

Peretokina, N. A. Development and study of the compositions of unshaped fireclay-based heat-insulating refractories and a technology for making them / *N. A. Peretokina, V. A. Doroganov* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2011. — Vol. 52, № 1. — P. 52–54.

4. **Перетокина, Н. А.** Пенолегковесные изделия на основе диатомита / *Н. А. Перетокина, В. А. Дороганов* // *Новые огнеупоры*. — 2011. — № 5. — С. 30–33.

Peretokina, N. A. Lightweight foam products based on diatomite / *N. A. Peretokina, V. A. Doroganov* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2011. — Vol. 52, № 3. — P. 191–194.

5. **Евтушенко, Е. И.** Теплоизоляционные материалы на основе искусственных керамических вяжущих различного состава / *Е. И. Евтушенко, Н. А. Перетокина, В. А. Дороганов* [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. — 2013. — № 6. — С. 149–151.

6. **Дороганов, В. А.** Особенности модифицирования огнеупорных бетонов нанокремнеземом / *В. А.*

Дороганов // *Новые огнеупоры*. — 2011. — № 11. — С. 45–49.

Doroganov, V. A. Aspects of the modification of refractory concrete with nanosilica / *V. A. Doroganov* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2011. — Vol. 52, № 6. — P. 409–413.

7. **Онищук, В. И.** Механизм формирования микро-структуры и твердения стекловидного искусственно-го вяжущего вещества / *В. И. Онищук, М. В. Месяц, В. А. Дороганов* [и др.] // *Фундаментальные исследования*. — 2013. — № 1. — С. 413–418.

8. **Евтушенко, Е. И.** Эффективные конструкции и материалы зданий и сооружений / *Е. И. Евтушенко, И. В. Старостина* // *Межвузовский сборник трудов*. — Белгород : БелГТАСМ, 1999. — С. 24–28. ■

Получено 06.05.14

© *Е. И. Евтушенко, В. А. Дороганов, Н. А. Перетокина, Т. И. Зайцева, 2014 г.*

К. Т. Н. **М. А. Волосова**, Д. Т. Н. **С. Н. Григорьев**, Д. Т. Н. **В. В. Кузин** (✉)

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА СТРУКТУРНУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКЕ. Часть 1. Методика исследования

Исследовано влияние покрытия на структурную неоднородность напряжений в керамике. Методика исследования создана на базе автоматизированной системы термopочностных расчетов керамических пластин.

Ключевые слова: керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, напряженно-деформированное состояние, поверхность структурного элемента, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Нестабильность эксплуатационных характеристик изделий из керамических материалов в условиях экстремальных внешних воздействий предполагает разработку специальных методов повышения их надежности [1, 2]. Одно из наиболее перспективных направлений решения этой практической задачи — нанесение функциональных покрытий на керамические

изделия [3]. При этом достигается совокупность положительных эффектов, подробно рассмотренная в работе [4]. Однако усложнение структуры поверхностного слоя гетерофазной системы приводит к существенному изменению его напряженно-деформированного состояния [5]. В отдельных случаях это приводит к формированию дефектов на границах фаз, которые оказывают весьма негативное влияние на работоспособность керамических деталей [6]. Поэтому факт появления дефектов требует особого внимания при выборе покрытия или специального подхода к эффективному проектированию керамических изделий с функциональными покрытиями [7].



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Проектирование керамических деталей, на поверхности которых предполагается присутствие функциональных покрытий, является комплексной задачей. При ее решении, как правило, первоочередное внимание уделяется выполнению функциональных требований к покрытию [8]. При этом недостаточно анализируется весь «горизонт возможных проблем», и в частности влияние выбранного функционального покрытия на поведение «базовой» керамики, которая весьма требовательна к условиям эксплуатации и, соответственно, нагружения.

Разные нагрузки формируют в керамическом материале специфические напряженно-деформированные состояния [9–13]. Эта специфика предопределяет особенности процессов деградации и разрушения материала. Показательны в этом отношении примеры применения керамических инструментов с покрытиями [14, 15]. Например, при одних режимах эксплуатации покрытие обеспечивает многократное повышение стойкости керамических инструментов, а при других наблюдается отрицательный эффект. И это происходит на общем фоне выполнения основных требований к функциональному покрытию. Существуют другие примеры неоднозначного влияния функциональных покрытий на эксплуатационные показатели керамических изделий.

Причина неоднозначного влияния функциональных покрытий на эксплуатационные характеристики керамических деталей до настоящего времени не установлена. Поэтому выявление природы этого влияния — актуальная научно-практическая задача, решение которой позволит эффективно проектировать керамические композиционные системы для определенной области применения. Для решения задачи выполнен комплекс исследований по изучению влияния покрытия на структурную неоднородность напряжений в керамике, находящейся под действием разных внешних нагрузок. Полученные результаты будут представлены в дальнейших публикациях.

