.** Влияние мощности импульсов  $P$  ( $s = 10$  мкм,  $n_{и} = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ (а) в частотных диапазонах 2–4 кГц (1), 5–8 кГц (2), 10–16 кГц (3) и  $h$  (б)

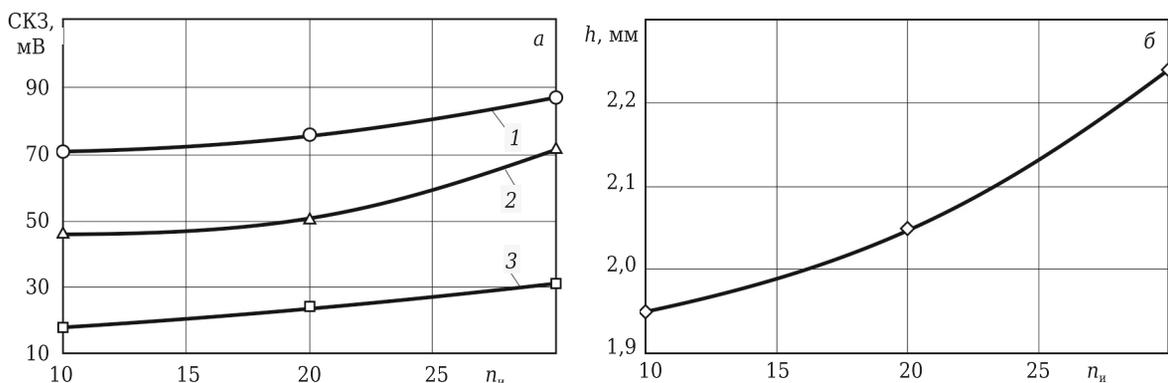
пазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц соответственно (см. рис. 4, а). Повышение  $P$  в диапазоне 5–15 Вт приводит к увеличению  $h$  от 1,65 до 1,82 мкм (см. рис. 4, б).

Общее состояние ПС керамики после обработки при  $P$  от 5 до 15 Вт определяется развитостью аморфного слоя за счет присутствия выпуклостей, кратеров диаметром до 5 мкм и локальных областей с развитой морфологией дна, между которыми имеются многочисленные мелкие трещины. При обработке образцов при менее интенсивном режиме ( $P = 5$  Вт) поверхность аморфного слоя наиболее сглажена, а диаметр кратеров не превышает 3 мкм. При повышении  $P$  до 10 Вт на поверхности аморфного слоя образуются выпуклости диаметром до 5 мкм, увеличиваются число кратеров и их диаметр до 5 мкм; между кратерами образуются трещины. При повышении  $P$  до 15 Вт в ПС керамики увеличиваются диаметр выпуклостей до 8 мкм и число кратеров, а также образуются локальные области с развитой морфологией дна, между которыми имеются мелкие трещины. Как и в предыдущем случае, при повышении степени дефектности ПС керамики увеличивается СКЗ во всех частотных диапазонах и  $h$ .

Влияние числа импульсов в пачке  $n_{и}$  ( $s_x = s_y = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ и  $h$  показано на рис. 5. Видно, что при повышении  $n_{и}$

от 10 до 30 импульсов СКЗ увеличивается от 71 до 87, от 46 до 71 и от 18 до 31 мВ в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц соответственно (см. рис. 5, а). С повышением  $n_{и}$  от 10 до 30 также увеличивается  $h$  от 1,95 до 2,24 мкм (см. рис. 5, б).

Результаты исследования состояния ПС керамики показали, что при увеличении  $n_{и}$  от 10 до 30 импульсов повышается развитость морфологии ПС керамики за счет увеличения выступов, являющихся результатом оплавления единичных крупных зерен и конгломератов зерен, которые создают развитый бугристый рельеф. Дополняют этот рельеф впадины со сглаженным дном (кратеры и трещины на поверхности присутствуют в минимальных количествах). При  $n_{и} = 10$  импульсов размеры плотно расположенных выступов и впадин не превышают 4 мкм. С увеличением  $n_{и}$  до 20 импульсов ПС керамики приобретает более развитый рельеф за счет увеличения размеров выступов и впадин до 6 мкм, а также числа оплавленных единичных крупных зерен. При дальнейшем повышении  $n_{и}$  до 30 импульсов размеры выступов и впадин увеличиваются до 8 мкм с одновременным уменьшением их числа, а также числа оплавленных крупных зерен. Этот результат подтверждает присутствие однозначной взаимосвязи в выделенной цепочке: состояние ПС керамики — разрушение



