

Д. т. н. **В. В. Кузин**¹ (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**¹, к. т. н. **В. Н. Аникин**²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

УДК 666.3:519.718

ВВЕДЕНИЕ В МИКРОМЕХАНИКУ КЕРАМИКИ. СИСТЕМА ЭКСПЛУАТАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Предложена система эксплуатации керамических изделий, для которой сформулированы цель, условия и границы функционирования, главная и вспомогательные функции, а также взаимосвязи с системой более высокого уровня и окружающей средой. Показано, что детальное изучение связей в этой системе с использованием междисциплинарной методологии «микромеханика керамики» способно обеспечить решение проблемы надежности керамических изделий. Определены отправные точки для формирования цели и задач микромеханики керамики.

Ключевые слова: керамические изделия (КИ), надежность, эксплуатация, микромеханика керамики.

ВВЕДЕНИЕ

Керамика является одним из древнейших материалов, обеспечивающих жизнедеятельность человечества, благодаря доступности сырья и простой технологии изготовления изделий с уникальными эксплуатационными характеристиками. Многовековое совершенствование керамики способствовало значительному расширению области ее применения [1]. В настоящее время керамические материалы эффективно используются в машиностроении, приборостроении, авиационной и космической промышленности, транспорте, медицине, энергетике, полупроводниковой индустрии и охране окружающей среды [2–5]. Керамические изделия (КИ) могут быть базовыми центрами прорывных технологий в этих отраслях при условии значительного повышения уровня надежности [6, 7]. В этой связи создание и изготовление надежных КИ, а также формирование новых компетенций у специалистов по эффективной эксплуатации КИ является актуальной научно-технической задачей.

Традиционно решение этой сложной задачи достигается за счет проведения дорогостоящих и длительных экспериментов по совершенствованию материалов путем создания композиций сложного состава, нанесения функциональных покрытий и оптимизации режимов изготовле-

ния [8–12]. Между тем компьютерное моделирование, основанное на математическом описании разных этапов жизненного цикла КИ, позволяет расширить базу экспериментальных данных и сократить материально-временные затраты на формирование обобщенных закономерностей [13]. Новые знания, которые невозможно получить экспериментальным путем, могут стать целевыми ориентирами при создании новых керамических материалов и изделий из них [14–18].

Преимущества математического моделирования были реализованы в новой междисциплинарной методологии, которую авторы называли «микромеханикой керамики». Сущность этой методологии заключается в представлении керамики в виде конструкции, построенной из элементов ее структуры, определении напряженно-деформированного состояния ее структурных элементов под действием внешних нагрузок, а также использовании результатов численных экспериментов для целевого поиска эффективных методов повышения надежности КИ. Авторы надеются, что микромеханика керамики поможет специалистам взглянуть на проблему проектирования, изготовления и эксплуатации надежных КИ с системных позиций, а также эффективно использовать на практике ее инженерные приложения. Отдельные разделы микромеханики керамики, прошедшие научную и практическую апробацию, включены в специальные дисциплины и читаются в профильных университетах РФ.

Материал серии статей раскрывает предположения создания, физические и математические модели, расчетные схемы, методы решения по-



В. В. Кузин

E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

ставленных задач, а также инженерные приложения микромеханики керамики. В настоящей статье обсуждается созданная система эксплуатации КИ, анализ которой позволил установить отправные точки для формирования цели и задач микромеханики керамики.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

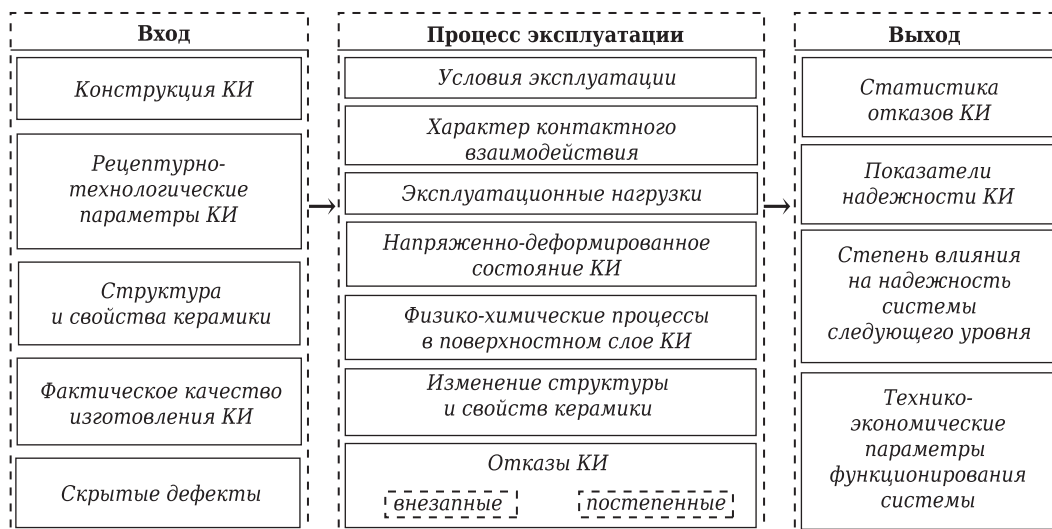
Успешное решение многогранной задачи, ориентированной на повышение надежности КИ, предполагает использование системного подхода, реализованного на базе результатов многолетних исследований эксплуатационных характеристик КИ в лабораторных и производственных условиях. Ее функциональная схема в виде взаимосвязанных подсистем и блоков показана на рисунке. Для этой системы по ГОСТ Р 51901.12–2007 определены цель, условия и границы функционирования, главная и вспомогательные функции, а также взаимосвязи с системой более высокого уровня и окружающей средой.

