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 1. ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Приведены первичные результаты комплексного изучения неоднородности напряжений в поверхностном слое керамики. Исследовано напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония под действием сложного механического нагружения. 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.

Улучшение эксплуатационных характеристик керамических деталей возможно на основе глубокого изучения процессов, происходящих в поверхностном слое [1–3]. Особую важность имеет определение закономерностей деформирования неоднородной среды, находящейся под действием внешних нагрузок [4, 5]. Однако такие исследования значительно осложнены необходимостью учета границ между взаимодействующими структурными элементами керамики, имеющими разные свойства [6, 7].

Анализ напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородных тел позволяет определить особенности их разрушения и сформировать эффективные рекомендации по снижению интенсивности процесса [8, 9]. Один из актуальных аспектов анализа — исследование локальных напряжений на границах взаимодействующих структурных элементов неоднородного материала и оценка объемного распределения напряжений в поверхностном слое детали из такого материала при разных внешних воздействиях [10, 11]. Решение такой сложной задачи позволит реализовать идею компьютерного проектирования структурно-неоднородных материалов [12]. Этот подход также может быть использован для автоматизации процесса поиска оптимальных составов спеченных материалов для изготовления инновационных изделий, предназначенных для определенных условий эксплуатации.

Цель настоящей работы — оценить неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики из диоксида циркония под действием сложного механического нагружения. Влияние теплового и комбинированного нагружения также изучили; результаты этих исследований будут приведены в последующих статьях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение сформулированной задачи базировалось на численном моделировании деформационных процессов с использованием методологии управления эксплуатационными характеристиками керамического изделия [5, 9] и комплекса моделей [2, 6]. На их основе сформировали расчетную схему для выполнения численных экспериментов в модуле Simulation программного комплекса SolidWorks (рис. 1).

Расчетная схема представлена в виде конструкции размером 38×18×4 мкм, состоящей из фрагментов деталей Д1 и Д2, выполненных из



Рис. 1. Расчетная схема

керамики и меди соответственно. Эти детали находятся в плотном контакте, причем форма границы раздела учитывает реальную микрогеометрию керамической детали, сформировавшуюся после спекания или механической обработки. Фрагмент детали Д1 состоит из трех зерен Z1, Z2 и Z3 эллипсной формы и размерами *a* = 5 мкм и b = 4 мкм, которые заделаны в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 1$ мкм. Большая ось зерна Z2 совпадает с осью x, а большие оси зерен Z2 и Z3 расположены под углом $\alpha = 15^{\circ}$ к оси х, причем расстояние между центрами соседних зерен составляет 11 мкм. Переходы межзеренной фазы на границах зерен имеют радиусы сопряжения кривых $R_1 = R_2 = 1$ мкм и $R_3 = R_4 = 4$ мкм. На внешней стороне зерен, межзеренной фазы и матрицы расположен фрагмент детали Д2 толщиной $\Delta_f = 2$ мкм. Зерна и матрица детали П1 выполнены из диоксида циркония ZrO_2 (плотность $\rho = 5,68$ г/см³, модуль упругости E = 180 ГПа, коэффициент Пуассона µ = 0,2); межзеренная фаза — из оксида магния MgO (ρ = 3,4 г/см³, E = 315 ГПа, μ = 0,18) и деталь Д2 — из меди Cu (ρ = 8,9 г/см³, E = 110 ГПа, µ = 0,37). В дальнейшем эту конструкцию будем называть «керамика системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu».

К свободной поверхности детали Д2 в расчетной схеме прикладывали два вида сил (см. рис. 1): распределенные силы P_1 , P_2 , P_3 и P_4 прикладывали на всей длине контакта; сосредоточенную силу F — на участке контакта с зерном Z2, причем эта сила действовала по направлению к центру зерна. Определенное сочетание этих нагрузок считали силовым комплексом, каждый из которых характеризуется значениями нагрузок, приведенных в таблице.

Для анализа результатов численных экспериментов использовали метод контрольных точек (КТ), под которыми понимали фиксированные конечные элементы конструкции. Число и расположение КТ определяли с учетом цели настоящего исследования. Схематичное расположение и нумерация КТ, а также фрагмент реальной сетки конечных элементов показаны на рис. 2. Все выбранные КТ в детали Д1 расположены 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 поверхностном слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе (КТ183–КТ221). Напряжения в детали Д1 не изучали и КТ в этом структурном элементе не выделяли. После выполнения расчетов получали значения интенсивности напряжений о_i в каждой КТ.

Результаты расчетов представляли в виде графического отображения поля интенсивности напряжений и графиков, связывающих численные значения интенсивности напряжений в КТ. Для количественной оценки неоднородности напряжений в поверхностном слое рабочего канала керамической волоки использовали коэффициент неоднородности напряжений К_Δ — безразмерный показатель, определяющий уровень изменения напряжений в поверхностном слое структурного элемента керамики и численно выражаемый отношением наибольшего значения интенсивности напряжений к наименьшему значению. Анализировали значения K_{Δ} в поверхностном слое каждого зерна, слоях межзеренной фазы, примыкающих к зернам и к матрице, и в слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе. Использование этой методики позволило детально исследовать влияние комплекса силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние керамических инструментов с учетом структуры материала и дополнить знания, полученные в работах [13, 14].

