## Д. т. н. В. В. Кузин (🖾), д. т. н. С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин

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

# УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25 НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КЕРАМИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ. ЧАСТЬ 4. СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ СИЛОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК<sup>\*</sup>

Приведены результаты комплексного изучения неоднородности напряжений в поверхностном слое керамики. Исследовано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония под совместным действием механических и термических нагрузок. Выявлена высокая неоднородность напряжений в структурных элементах керамики. Отмечена необходимость учета неоднородности напряжений при описании механизма износа и разрушения, а также при проектировании изделий из этой керамики для заданных условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** керамика, неоднородность, напряженно-деформированное состояние, поверхностный слой, моделирование, диоксид циркония, проектирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективным методом исследования процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов является компьютерное моделирование [1, 2]. Возможность многостороннего анализа деформационных процессов на макро- и микроуровне логично дополняет традиционный потенциал материаловедческих и физических экспериментов [3]. Комплексный анализ этих исследований позволяет не только оценить особенности напряженно-деформированного состояния и причины разрушения керамики под действием разных нагрузок, но и сформировать новые позиции для создания керамических материалов [4].

Формализация внутренних связей в такой достаточно сложной системе, какой является нагруженный структурно-неоднородный материал, и современные возможности модуля Simulation программного комплекса SolidWorks позволили изучить раздельное влияние силовых и тепловых нагрузок на неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики из диоксида циркония [5–7]. Между тем известно, что совместное действие силовых и тепловых нагру-

\* Окончание. Части 1–3 опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 10, 12 за 2013 г. и в № 1 за 2014 г.



зок значительно усложняет общее напряженнодеформированное состояние керамики [8–13]. Очевидно, что в этом случае также изменятся условия формирования напряжений в ее поверхностном слое.

Цель настоящей работы — оценить неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики из диоксида циркония, формирующихся в результате совместного действием силового и теплового нагружения.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение сформулированной задачи базировалось на численном моделировании деформационных процессов с использованием комплекса моделей [14, 15]. Методика выполнения экспериментов подробно описана в первой части этой работы [5]. Поэтому здесь отметим только наиболее важные положения методики. Численные эксперименты выполняли в модуле Simulation программного комплекса SolidWorks.

Расчетная схема представлена в виде конструкции, состоящей из фрагментов деталей Д1 и Д2, выполненных из керамики и меди соответственно (рис. 1). Фрагмент детали Д1 состоит из трех зерен Z1, Z2 и Z3 эллипсной формы, которые заделаны в матрицу через межзеренную фазу. На внешней стороне зерен, межзеренной фазы и матрицы расположен фрагмент детали Д2. Зерна и матрица детали Д1 выполнены из диоксида циркония ZrO<sub>2</sub> (плотность  $\rho$  = 5,68 г/см<sup>3</sup>, модуль упругости E = 180 ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu$  = 0,2); межзеренная фаза — из оксида



Рис. 1. Расчетная схема

магния MgO (ρ = 3,4 г/см<sup>3</sup>, E = 315 ГПа, μ = 0,18), деталь Д2 — из меди Cu (ρ = 8,9 г/см<sup>3</sup>, E = 110 ГПа, μ = 0,37).

К свободной поверхности фрагмента детали Д2 прикладывали распределенные силы  $P_1$  и  $P_2$  и тепловые потоки  $Q_1$  и  $Q_2$ . Причем значения распределенных сил изменяли в численных экспериментах, а значения тепловых потоков оставались постоянными:  $Q_1 = 6\cdot10^8$  и  $Q_2 = 2\cdot10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Определенное сочетание распределенных сил считали силовым комплексом, каждый из которых характеризовался фиксированными значениями распределенных сил (табл. 1). Эта «нагруженная» конструкция называлась «керамика системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu».