**Рис. 5.** Влияние числа импульсов в пачке  $n_{и}$  ( $s_x = s_y = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ (а) в частотных диапазонах 2–4 кГц (1), 5–8 кГц (2), 10–16 кГц (3) и  $h$  (б)

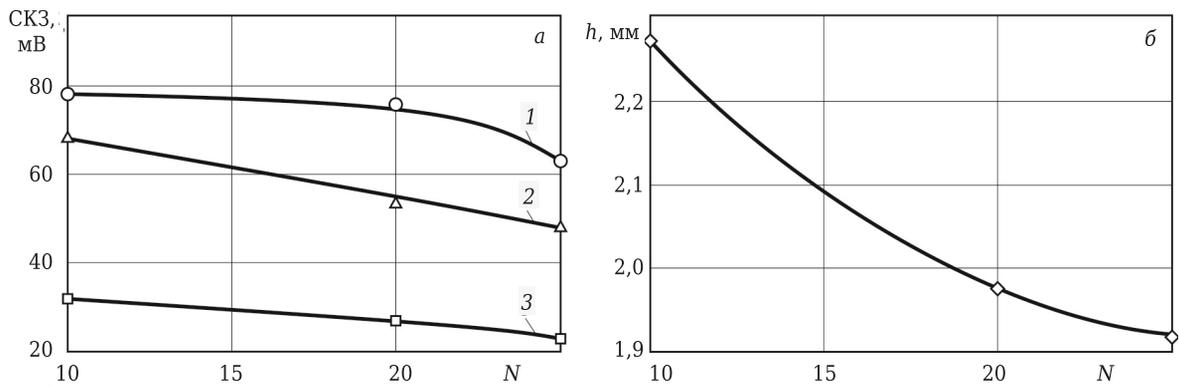


Рис. 6. Влияние числа проходов  $N$  ( $s = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $n_n = 1$ ,  $N = 1$ ,  $f = 30$  кГц) на СКЗ (а) в частотных диапазонах 2–4 кГц (1), 5–8 кГц (2), 10–16 кГц (3) и  $h$  (б)

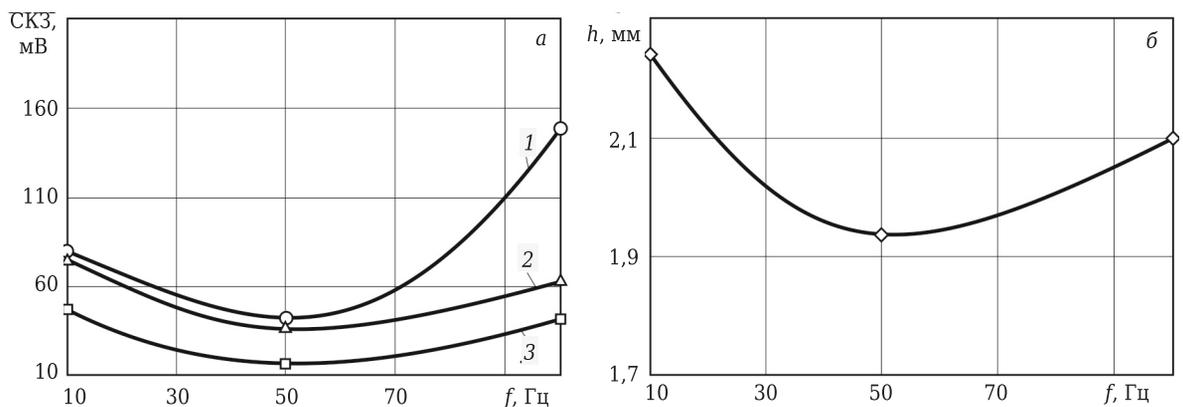


Рис. 7. Влияние частоты следования импульсов  $f$  ( $P = 12$  Вт,  $s = 10$  мкм,  $N = 1$ ,  $n_n = 20$ ) на СКЗ (а) в частотных диапазонах 2–4 кГц (1), 5–8 кГц (2), 10–16 кГц (3) и  $h$  (б)

ПС — образование площадки износа — изменение СКЗ.