	цагру		CHROPLIN	KOMBBEKCAN	н
сочетание	Haipy	зки в	силовых	KOMIIJIEKCax	, п

Нагрузка	Номер силового комплекса					
	1	2	3			
F	0,01	0,02	0,04			
$P_1 = P_4$	0,05	0,01	0,02			
$P_2 = P_3$	0,01	0,02	0,04			



Рис. 2. Расположение КТ в поверхностном слое детали Д1 из керамики системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu



Рис. 3. Схема напряженно-деформированного состояния структурных элементов керамики системы ZrO₂--MgO-ZrO₂--Cu под действием силового комплекса № 1

48



Рис. 4. Влияние комплексной силовой нагрузки на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностного слоя зерен Z1 (a), Z2 (б) и Z3 (в) в керамике системы ZrO₂--MgO-ZrO₂-Cu. Номера силовых комплексов указаны на кривых

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. З приведен пример графического отображения поля интенсивности напряжений в поверхностном слое керамики системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu под действием сложного механического нагружения. Качественная оценка поля напряжений показывает, что напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя этой керамики в различных областях значительно различается. Значения интенсивности напряжений о_i в структурных элементах керамики системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu под действием силового комплекса № 1 (см. табл. 1) изменяются от 42 до 1600 МПа. Наибольшие напряжения возникают в центральном зерне Z2 и в межзеренной фазе и матрице около него.

Для составления более детальной картины влияния силовых нагрузок на напряженнодеформированное состояние поверхностного слоя проанализируем результаты расчетов интенсивности напряжений в каждом структурном элементе керамики системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu.

На рис. 4 показано напряженнодеформированное состояние трех зерен под действием разных силовых комплексов. Характер изменения локальных напряжений в поверхностном слое зерна Z1 под действием комплексной силовой нагрузки имеет достаточно простой вид (см. рис. 4, *a*). Зафиксировано постепенное увеличение интенсивности напряжений σ_i от КТ1 до КТ18, а далее от КТ18 до КТ25 выявлено уменьшение σ_i , т. е. наибольшие напряжения σ_i формируются в КТ18.

Увеличение силовой нагрузки приводит к существенному повышению интенсивности напряжений σ_i во всех КТ поверхностного слоя зерна Z1. Например, под действием силового комплекса № 1 диапазон изменения интенсивности напряжений σ_i составляет 82–256 МПа, при нагрузке № 2 — 164–512 МПа и при нагрузке № 3 — 329–1024 МПа. Напряженное состояние поверхностного слоя зерна Z1 характеризуется коэффициентом неоднородности $K_{\Delta Z1}$ = 3,12.

Характер изменения локальных напряжений в поверхностном слое зерна Z2 под действием комплексных силовых нагрузок иной, имеет более сложный вид (см. рис. 4, б). На участке от КТ26 до КТ31 выявлено уменьшение σ_i . На участке от КТ31 до КТ38 наблюдается незначительное увеличение напряжений и затем на участке от КТЗ8 до КТ46 зафиксировано уменьшение напряжений. На участке от КТ46 до КТ51 происходит резкое увеличение локальных напряжений. Наибольшие значения о; зафиксированы в КТ51. их значения составляют 1125, 2250 и 4500 МПа под действием силовых комплексов № 1-3 соответственно. Видно, что наибольшие локальные напряжения в зерне Z2 формируются в КТ26 и КТ51, которые наиболее близко расположены к месту приложения сосредоточенной силы F_i. Анализ полученных зависимостей показал, что $K_{\Delta Z2}$ в поверхностном слое зерна Z2 равен 4,83, что значительно выше по сравнению со значением в первом случае.

Изменение напряжений в поверхностном слое зерна Z3 под действием комплексной нагрузки показано на рис. 4, в. Видно, что кривые практически «зеркально» отражают зависимости, характерные для зерна Z1, наибольшее значение о_i зафиксировано в КТ59. При силовой нагрузке № 1 диапазон изменения о_i составляет 79–245 МПа, при нагрузке № 2 — 159–491 МПа и при нагрузке № 3 — 319–982 МПа. Напряженное состояние поверхностного слоя зерна Z3 характеризуется K_{ΔZ3} = 3,1.

Влияние комплексной силовой нагрузки на локальные напряжения в слоях межзеренной фазы, примыкающих к зернам и матрице, пока-

49



Рис. 5. Влияние комплексной силовой нагрузки на интенсивность напряжений о_i в КТ поверхностного слоя межзеренной фазы, примыкающего к зернам (*a*) и матрице (*б*), в керамике системы ZrO₂-MgO-ZrO₂-Cu. Номера силовых комплексов указаны на кривых

зано на рис. 5. Установлено, что характер изменения σ_i в слое межзеренной фазы под действием комплексной силовой нагрузки имеет сложный вид с резкими изменениями значений напряжения, причем кривые практически симметричны относительно центрального зерна Z2. Диапазон изменения σ_i в слоях межзеренной фазы, примыкающих к зернам и матрице, практически одинаков и под действием силового комплекса № 1 составляет 110-424 МПа, № 2 — 221-848 МПа и № 3 — 443-1697 МПа.