Конструкторско-технологическая подсистема на входе состоит из пяти блоков и одноназначно характеризует состояние КИ в момент передачи его в эксплуатацию. Конструкция КИ определяется комплектом документов, содержащим рабочие (сборочные) чертежи КИ с указанием предельных отклонений размеров, формы и расположения поверхностей; требований к качеству поверхностей; расположения КИ в конструкции; зазоры между контактирующими деталями; технические условия (ТУ) для разработки технологии изготовления и контроля. Среди геометрических параметров целесообразно выделять элементы (отверстия, галтели, уступы, канавки и проточки), создающие концентраторы напряжений в КИ при эксплуатации, способные привести к их разрушению.

Рецептурно-технологические параметры КИ определяют состав и технологию изготовления КИ, включая окончательную механическую обработку, и обеспечивают их изготовление в соответствии с ТУ. Структуру и свойства керамики, которые особо влияют на эксплуатационные характеристики КИ, выявляют с использованием образцов-свидетелей, спекаемых одновременно с КИ. На этих образцах определяют пористость, размер структурных элементов керамики, химический состав, плотность, твердость, прочность, трещиностойкость, модуль упругости, а также теплопроводность, теплоемкость, ТКЛР и коэффициент Пуассона [19, 20].

Результаты выходного контроля качества изготовленных КИ, условия и методы испытаний представлены в четвертом блоке. Здесь отражены данные о точности изготовления КИ и качестве рабочих поверхностей. Блок *Скрытые дефекты* содержит выявленные дефекты (например, сколы на кромках) при выходном контроле, допускаемые ТУ, а также характеристики поверхностного слоя (например, трещины, локальные области разрушения, остаточные напряжения). Контроль этих показателей, как правило, не предусматривается ТУ, поэтому эти показатели качества изготовления КИ могут быть определены только в результате специальных исследований.

Центральная подсистема **Процесс эксплуатации** КИ сформирована из семи взаимосвязанных блоков. Условия эксплуатации КИ, в том числе режимы и особые экстремальные ситуации при работе, определяют характер контактного взаимодействия КИ с контрдеталью и формируют определенные условия нагружения КИ (силы и тепловые нагрузки) [21, 22]. Под действием сил, тепловых потоков и теплоотвода с поверхностей КИ в окружающую среду происходит нагрев и деформация КИ, в нем форми-



Функциональная схема системы эксплуатации КИ

ругуются напряжения на микро- и макроуровне [23]. Под действием этих микро- и макронапряжений, а также физико-химических процессов в зоне контактного взаимодействия КИ с контрдеталью при высоких температурах зарождаются субмикро- и микродефекты в структуре поверхностного слоя керамики [24].

Накопление и объединение этих структурных дефектов, приводящее к образованию зародышевых трещин, означает необратимое изменение структуры керамики и начало ее скрытого разрушения. Более того, дефекты структуры, являющиеся концентраторами микронапряжений, изменяют свойства керамики в поверхностном слое и уменьшают ее прочность [25–27]. Усиливают этот процесс химические реакции при высокотемпературной эксплуатации, приводящие к образованию на поверхностях КИ пленок сложного состава. Эти пленки оказывают двойственное влияние на эксплуатационные характеристики КИ [22]: с одной стороны, они предохраняют рабочую поверхность от повреждений и могут улучшать условия трения, а с другой — периодическое разрушение этих пленок активизирует адгезионный износ рабочих поверхностей.

При критическом увеличении значений микро- и макронапряжений в поврежденной структуре керамики происходят отказы (выходы из работоспособного состояния) КИ. Возможны как внезапные, так и постепенные отказы КИ, имеющие одинаковую физическую природу, но при этом различающиеся причинами и последовательностью действующих эффектов на различных уровнях структуры керамики. Важно отметить, что именно высокая вероятность внезапных отказов создает негативные впечатления о недостаточной надежности КИ.