В настоящей статье рассматриваются особенности напряженно-деформированного состояния структурных элементов оксидно-карбидной керамики без покрытия и с покрытием из нитрида титана под действием сосредоточенной силы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное изучение структурной неоднородности напряжений в керамике, под которой понимали изменение напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i на поверхности (в поверхностном слое) структурных элементов керамики под действием внешней нагрузки, практически невозможно из-за их малых размеров. Поэтому для решения по-

ставленной задачи использовали численное моделирование деформационных процессов структурно-неоднородной среды.

На основании результатов изучения структуры керамической пластины ВОК71 с покрытием из TiN с использованием электронно-сканирующего микроскопа VEGA 3 LM Tescan построили ее микроструктурную модель. При этом руководствовались положениями, изложенными в работе [16]. Модель описывает неоднородно-слоистую среду и состоит из следующих элементов структуры керамики (рис. 1): зерно, межзеренная фаза, матрица, покрытие и контактирующий металл. На базе этой модели сформировали расчетную схему со следующими допущениями: 1) рассматривается плоская задача, 2) керамика — неоднородный и бездефектный материал, 3) покрытие и металл — однородные и бездефектные материалы, 4) пластические деформации отсутствуют.

Расчетная схема (рис. 2) представлена в виде конструкции, состоящей из однородных структурных элементов: зерна эллипсной формы и размерами $a = 2$ мкм и $b = 3$ мкм, которые заделаны в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 0,2$ мкм. На внешней стороне зерна, межзеренной фазы и матрицы последовательно расположены слои покрытия толщиной Δ_n и серого чугуна толщиной $\Delta_m = 2$ мкм. При $\Delta_n = 0$ мкм рассматривается конструкция без покрытия, а при $\Delta_n = 5$ мкм — конструкция с покрытием. Расчеты выполнены для конструкции, определенной следующими параметрами: $n1 = 6$; $n2 = 6$; $n3 = 6$; $n4 = 4$; $c = 2,5$, которые используются при автоматической генерации конечных элементов в расчетной схеме.

В модели зерно из карбида титана TiC (плотность $\rho = 4,9$ г/см³, модуль упругости $E = 484$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,22$, температурный коэффициент теплового расширения $\alpha = 7,95 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹); межзеренная фаза из оксида



Рис. 1. Микрофотография области контакта керамики ВОК71 с покрытием TiN

магния MgO ($\rho = 3,4 \text{ г/см}^3$; $E = 315 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,18$; $\alpha = 13,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), равномерно распределенная по внешнему контуру зерна; матрица керамики из оксида алюминия Al_2O_3 ($\rho = 5,68 \text{ г/см}^3$, $E = 180 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,2$; $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$); слой покрытия из нитрида титана TiN ($\rho = 5,44 \text{ г/см}^3$, $E = 440 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,25$, $\alpha = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и слой из серого чугуна СЧ32 ($\rho = 5,68 \text{ г/см}^3$, $E = 180 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,2$; $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$). Теплопроводность λ , Вт/(м·град), материалов задавали формулами $\lambda = 23,2 e^{0,0002T}$, $\lambda = 7871,2 / (T - 125) + 3,6 \cdot 10^{-33} T^{10}$, $\lambda = 2100 T^{-0,78}$, $\lambda = 36,6 e^{0,00045T}$ и $\lambda = 44,028 e^{-0,0005T}$ для TiC, MgO, Al_2O_3 , TiN и СЧ32 соответственно. Полный перечень справочников, из которых позаимствованы значения показателей этих свойств, приведен в статье [17].

В дальнейшем конструкцию без покрытия будем называть система (TiC-MgO- Al_2O_3)-СЧ32, конструкцию с покрытием - система (TiC-MgO- Al_2O_3)-TiN-СЧ32.

К свободной поверхности конструкции в расчетной схеме прикладывали сосредоточенную силу F , действующую на ее радиусном участке под углом $\beta = 45^\circ$, а также распределенную силовую нагрузку P и тепловой поток Q , которые действуют на участках длиной l_1 и l_2 . С поверхностей, свободных от теплового потока, обеспечивали теплоотвод в окружающую среду с постоянным коэффициентом $h = 10^5 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}$.

Численные эксперименты выполняли в автоматизированной системе термо-прочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [17]. Для анализа результатов численных экспериментов использовали метод контрольных точек (КТ), под которыми понимали фиксированные конечные элементы конструкции [18]. Число и расположение КТ определяли с учетом цели настоящего исследования. Фрагмент реальной сетки конечных элементов

