Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), **М. Р. Портной,** к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**

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

УДК 539.4.016.3:666.3

НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ С РАЗВИТЫМ РЕЛЬЕФОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Изучено влияние теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности оксидно-карбидной керамики с развитым рельефом. Установлено, что наибольшая неоднородность напряжений характерна для межзеренной фазы в этой керамике.

Ключевые слова: *керамика, элемент структуры, тепловой поток, температура, неоднородность напряжений.*

ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом в создании надежных тепловых энергоустановок является определение напряженно-деформированного состояния их наиболее нагруженных компонентов. Значительно усложняет решение этой задачи неоднородная деформация таких компонентов под действием температур эксплуатации [1]. Среди многих факторов, порождающих этот эффект, следует выделить неоднородность структуры материалов, из которых изготовлены детали, и микрорельеф их поверхности [2]. Разные формы, размеры и свойства основных элементов структуры неоднородных материалов, а также их разновысотное расположение, влияющее на рельеф поверхности деталей, являются главными причинами формирования неоднородности напряжений в поверхностном слое деталей. Неоднородность напряжений в поверхностном слое материала ускоряет процесс появления дефектов, приводящих к непрогнозируемым отказам энергоустановок. Поэтому выявление основных закономерностей формирования неоднородности напряжений в перспективных материалах, и прежде всего в керамических, под действием внешней тепловой нагрузки является актуальной научной задачей.

Изучение разных аспектов этой задачи выполнено в работах [3–6]. Цель настоящего исследования — изучение влияния теплового потока на неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике, имеющей развитый рельеф поверхности.

✉

В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении численных экспериментов использовали методику, описанную в работе [6]. Развитый рельеф поверхности керамики представили в виде «открытой» заделки сферического зерна TiC через межзеренную фазу MgO в матрицу Al_2O_3 (рис. 1). К поверхности керамики прикладывали тепловой поток $Q = (1{,}2, 1{,}5, 1{,}6) \cdot 10^9$ Вт/м^2;

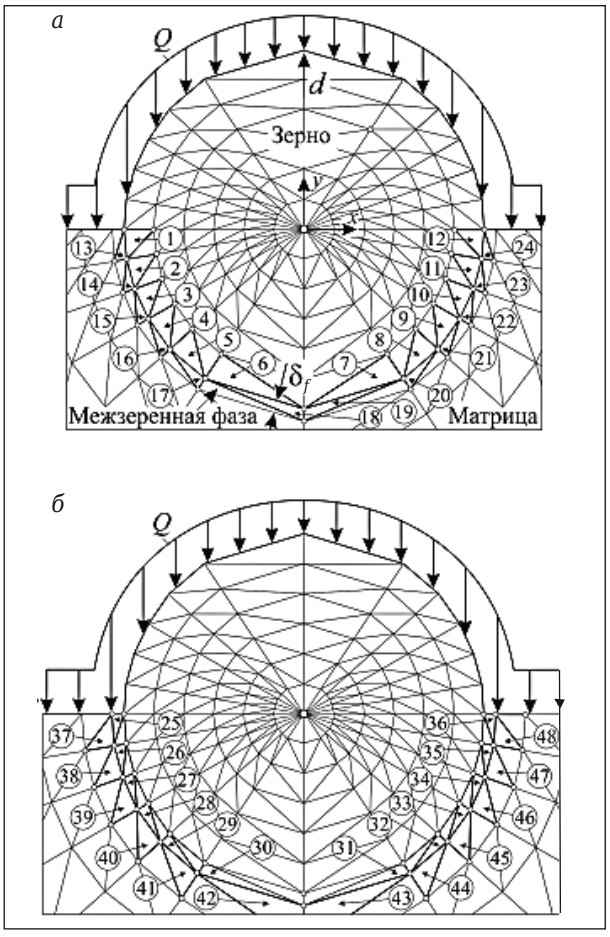

Рис. 1. Расчетная схема

отвод тепла с поверхности осуществляли только во внутренние объемы керамики. Неоднородность напряжений оценивали: 1) максимальными, минимальными, средними значениями напряжений σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i; 2) по диапазону изменения σ_{11}, σ_{22}, σ_{12} и σ_i; 3) по числу изменений их знака σ_{11}, σ_{22} и σ_{12} в поверхности структурных элементов керамики. Для определения этих характеристик использовали метод контрольных точек (КТ) [7]. Расчеты выполняли в автоматизированной системе RKS-ST v.1.0 [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием теплового потока поверхностный слой керамики нагревается, и в нем образуется температурное поле. Наибольшие температуры формируются в поверхностном слое зерна, в поверхностных слоях других структурных элементов керамики температура снижается по мере увеличения расстояния от поверхности, к которой приложен тепловой поток. Наибольшие температуры (722, 1005 и 1111 °С) формируются в КТ12 поверхности зерна, наименьшие (513, 728 и 810 °С) — в КТ42 поверхности матрицы под действием тепловых потоков Q = (1,2, 1,5, 1,6) · 10^9 Вт/м^2 соответственно. Под влиянием сформировавшегося температурного поля поверхностный слой керамики деформируется по схеме выдавливания зерна из каркаса.