Таблица 1. Сочетание силовых нагрузок, Н, в комплексах

Нагрузка	Номер комплекса нагрузок		
	1	2	3
$P_1$	0,01	0,02	0,04
$P_2$	0,005	0,01	0,02

Для анализа результатов численных экспериментов использовали контрольные точки (КТ), расположенные в поверхностных слоях зерен Z1 (КТ1 – КТ25), Z2 (КТ26 – КТ51), Z3 (КТ52 – КТ76) и межзеренной фазы, примыкающих к зернам (КТ77 – КТ137) и к матрице (КТ138 – КТ182), а также в поверхностном слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе (КТ183 – КТ221) [11]. Коэффициент неоднородности напряжений  $K_{\Delta} = \sigma_{i \text{ max}} / \sigma_{i \text{ min}} (\sigma_{i}$  — интенсивность напряжений, МПа) определяли на всех выделенных поверхностях структурных элементов керамики.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

30

На рис. 2, *а* приведен пример температурного поля в поверхностном слое керамики системы  $ZrO_2$ -MgO-ZrO\_2-Cu, которое формируется в результате действия тепловых потоков  $Q_1$  и  $Q_2$ . Качественная оценка поля показывает, что температура в поверхностном слое керамики изменяется в диапазоне от 20 до 407 °C. Температура заметно снижается с увеличением расстояния



Рис. 2. Поля температур (*a*) и интенсивности напряжений (*б*) в керамике системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu в результате совместного действия силовых и тепловых нагрузок

от поверхности, к которой приложены тепловые потоки. Наибольшие температуры формируются на внешней поверхности центрального зерна Z2 (КТ26 и КТ49 - КТ51), контактирующей с фрагментом детали Д2.

На рис. 2, б представлено поле интенсивности напряжений о<sub>i</sub> в поверхностном слое керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, которое образуется под действием силового комплекса № 1 (см. табл. 1) и тепловых потоков Q<sub>1</sub> и Q<sub>2</sub>. Анализ поля показывает, что напряженно-деформированное состояние структурных элементов керамики крайне разнородно. Наибольшие напряжения формируются в межзеренной фазе и в локальных областях матрицы.

Для составления более детальной картины совместного влияния тепловых и силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu проанализировали результаты расчетов интенсивности напряжений в структурных элементах этой системы.

Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя зерен Z1, Z2 и Z3 под действием разных силовых комплексов и постоянных тепловых потоков представлено на рис. 3. Главная особенность полученных зависимостей заключается в том, что увеличение распределенной силовой нагрузки при неизменной тепловой нагрузке приводит к уменьшению интенсив-



**Рис. 3.** Влияние распределенной силовой нагрузки на интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в КТ поверхностного слоя зерен Z1 (a), Z2 (б) и Z3 (в) в керамике системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu при постоянных значениях тепловых потоков  $Q_1 = 6 \cdot 10^8$  и  $Q_2 = 2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; номера силовых комплексов указаны на кривых

ности напряжений  $\sigma_i$  во всех КТ поверхностного слоя трех зерен. Характер этого влияния принципиально отличается от ранее установленных зависимостей, характерных для нагружения поверхности керамики только силовыми комплексами. В тех случаях увеличение силовой нагрузки приводило к пропорциональному повышению  $\sigma_i$  в поверхностных слоях зерен Z1–Z3.

Характер изменения локальных напряжений в поверхностном слое зерна Z1 при одновременном воздействии силовой и тепловой нагрузок описывается достаточно простой кривой, имеющей один максимум в КТ7 (рис. 3, *a*). Под действием силового комплекса № 1 диапазон изменения интенсивности напряжений о<sub>i</sub> составляет 559–1081 МПа, под действием комплекса № 2 — 466–974 МПа и комплекса № 3 — 204–904 МПа. При этом максимальные напряжения уменьшаются только на 16 % (КТ7), а минимальные напряжения — в 2,75 раза (КТ4).