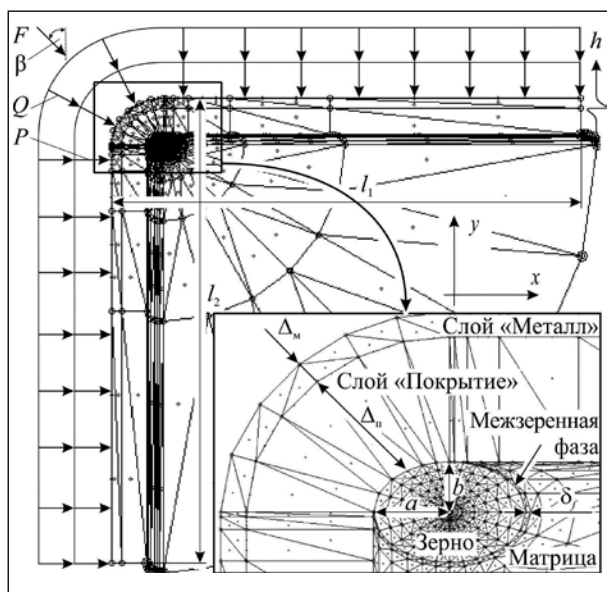


Рис. 2. Расчетная схема

с обозначением КТ показан на рис. 3. Все выбранные КТ расположены в поверхностном слое зерна (КТ1 - КТ24), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (КТ25 - КТ42), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (КТ43 - КТ60), и матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (КТ61 - КТ78). Напряжения в слоях покрытия и металла не выделяли и не изучали в настоящем исследовании. После выполнения расчетов получали значения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i ($\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 4\sigma_{12}^2}$) в каждой КТ.

Результаты расчетов представляли в виде полей температур и напряжений, а также графиков, связывающих численные значения напряжений с расположением КТ. Для количественной оценки структурной неоднородности напряжений в каждом поверхностном слое элемента структуры керамики использовали следующие показатели: максимальное $\sigma_{\text{макс}}$ (наибольшее значение растягивающего напряжения), минимальное $\sigma_{\text{мин}}$ (наибольшее значение сжимающего напряжения) и среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значение напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , диапазон Σ изменения напряжений (с учетом их знака), число изменений знака напряжений, а также их стандартное отклонение s .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика, разработанная на базе автоматизированной системы термочностных расчетов керамических пластин, позволяет исследовать неоднородности напряжений в структурных элементах керамики.

* * *

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России при выполнении научно-исследовательской работы в рамках государственного задания.

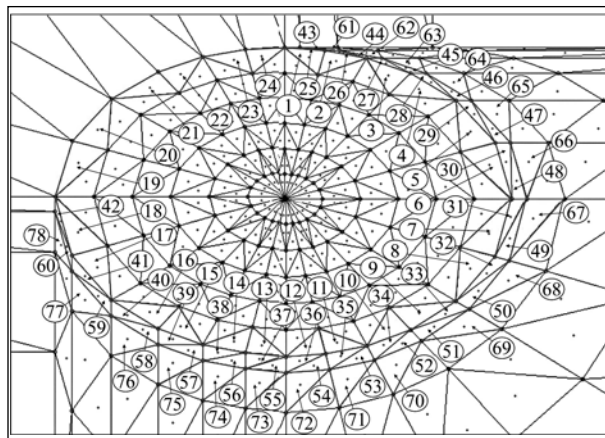


Рис. 3. Схема расположения КТ в элементах структуры керамики

Библиографический список

1. **Эванс, А. Г.** Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон ; пер. с англ. — М. : Металлургия, 1980. — 256 с.
2. **Балкевич, В. Л.** Техническая керамика : учеб. пособие для вузов / В. Л. Балкевич ; 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1984. — 256 с.
3. **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.]. — М. : ВНИИ-ТЭМР. Машиностроительные производства. Сер. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении : обзорная информ. — 1989. — Вып. 4. — 62 с.
4. **Григорьев, С. Н.** Инженерия поверхности металлорежущего инструмента методом комбинированной вакуумно-плазменной обработки (часть 1) / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2004. — № 7. — С. 2–6.
5. **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.
6. **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.
7. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87–88.
8. **Верещака, А. С.** Композиционные покрытия как фактор повышения работоспособности и надежности инструмента / А. С. Верещака, В. В. Кузин // Методы повышения производительности и качества обработки деталей на оборудовании автоматизированных производств : сб. тр. науч.-техн. конф., Ярославль, 1985. — С. 53–54.
9. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 47–51.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 1. Effect of complex mechanical loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.
10. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние тепловой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 2. Effect of thermal loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.
11. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 3. Влияние распределенной силовой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42–46.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 3. Effect of a distributed force load / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 36–39.
12. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 4. Совместное действие силовых и тепловых нагрузок / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 29–34.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 4. Combined effect of force and thermal loads / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 40–44.
13. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [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.
14. **Кузин, В. В.** Разработка и исследование режущих инструментов из нитридной керамики с покрытием / В. В. Кузин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2006. — № 9. — С. 48–52.
15. **Волосова, М. А.** Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2010. — № 6. — С. 37–42.
16. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.
- Kuzin, V. V.** Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.
17. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочислотных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.
- Grigor'ev, S. N.** Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.
18. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 22.05.14

© М. А. Волосова, С. Н. Григорьев,
В. В. Кузин, 2014 г.