На выходе системы расположены четыре блока, три из которых идентифицируют состояние системы эксплуатации КИ на основе анализа случаев и причин отказов КИ, а один блок — степень влияния на систему более высокого уровня. В первом блоке *Статистика отказов КИ*, который является базой для определения показателей надежности КИ, скапливаются и анализируются данные обо всех случаях отказов, имеющих важнейшее значение в теории надежности. Во втором блоке формируются показатели надежности КИ (ГОСТ 27.002–89), среди которых выделены ресурс, вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа и интенсивность отказов. Третий блок характеризует степень влияния состояния системы эксплуатации КИ на надежность системы более высокого уровня. Допускаются как локальные, так и катастрофические последствия. Содержание четвертого блока позволяет оценить технико-экономическую эффективность рассматриваемой системы с

использованием разных показателей. Анализ научно-технической литературы показал, что в этой системе наиболее изученными являются две связи: рецептурно-технологические параметры КИ – структура и свойства керамики и структура и свойства керамики – отказы КИ, причем вторая связь в наибольшей степени исследована для режущих и деформирующих инструментов. Сведения об остальных связях в научной литературе изложены в недостаточном объеме или отсутствуют. На заполнение пробелов в знаниях об этих связях направлена микромеханика керамики. Главной отправной точкой для ее создания является научное положение, в соответствии с которым делать вывод о недостаточной надежности КИ «вообще» некорректно; необходимо установить некий ориентир, относительно которого определяется надежность КИ. В качестве этого ориентира предложено использовать обоснованную норму надежности КИ в определенных условиях эксплуатации, которая является базой для определения достаточной или недостаточной фактической надежности КИ. Создать методику расчета обоснованной нормы надежности КИ планируется с использованием микромеханики керамики. Другой отправной точкой является то, что структура и свойства керамики влияют на состояние системы эксплуатации КИ во взаимосвязи с конструкцией изделия, рецептурно-технологическими параметрами, фактическим качеством его изготовления и скрытыми дефектами в структуре керамики. Недооценка или переоценка роли любого из этих блоков приводит к искажению результатов функционирования системы. Например, акцент на приоритетной роли структуры и свойств керамики в определении отдельных показателей надежности КИ (как это часто делается в настоящее время) часто приводит к ошибочным выводам.

Для анализа комплексного влияния пяти входных блоков на физику отказов КИ при эксплуатации эффективно использовать моделирование напряженно-деформированного состояния КИ под действием внешних нагрузок. Этот подход позволяет анализировать влияние разных факторов на микро- и макронапряжения, неоднородность и концентрацию напряжений в разных структурных элементах керамики, связывая эти результаты с вероятностью зарождения структурных микродефектов.

Третьей отправной точкой в создании микромеханики керамики является необходимость детального изучения физики отказов и объяснения результатов экспериментальных исследований. Здесь особую актуальность имеет выявление роли температуры и напряжений в отказах КИ, что невозможно сделать экспериментальными методами [28]. Выявление осо-

бенностей разрушения при низких ($T < 0,5 T_{пл}$) и высоких ($T \geq 0,5 T_{пл}$) температурах возможно путем математического моделирования теплового и напряженного состояния керамики как гетерогенного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе результатов многолетних исследований эксплуатационных характеристик КИ в лабораторных и производственных условиях предложена система эксплуатации КИ, состоящая из трех подсистем, каждая из которых включает взаимосвязанные блоки. Для этой системы определены цель, условия и границы функционирования, главная и вспомогательные функции, а также взаимосвязи с системой более высокого уровня и окружающей средой.

Библиографический список

1. Балкевич, В. Л. Керамика нового поколения / В. Л. Балкевич // Стекло и керамика. — 1988. — № 6. — С. 17–20.
2. Дроздов, Ю. Н. Техническая керамика в высоконагруженных узлах трения / Ю. Н. Дроздов, Т. М. Савинова // Вестник машиностроения. — 2005. — № 11. — С. 28–32.
3. Кузин, В. В. Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
- Kuzin, V. V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
4. Гаршин, А. П. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев [и др.]. — М.: Научтехлитиздат, 2003. — 384 с.
5. Гнесин, Г. Г. Керамические инструментальные материалы / Г. Г. Гнесин, И. И. Осипова, Г. Д. Ронталь [и др.]. — Киев: Техника, 1991. — 392 с.
6. Кулик, О. П. Состояние разработок в области новых керамических материалов (Обзор зарубежной литературы) / О. П. Кулик // Порошковая металлургия. — 1999. — № 1/2. — С. 102–113.
7. Старков, В. К. Повышение эксплуатационных характеристик изделий из керамических материалов методами механической и термической обработки / В. К. Старков, В. В. Кузин, В. Ф. Попов [и др.] // Машиностроительные производства. Сер. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: обзорная информ. Вып. 4. — М.: ВНИИТЭМР, 1989. — 62 с.
8. Орданьян, С. С. Физико-химический базис создания композиционных керамических материалов на основе тугоплавких соединений / С. С. Орданьян // Огнеупоры. — 1992. — № 9/10. — С. 10–14.
9. Мосин, Ю. М. Некоторые проблемы развития технологии и материаловедения керамики и огнеупоров / Ю. М. Мосин // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 4. — С. 8–12.
10. Борисенко, В. А. Прочность и твердость тугоплавких материалов при высоких температурах / В. А. Борисенко. — Киев: Наукова думка, 1984. — 211 с.