Характер изменения напряжений σ_{11}, σ_{12} и σ_{22} в КТ поверхности элементов структуры керамики системы TiC–MgO–Al_2O_3 под действием симметричного теплового потока Q = 1,5 · 10^9 Вт/м^2 показан на рис. 2.

Установлено, что в поверхности зерна (см. рис. 2, *а*) формируются напряжения σ_{11}, σ_{22}, σ_{12}, которые изменяются в диапазонах 371,7 МПа — от –1027 до –655,3 МПа при их среднем значении $\sigma_{ср}$ = –920,6 МПа, 180 МПа — от –92,3 до 87,7 МПа при $\sigma_{ср}$ = –12,8 МПа и 281 МПа — от –140,5 до 140,5 МПа при $\sigma_{ср}$ = 0 МПа соответственно. Напряжения σ_{11} на всей протяженности зависимости имеют сжимающий характер и не изменяют знака. Напряжения σ_{22} 2 раза изменяют знак на участках КТ4–КТ5 и КТ8–КТ9. Напряжения σ_{12} 3 раза меняют знак — между КТ1–КТ2, КТ6–КТ7 и КТ11–КТ12.

В поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (см. рис. 2, *б*), формируются напряжения σ_{11}, σ_{22} и σ_{12}, которые изменяются в диапазонах 329 МПа — от –1273 до –944 МПа при $\sigma_{ср}$ = = –1113,1 МПа, 559,2 МПа — от –636,4 до –77,21 МПа при $\sigma_{ср}$ = –379,4 МПа и 561 МПа — от –280,5 до 280,5 МПа при $\sigma_{ср}$ = 0 МПа соответственно. Напряжения σ_{11} и σ_{22} на всей протяженности зависимости имеют сжимающий характер и не изменяют знака. Напряжения σ_{12} 3 раза меняют знак — между КТ13–КТ14, КТ18–КТ19 и КТ23–КТ24.

В поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице (см. рис. 2, *в*), формируются напряжения σ_{11}, σ_{22} и σ_{12}, которые изменяются в диапазонах 326 МПа — от –1335 до –1009 МПа при $\sigma_{ср}$ = –1162,1 МПа, 620,7 МПа — от –581,1 до 39,63 МПа при $\sigma_{ср}$ = –342 МПа и 572,8 МПа — от –286,4 до 286,4 МПа при $\sigma_{ср}$ = 0 МПа соответственно. Напряжения σ_{11} на всей протяженности зависимости имеют сжимающий характер и не изменяют знака. Напряжения σ_{22} 2 раза меняют знак напряжений — на участках КТ29–КТ30 и КТ31–КТ32. Напряжения σ_{12} 3 раза меняют знак — между КТ25–КТ26, КТ30–КТ31 и КТ35–КТ36.

В поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (см. рис. 2, *г*), формируются