Столь сложное влияние комбинированной нагрузки на локальные напряжения в поверх-

ностном слое зерна Z1 сказывается на значениях коэффициента неоднородности K<sub>Δ</sub>, которые составляют 1,9, 2,1 и 4,4 под действием силовых комплексов № 1-3 соответственно. Т. е. увеличение силовых нагрузок при неизменных тепловых потоках уменьшает интенсивность напряжений в поверхностном слое зерна Z1, но при этом значительно повышает коэффициент неоднородности напряжений.

Характер изменения локальных напряжений в поверхностном слое зерна Z2 при одновременном воздействии силовой и тепловой нагрузок более сложный (рис. 3, б). Кривые имеют асимметричный вид и состоят из чередующихся пиков и впадин. Наибольшие напряжения зафиксированы на участке кривых от КТЗ8 до КТ40, которым соответствует область поверхностного слоя зерна Z2, наиболее удаленная от детали Д2. Под действием силового комплекса № 1 диапазон изменения оі составляет 652-835 МПа, под действием комплекса № 2 — 523-744 МПа и под действием комплекса № 3 — 289-624 МПа. При этом максимальные напряжения уменьшаются только на 13 % (КТ40), а минимальные напряжения — в 2.3 раза (КТЗЗ). Интенсивность напряжений в большей мере уменьшается в КТ, расположенных наиболее близко к месту приложения нагрузок.

Напряженное состояние поверхностного слоя зерна Z2 характеризуется коэффициентом неоднородности K<sub>Δ</sub>, равным 1,3, 1,4 и 2,2 под действием силовых комплексов № 1–3 соответственно.

Изменение напряжений в поверхностном слое зерна Z3 под одновременным воздействием силовой и тепловой нагрузок показано на рис. 3, в. Видно, что кривые практически «зеркально» отражают зависимости, характерные для зерна Z1, причем наибольшее значение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  зафиксировано в КТ70. Под действием силового комплекса № 1 диапазон изменения  $\sigma_i$  составляет 490–924 МПа, под действием комплекса № 2 — 390–817 МПа и под действием комплекса № 3 — 151-714 МПа. При этом максимальные напряжения уменьшаются только на 30 % (КТ70), а минимальные напряжения — в 3,2 раза (КТ73).

Напряженное состояние поверхностного слоя зерна Z3 характеризуется коэффициентом неоднородности K<sub>Δ</sub>, равным 1,8, 2,1 и 4,7 под действием силовых комплексов № 1–3 соответственно.

Совместное влияние силовой и тепловой нагрузок на интенсивность напряжений σ<sub>i</sub> в слоях межзеренной фазы керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu показано на рис. 4. Видно, что все кривые имеют однотипный вид с резкими изменениями интенсивности напряжений σ<sub>i</sub>, причем увеличение силовой нагрузки при постоянных значениях тепловых потоков приводит к уменьшению интенсивности напряжений во всех КТ межзеренной фазы. В слоях межзеренной фазы, примыкающих к зернам (рис. 4, *a*) и матрице (рис. 4, *б*), формируются практически одинаковые напряжения. Наибольшая интенсивность напряжений о<sub>i</sub> зафиксирована в КТ86, КТ106, КТ128, КТ141, КТ160 и КТ179 межзеренной фазы, которые расположены на наибольшем удалении от места приложения нагрузок. Наименьшее влияние силовая нагрузка оказывает на интенсивность напряжений в КТ79, КТ128, КТ141 и КТ179, расположенных наиболее близко к поверхности приложения силовых нагрузок.



**Рис. 4.** Влияние распределенной силовой нагрузки на интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в КТ поверхностного слоя межзеренной фазы, примыкающего к зернам (*a*) и матрице (б) в керамике системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, при постоянных значениях тепловых потоков  $Q_1 = 6 \cdot 10^8$ и  $Q_2 = 2 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; номера силовых комплексов указаны на кривых

Результаты детализированного анализа (по областям, охватывающим определенное зерно) напряжений, формирующихся в слоях межзеренной фазы керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, примыкающих к зернам и матрице, приведены в табл. 2 и 3. Последовательно рассмотрим характер изменения напряжений в каждой области межзеренной фазы.