Средние значения коэффициента неоднородности напряжений $K_{\Delta M \Phi 1}$ и $K_{\Delta M \Phi 2}$ в слоях межзеренной фазы, прилегающих к зернам и матрице, составляют 3,85 и 3,62 соответственно. Обращает на себя внимание крайне нестабильное изменение напряжений в слое межзеренной фазы, примыкающем к зерну Z2. Однако на участке от КТ99 до КТ115 (см. рис. 5, *a*) $K_{\Delta M \Phi 1} = 1,6$, что практически в 3 раза ниже среднего значения этого коэффициента, рассчитанного для всей поверхности. Очевидно, для оценки нестабильности необходимо использовать коэффициент, способный учесть присутствие структурных концентраторов напряжения.

Характер изменения σ_i в слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе, под действием слож-



Рис. 6. Влияние комплексной силовой нагрузки на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностного слоя матрицы, примыкающего к межзеренной фазе керамики системы ZrO_2 -MgO- ZrO_2 -Cu. Номера силовых комплексов указаны на кривых

ного механического нагружения представлен на рис. 6. Все кривые имеют симметрию относительно КТ202. Значения σ_i в поверхностном слое матрицы под действием силового комплекса № 1 изменяются от 73 до 334 МПа, комплекса № 2 — от 146 до 668 МПа и комплекса № 3 — от 293 до 1337 МПа. Наибольшие напряжения формируются в поверхностном слое матрицы в области зерна *Z*2, на которую оказывает наибольшее влияние сосредоточенная сила *F_i*. Напряженное состояние поверхностного слоя матрицы характеризуется *K*_{ΔM} = 4,6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты численных экспериможно отметить, ментов ЧТО напряженнодеформированное состояние поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония под действием сложного механического нагружения характеризуется высокой неоднородностью. Наибольшие локальные напряжения под действием комплексной силовой нагрузки формируются в зерне Z2 и межзеренной фазе вокруг него, что определяется действием сосредоточенной силы. Коэффициент неоднородности К_{ЛZ} напряжений в поверхностном слое зерен Z1, Z2 и Z3 равен 3,12, 4,83 и 3,1 соответственно. Коэффициент неоднородности напряжений в слоях межзеренной фазы. прилегающих к зернам и матрице, составляет 3,85 и 3,62 соответственно. Напряженное состояние поверхностного слоя матрицы, примыкающего к межзеренной матрице, характеризуется $K_{\Lambda M} = 4,6$.

Результаты настоящего исследования свидетельствуют также о необходимости учета неоднородности напряжений, формирующихся в поверхностном слое изделий из керамики на основе диоксида циркония под действием сложного механического нагружения, при описании механизма их износа и разрушения, а также при проектировании изделий для заданных условий эксплуатации.

50

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бакунов, В. С.** Прочность и структура керамики / В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 3. — С. 11-15.

2. **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.

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. — 2011. — Vol. 51, \mathbb{N} 6. — P. 421–426.

4. **Вильдеман, В. Э.** Эволюция структурных повреждений и макроразрушение неоднородной среды на закритической стадии деформирования / *В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. В. Зайцев* // Механика композитных материалов. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 329-339.

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

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

7. *Гнесин, Г. Г.* Основные направления исследований и разработок неоксидных керамических

материалов / Г. Г. Гнесин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2000. — № 5. — С. 2–7.

8. **Соколкин, Ю. В.** Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. — М. : Наука, 1984. — 115 с.

9. **Григорьев, С. Н.** Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / С. Н. *Григорьев, В. В. Кузин* // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17-22.

10. **Шермергор, Т.** Д. Теория упругости микронеоднородных сред / *Т.* Д. Шермергор. — М. : Наука, 1977. — 400 с.

11. **Ванин, Г. А.** Микромеханика композиционных материалов / *Г. А. Ванин.* — Киев : Наукова думка, 1985. — 301 с.

12. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материал ов. В 2 т. Т. 2 / под ред. В. Е. Панина [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1995. — 320 с.

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.

14. **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.

> Получено 27.06.13 © В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин, 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Metal + Metallurgy China 2014 — Международная METAL + METALLURGY выставка по литью, металлообработке и промышленным **CHINA 2014** печам и международная выставка металлургической 19–22 мая 2014 г. • г. Пекин, Китай промышленности Тематика: - оборудование для производства чугуна и стали - плавильное и литейное оборудование - формовочные смеси, формовочные машины - оборудование и технологии для литейного производства, различные виды литья - печи для плавки и термообработки - различные типы промышленных печей для плавки и термообработки, сушилки - материалы для изготовления печей http://expo-asia.ru/