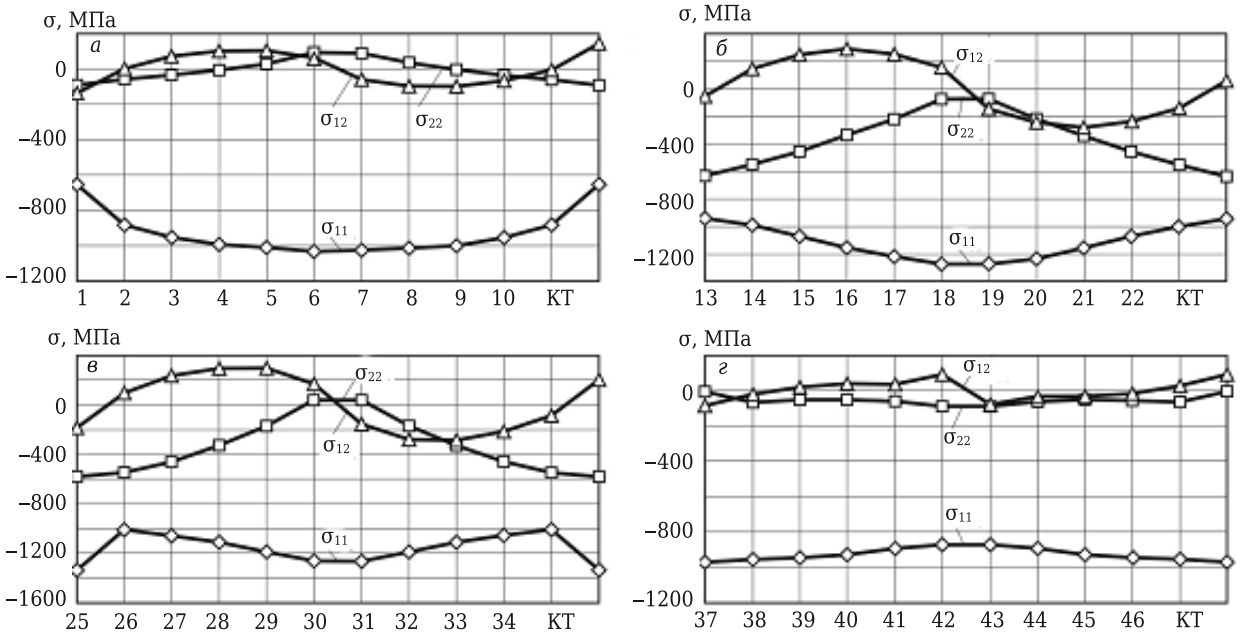

Рис. 2. Напряжения в КТ поверхностях зерна (*а*), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (*б*), к матрице (*в*), и матрицы (*г*) керамики системы TiC–MgO–Al_2O_3 под действием теплового потока Q = 1,5 · 10^9 Вт/м^2

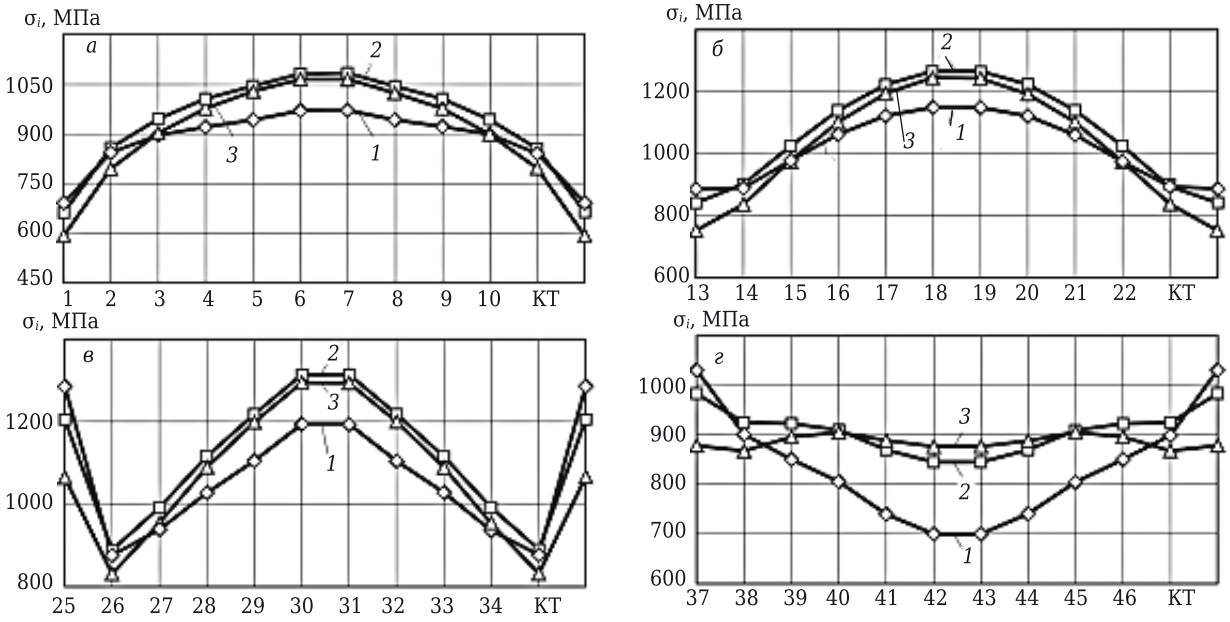

Рис. 3. Интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностей зерна (*а*), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (*б*), к матрице (*в*), и матрицы (*г*) керамики системы TiC–MgO–Al_2O_3 под действием тепловых потоков, Вт/м^2: *1* — 1,2 · 10^9; *2* — 1,5 · 10^9; *3* — 1,6 · 10^9

напряжения σ_{11}, σ_{22} и σ_{12}, которые изменяются в диапазонах 101,3 МПа — от –974 до –872,7 МПа при $\sigma_{ср}$ = –929 МПа, 86,3 МПа — от –93,2 до –6,878 МПа при $\sigma_{ср}$ = –56 МПа и 177,3 МПа — от –118 до 88,64 МПа при $\sigma_{ср}$ = 0 МПа соответственно. Напряжения σ_{11} и σ_{22} на всей протяженности зависимости имеют сжимающий характер и не изменяют знака. Напряжения σ_{12} 3 раза меняют знак — между КТ38–КТ39, КТ42–КТ43 и КТ46–КТ47.