Установлено, что с увеличением числа проходов  $N$  ( $s = 10$  мкм,  $P = 12$  Вт,  $n_n = 1$ ,  $f = 30$  кГц) СКЗ и  $h$  монотонно уменьшаются (см. рис. 6). При увеличении  $N$  от 10 до 25 проходов СКЗ уменьшается от 78 до 63, от 68 до 48 и от 32 до 23 мВ в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц соответственно (см. рис. 6, а), а  $h$  уменьшается от 2,27 до 1,92 мкм (см. рис. 6, б). Эти результаты в полной мере коррелируют с состоянием ПС керамики. В частности, при  $N = 10$  проходов состояние ПС характеризуется наибольшими размерами очагов разрушения, выступов, мелких пор и мелких трещин, а увеличение  $N$  до 25 проходов приводит к уменьшению числа и размеров этих элементов морфологического рисунка поверхности и, соответственно, степени дефектности ПС керамики,  $h$  и СКЗ в трех частотных диапазонах.

Влияние частоты следования импульсов  $f$  ( $P = 12$  Вт,  $s = 10$  мкм,  $N = 1$ ,  $n_n = 20$ ) на СКЗ и  $h$  показано на рис. 7. Установлено, что с увеличением  $f$  от 10 до 50 кГц СКЗ уменьшается от 80 до 42, от 75 до 36 и от 47 до 16 мВ в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц соответственно (см. рис. 7, а). Повышение  $f$  до 100 кГц приводит к увеличению СКЗ до 149, 62 и 41 мВ в этих же частотных диапазонах. При увеличении  $f$  от 10 до

50 кГц  $h$  уменьшается от 2,25 до 1,93 мкм, а при дальнейшем увеличении  $f$  до 100 кГц  $h$  достигает 2,1 мкм (см. рис. 7, б). Такой характер зависимостей объясняется изменением состояния ПС керамики после обработки.

Особенностью состояния ПС керамики, обработанной с  $f$  от 10 до 100 Гц, является присутствие равномерного аморфного слоя с каплеобразными наплывами размерами до 3 мкм, сплошность которого нарушает сетка крупных трещин. Установлено, что при обработке с  $f = 50$  Гц фрагменты аморфного слоя достигают наибольшего размера (12 мкм) за счет минимизации числа и размеров трещин, а при уменьшении  $f$  до 50 Гц происходит снижение среднего размера фрагментов аморфного слоя до 7 мкм за счет увеличения числа и размера крупных трещин. При обработке с  $f$  до 100 Гц средний размер отдельных фрагментов аморфного слоя не превышает 10 мкм, однако на границах фрагментов образуются многочисленные мелкие кратеры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием выводов ранее проведенных исследований разработана методика, обеспечившая анализ цепочки взаимосвязей: состояние ПС керамики — разрушение ПС — образо-

вание участка «чистого» износа — изменение СКЗ при отсутствии влияния внутреннего (подповерхностного) объема керамики на элементы этой цепочки. Выявлена полная корреляция ширины участка износа на образцах из оксидно-карбидной керамики ВОК-71 с изменением СКЗ в частотных диапазонах 2–4, 5–8 и 10–16 кГц при ФВ с вращающимся стальным диском из стали 45 (50–52 HRC). Полученные результаты

рекомендованы для разработки методики вибродиагностирования состояния керамических режущих инструментов и деталей трибоузлов.