Влияние совместной силовой и тепловой нагрузок на о<sub>i</sub> и K<sub>Δ</sub> в слое межзеренной фазы керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, примыкающем к зернам Z1, Z2 и Z3, представлено в табл. 2. Установлено, что в этом слое зерна в области Z1 (КТ77-96) под действием силовых комплексов № 1-З диапазон изменения о<sub>i</sub> составляет 766–1580 МПа, в области Z2 (КТ 97-116) — 925–1716 МПа и в области Z3 (КТ 117-137) — 910–1572 МПа. При увеличении силовой нагрузки максимальные напряжения уменьшаются на 6, 26 и 8 % в областях Z1, Z2 и Z3 соответственно. Одновременно с этим минимальные напряжения уменьшаются на 58, 33 и 34 % в областях Z1–Z3 соответственно.

Как видно из табл. 2, значения коэффициентов неоднородности во всех областях слоя межзеренной фазы, примыкающего к зернам, изменяются в узком диапазоне ( $K_{\Delta} = 1,3\div1,95$ ), что свидетельствует о достаточно стабильном характере напряжений в этом слое межзеренной фазы. Между тем отмечено, что значения этого коэффициента практически неизменны под действием силовых комплексов № 1 и 2. Однако дальнейшее увеличение силовой нагрузки (комплекс № 3) приводит к более заметному увеличению  $K_{\Delta}$ , особенно в области Z1.

Влияние совместных силовой и тепловой нагрузок на σ<sub>i</sub> и K<sub>Δ</sub> в слое межзеренной фазы керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, примыкающем к матрице, представлено в табл. 3. Установлено, что в этом слое зерна в области Z1

Таблица 2. Влияние совместной силовой и тепловой нагрузок на напряженно-деформированное состояние слоя межзеренной фазы, примыкающего к зернам

Номер комплекса нагрузок –	Диапазон изменения интенсивности напряжений σ <sub>i</sub> , МПа / коэффициент неоднородности К∆ в области			
	<i>Z</i> 1	Z2	<i>Z</i> 3	
1	1214–1580 / 1,3	1234–1716/1,4	1219–1572 / 1,3	
2	1082–1404 / 1,3	1125–1594 / 1,4	1058–1523 / 1,4	
3	766–1490 / 1,95	925–1361 / 1,5	910–1443 / 1,6	

Таблица 3. Влияние совместной силовой и тепловой нагрузки на напряженно-деформированное состояние слоя межзеренной фазы, примыкающего к матрице

Номер комплекса нагрузок	Диапазон изменения интенсивности напряжений σ <sub>i</sub> , МПа / коэффициент неоднородности К∆ в области			
	<i>Z</i> 1	Z2	<i>Z</i> 3	
1	1282–1549 / 1,2	1270–1668 / 1,3	1238–1527 / 1,2	
2	1121–1468 / 1,3	1111–1546 / 1,4	1147–1508 / 1,3	
3	742–1430 / 1,95	860–1310 / 1,5	938–1507 / 1,6	

32



**Рис. 5.** Влияние распределенной силовой нагрузки на  $\sigma_i$  в КТ поверхностного слоя матрицы, прилегающего к межзеренной фазе керамики системы  $ZrO_2$ -MgO- $ZrO_2$ -Cu, при постоянных значениях тепловых потоков  $Q_1 = 6\cdot10^8$  и  $Q_2 = 2\cdot10^8$  Вт/м<sup>2</sup>; номера силовых комплексов указаны на кривых

(КТ77-96) под действием силовых комплексов № 1-3 диапазон σ<sub>i</sub> составляет 742-1549 МПа, в области Z2 (КТ 97-116) 860-1668 МПа и в области Z3 (КТ 117-137) 938-1527 МПа. Эти значения интенсивности напряжений несколько меньше аналогичного показателя, характерного для слоя межзеренной фазы, примыкающего к зернам.