Характер изменения интенсивности напряжений σ_i в КТ поверхностей структурных элементов керамики системы TiC–MgO–Al_2O_3 под действием разных тепловых потоков показан на рис. 3. Видно, что увеличение теплового потока приводит к росту σ_i в КТ поверхностей всех структурных элементов керамики.

В поверхности зерна (см. рис. 3, *а*) интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 280 МПа — от 690 до 970 МПа при $\sigma_{ср}$ = 876,7 МПа, 418,1 МПа — от 660,9 до 1079 МПа при $\sigma_{ср}$ = 930,6 МПа и 472,5 МПа — от 591,5 до 1064 МПа при $\sigma_{ср}$ = 892,7 МПа под действием потока Q = (1,2, 1,5, 1,6) · 10^9 Вт/м^2 соответственно. В поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (см. рис. 3, *б*), σ_i изменяется в диапазоне 263,3 МПа — от 884,7 до 1148 МПа при $\sigma_{ср}$ = = 1013,6 МПа, 423,5 МПа — от 839,5 до 1263 МПа при $\sigma_{ср}$ = 1039,6 МПа и 492 МПа — от 751 до 1243 МПа при $\sigma_{ср}$ = 1017 МПа под действием потока Q = (1,2, 1,5, 1,6) · 10^9 Вт/м^2 соответственно. В поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице (см. рис. 3, *в*), σ_i изменяется в диапазоне 411,4 МПа — от 873,6 до 1285 МПа при $\sigma_{ср}$ = 1069,2 МПа, 424,4 МПа — от 888,6 до 1313 МПа при $\sigma_{ср}$ = 1122 МПа и 462,5 МПа — от 831,5 до 1294 МПа при $\sigma_{ср}$ = 1072 МПа под действием потока Q = (1,2, 1,5, 1,6) · 10^9 Вт/м^2 соответственно. В КТ поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (см. рис. 3, *г*), σ_i изменяется в диапазоне 329,7 МПа — от 699,3 до 1029 МПа при $\sigma_{ср}$ = 836,5 МПа, 138,4 МПа — от 843,6 до 982 МПа при $\sigma_{ср}$ = 907,7 МПа и 38 МПа — от 867 до 905 МПа при $\sigma_{ср}$ = 884,5 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных экспериментов выявлена высокая неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике с развитым рельефом под действием теплового потока. Наибольшие значения интенсивности напряжений σ_i зафиксированы в поверхностях межзеренной фазы, примыкающей к матрице (1294 МПа при Q = 1,6 · 10^9 Вт/м^2), а наименьшие — в поверхности зерна (591,5 МПа при Q = 1,6 · 10^9 Вт/м^2). Наибольший диапазон изменения σ_i определен в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (492 МПа при Q = 1,6 · 10^9 Вт/м^2) и матрице, наименьший — в поверхности матрицы (38 МПа при Q = 1,6 · 10^9 Вт/м^2). Этим обстоятельством можно объяснить наибольшую вероятность появления дефектов на границах фаз под действием эксплуатационных нагрузок.

* * *

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. ***Бадагуев, Б. Т.*** Эксплуатация тепловых энергоустановок / *Б. Т. Бадагуев.* — Альфа-Пресс, 2011. — 208 с.

2. ***Кузин, В. В.*** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / *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.

3. ***Кузин, В. В.*** Неоднородность напряжений в поверхности элементов структуры оксидной керамики под действием симметричного теплового потока при глухой заделке сферического зерна / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, М. Ю. Фёдоров* // Вестник МГТУ Станкин. — 2015. — № 1 (32). — С. 27–33.

4. ***Кузин, В. В.*** Тепловые и деформационные процессы в поверхностном слое детали из оксидно-карбидной керамики, контактирующей с деталью из никелевого сплава, при нагреве / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 4. — С. 53–59.

Kuzin, V. V. Thermal and deformation processes occurring within a component surface layer made from oxide-carbide ceramic in contact with a nickel alloy component during heating loads / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 157–163.

5. ***Волосова, М. А.*** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / *М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / *M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

6. ***Кузин, В. В.*** Влияние теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности оксидной керамики с развитым рельефом / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Р. Портной* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 6. — С. 66–68.

7. ***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.

8. ***Григорьев, С. Н.*** Автоматизированная система термопрочностных 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. ■

Получено 07.09.15
© В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Тематика

- Оценка качества сырья по термомеханическим показателям
- Производства чугуна и стали в Индии: перспективы для будущих технических кадров
- Торкретирование шахты доменной печи
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Новейшие достижения в контроле огнеупоров и оборудовании
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Потребление легковесных огнеупоров
- Снижение стоимости огнеупоров путем систематического их совершенствования