Выполненный анализ научно-технической литературы выявил недостаточную изученность связей в системе эксплуатации КИ, что не позволяет решить проблему их надежности. Обоснована целесообразность детального исследования этой системы с использованием микромеханики керамики и определены оптимальные точки для формирования цели и задач микромеханики керамики.

(Продолжение следует)

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6.

11. Гогоци, Г. А. Влияние состава на механические свойства материала на основе нитрида кремния / Г. А. Гогоци, Я. Л. Грушевский // Порошковая металлургия. — 1986. — № 2. — С. 93–96.
12. Бакунов, В. С. Прочность и структура керамики / В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 3. — С. 11–15.
13. Черепанов, Г. П. Оптимальное проектирование некоторых инженерных материалов / Г. П. Черепанов, В. В. Смольский, А. Г. Таги-заде // Изв. АН АССР. — 1976. — Т. 29. — 138 с.
14. Григорьев, С. Н. Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.
- Grigor'ev, S. N. Influence of loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. N. Morgan [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.
15. Григорьев, С. Н. Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.
- Grigor'ev, S. N. Influence of ceramic properties on the stress-strain state of a plate in steady heat conduction / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 4. — P. 374–379.
16. Григорьев, С. Н. Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.
- Grigor'ev, S. N. Influence of thermal loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477.
17. Григорьев, С. Н. Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с

покрытием / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.

Grigor'ev, S. N. Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

18. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

Kuzin, V. V. Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2: Microlevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.

19. **Гогоци, Г. А.** Аттестация керамики по механическим свойствам. Методические аспекты / Г. А. Гогоци, Я. Л. Грушевский, В. П. Завада // Огнеупоры. — 1988. — № 8. — С. 23–27.

20. **Бакунов, В. С.** К вопросу об анализе структуры керамики / В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Изв. РАН. Неорганические материалы. — 1996. — № 2. — С. 243–248.

21. **Зернин, М. В.** Механика разрушения тел при контактом взаимодействии / М. В. Зернин, Е. М. Морозов // Механика контактных взаимодействий. — М. : Физматлит, 2001. — С. 624–639.

22. **Крагельский, И. В.** Трение и износ ; изд. 2-е, перераб. и доп. / И. В. Крагельский. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.

23. **Воробей, В. В.** Расчет термонапряженных конструкций из композиционных материалов / В. В. Во-

робей, Е. В. Морозов, О. В. Татарников. — М. : Машиностроение, 1992. — 240 с.

24. **Кузин, В. В.** Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин / В. В. Кузин, В. Н. Аникин, С. Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2010. — № 11. — С. 50–56.

Kuzin, V. V. Wear and failure of ceramic cutting plates / V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 11. — P. 1116–1123.

25. **Астафьев, В. И.** Влияние поврежденности материала на напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины / В. И. Астафьев, Т. В. Григорова, В. А. Пастухов // ФХММ. — 1992. — Т. 28, № 1. — С. 5–11.

26. **Литовский, Е. Я.** Изменение структуры и теплофизических свойств кварцевой керамики в процессе быстрого нагрева / Е. Я. Литовский, Ф. С. Катан, С. Л. Бондаренко // Огнеупоры. — 1986. — № 11. — С. 42–46.

27. **Красулин, Ю. Л.** Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений / Ю. Л. Красулин, С. М. Баринов, В. С. Иванов. — М. : Наука, 1985. — 149 с.

28. **Григорьев, О. Н.** Влияние температуры на разрушение хрупких материалов при сосредоточенном нагружении / О. Н. Григорьев, В. И. Трефилов, А. М. Шатохин // Порошковая металлургия. — 1983. — № 12. — С. 75–81. ■

Получено 07.02.19

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
В. Н. Аникин, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

REFRA 2019 — 20-я КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СОВРЕМЕННЫМ ОГНЕУПОРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

24–26 апреля 2019 г.

г. Прага, Чешская Республика

Темы:

- Энергетические аспекты высокотемпературной обработки
- Огнеупорные и теплоизоляционные материалы для высокотемпературных процессов
- Коррозия огнеупорных материалов
- Структура огнеупорных материалов и их модификация наноматериалами
- Новые свойства огнеупорных материалов

www.silicaty.cz