\*\*\*

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

#### Библиографический список

1. **Балицкий, Ф. Я.** Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. — М.: Наука, 1984. — 120 с.
2. **Zhao, Pengjing.** Correlation between acoustic emission detection and microstructural characterization for damage evolution / Pengjing Zhao, Yandong Sun, Jingpin Jiao, Gang Fang // Engineering Fracture Mechanics. — 2020. — Vol. 230. — 106967.
3. **Ma, Jiaojiao.** Analytical and experimental investigation of vibration characteristics induced by tribofilm-asperity interactions in hydrodynamic journal bearings / Jiaojiao Ma, Hao Zhang, Shan Lou, Fulei Chu, Zhanqun Shi, Fengshou Gu, Andrew D. Ball // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2021. — Vol. 150. — 107227.
4. **Kotijani, M.** Simulation of fracture propagation induced acoustic emission in porous media / M. Kotijani, R. Gracie, Y. Yuan // Engineering Fracture Mechanics. — 2020. — Vol. 229. — 106950.
5. **Генкин, М. Д.** Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
6. **Lacerraab, G.** Acoustic energy transfer by friction induced vibrations / G. Lacerraab, F. Massia, E. Chateletb, E. Moulinc // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 199. — P. 1356–1361.
7. **Ito, Kaita.** Detection and location of microdefects during selective laser melting by wireless acoustic emission measurement / Kaita Ito, Masahiro Kusano, Masahiko Demura, Makoto Watanabe // Additive Manufacturing. — 2021. — Vol. 40. — 101915.
8. **Xing, Pengfei.** Experimental investigation on identifying friction state in lubricated tribosystem based on friction-induced vibration signals / Pengfei Xing, Guobin Li, Hongtao Gao, Guoyou Wang // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2020. — Vol. 138. — 106590.
9. **Эльперин, А. И.** Диагностирование реодинамики систем трения / А. И. Эльперин, А. К. Явленский, Г. И. Талашов. — СПб.: Наука, 1998. — 142 с.
10. **Pan, Wujiu.** Analysis of complex modal instability of a minimal friction self-excited vibration system from multiscale fractal surface topography / Wujiu Pan, Liangyu Ling, Haoyong Qu, Minghai Wang // European Journal of Mechanics - A/Solids. — 2021. — Vol. 87. — 104226.
11. **Костюков, В. Н.** Мониторинг состояния оборудования в реальном времени / В. Н. Костюков, Ал. В. Костюков // Контроль. Диагностика. — 2010. — № 3. — С. 43–50.
12. **Shi, Yawen Xue Xiaoliang.** Effects of groove-textured surface combined with Sn-Ag-Cu lubricant on friction-induced vibration and noise of GCr15 bearing steel / Yawen Xue Xiaoliang Shi, Hongyan Zhou, Guanchen Lu, Jin Zhang // Tribology International. — 2020. — Vol. 148. — 106316.
13. **Liu, Changxia.** Microstructure and wear performance of alumina/graphene coating on textured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC substrate composites / Changxia Liu, Junlong Sun, Federico Venturi, Acacio Rincon Romero, Tanvir Hussain // J. Eur. Ceram. Soc. — 2021. — Vol. 41, № 2. — P. 1438–1451.
14. **Bagde, Pranay.** Friction and abrasive wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13TiO<sub>2</sub> + Ni Graphite coatings / Pranay Bagde, S. G. Sapate, R. K. Khatirkar, Nitesh Vashishtha // Tribology International. — 2018. — Vol. 121, № 12. — P. 353–372.
15. **Кузин, В. В.** Чувствительность виброакустического сигнала к изменению состояния поверхностного слоя керамики при трении / В. В. Кузин, М. П. Козочкин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2021. — № 5. — С. 141–146.
16. **Григорьев, С. Н.** Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, Ф. С. Сабуров, В. А. Синопальников // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 8. — С. 48–54.
17. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 1 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 1. — P. 94–99.  
**Кузин, В. В.** Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 2. — С. 39–45.
18. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 2 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 2. — P. 178–182.  
**Кузин, В. В.** Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 2 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 3. — С. 50–55.
19. **Li, Xuewu.** Tribological behaviors of vacuum hot-pressed ceramic composites with enhanced cyclic oxidation and corrosion resistance / Xuewu Li, Jingsong Liang, Tian Shi, Danni Yang, Xinchun Chen, Chuanwei Zhang, Zhaohui Liu, Dianzi Liu, Qiaoxin Zhang // Ceram. Int. — 2020. — Vol. 46, № 9. — P. 4671–4688.
20. **Yin, Zengbin.** Friction and wear behaviors of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials / Zengbin Yin, Juntang Yuan, Chuanzhen Huang, Zhenhua Wang, Lei Huang, Yu Cheng // Ceram. Int. — 2016. — Vol. 42, № 1. — Part B. — P. 1982–1989. ■

Получено 02.09.21

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, С. Ю. Федоров, М. А. Волосова, 2021 г.