При увеличении силовой нагрузки максимальные напряжения в области зерна Z1 уменьшаются на 8 %, минимальные — на 73 %; максимальные напряжения в области зерна Z2 уменьшаются на 27 %, минимальные — на 48 %; максимальные напряжения в области зерна Z3 уменьшаются только на 23 %, минимальные — на 32 %.

Анализ коэффициентов неоднородности показал, что его значения изменяются в диапазоне от 1,2 до 1,95, что свидетельствует о достаточно стабильном характере напряжений в этом слое, особенно в области Z2.

Характер изменения  $\sigma_i$  в слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе, под одновременным действием силовой и тепловой нагрузок показан на рис. 5. Видно, что все кривые имеют однотипный вид с резкими изменениями  $\sigma_i$ , причем наибольшие напряжения формируются в крайних точках этого слоя. Увеличение силовой нагрузки при постоянных значениях тепло-

#### Библиографический список

1. Бардзокас, Д. И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д. И. Бардзокас, А. И. Зобнин. — М. : Машиностроение, 2003. — 376 с.

2. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87, 88.

3. **Овчинский**, **А.** С. Процессы разрушения композиционных материалов. Имитация микро- и макромеха-

вых потоков, причем так же, как в предыдущих случаях, приводит к уменьшению интенсивности напряжений во всех КТ межзеренной фазы. Интенсивность напряжения σ<sub>i</sub> в поверхностном слое матрицы под действием силового комплекса № 1 изменяется от 398 до 2011 МПа, под действием комплекса № 2 — от 272 до 1954 МПа и под действием комплекса № 3 — от 159 до 1841 МПа. Наибольшая интенсивность напряжений зафисирована в КТ183, КТ185, КТ219 и КТ221, которые контактируют с поверхностью детали Д2.

Напряженно-деформированное состояние слоя матрицы керамики системы ZrO<sub>2</sub>-MgO-ZrO<sub>2</sub>-Cu, примыкающего к межзеренной матрице, характеризуется наибольшими значениями коэффициента неоднородности (K<sub>Δ</sub> равно 5,0, 7,2 и 11,6) под действием силовых комплексов № 1-3. Столь высокие значения этого коэффициента значительно превосходят величины этого параметра для слоев зерен и межзеренной фазы и связаны главным образом с экстремальными напряжениями в KT183 и KT221.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты численных экспериментов, можно отметить, что в результате совместного действия силовых и тепловых нагрузок формируется крайне сложное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония. Наибольшие значения интенсивности напряжений о<sub>i</sub> и коэффициента неоднородности напряжений  $K_{\Lambda}$  зафиксированы в слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе. Увеличение распределенной силовой нагрузки при постоянных тепловых потоках приводит к уменьшению интенсивности напряжений о<sub>i</sub> и увеличению коэффициента неоднородности напряжений  $K_{\Delta}$  в поверхностных слоях всех структурных элементов керамики, причем эти зависимости имеют нелинейный характер. В этой связи рекомендовано при описании механизма износа и разрушения керамических изделий, а также при их проектировании учитывать не только напряжения, формирующиеся в поверхностном слое под действием внешней нагрузки, но и их неоднородность.

низмов на ЭВМ / *А. С. Овчинский.* — М. : Наука, 1988. — 277 с.

4. **Кузин, В. В.** Инструменты с керамическими режущими пластинами / *В. В. Кузин.* — М. : Янус-К, 2006. — 160 с.

5. **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. 6. **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.

7. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть З. Влияние распределенной силовой нагрузки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42-46.

8. *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.

9. **Григорьев, С. Н.** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

10. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80. 11. **Кузин, В. В.** Влияние свойств обрабатываемого материала на напряженно-деформированное состояние керамических инструментов / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров // Вестник машиностроения. — 2012. — № 7. — С. 72–77.

12. **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.

13. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия ТіС на напряженнодеформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

14. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

15. **Кузин, В. В.** Модель эксплуатации волоки при изготовлении проволоки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2013. — № 2. — С. 24–28. ■

Получено 18.11.13 © В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин, 2014 г.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

