

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 666.3:546.28'171]:621.914.22

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ Al_2O_3 –TiC-КЕРАМИКИ. КОМБИНИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ

Определены основные закономерности напряженного состояния поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки. Выявлено, что силовая нагрузка компенсирует тепловые упругие деформации, но усложняет при этом напряженное состояние по сравнению с действием нагрузок одного вида. Определена роль сочетания структурных элементов, образовавших поверхность Al_2O_3 –TiC-керамики, в формировании неблагоприятных микроструктурных концентраторов напряжений.

Ключевые слова: компьютерная инженерия, Al_2O_3 –TiC-керамика, поверхностный слой, тепловой поток, силовая нагрузка, напряженное состояние, интенсивность напряжений, концентратор напряжений, эксплуатационный дефект.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением работ [1, 2], в которых выполнен силовой [1] и тепловой [2] анализ напряженного состояния поверхностного слоя (ПС) шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики под действием нагрузок соответствующего вида. Между тем рабочие поверхности керамических инструментов и деталей при эксплуатации загружены сложным комплексом сосредоточенных распределенных сил и тепловых потоков [3–7]. Комбинированная нагрузка значительно усложняет напряженно-деформированное состояние ПС керамики [8, 9] и изменяет характер разрушения материалов со сложной структурой [10]. Это определяет актуальность выявления основных закономерностей формирования напряженного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки [11]. Представляют научный интерес также взаимное влияние разных нагрузок в процессе упругой деформации структурно-неоднородного материала и проблема разрушения керамики при изготовлении и эксплуатации инструментов и деталей.

В настоящей работе поставлена задача — выявить основные закономерности напряженного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики

в условиях действия комбинированной (силовой и тепловой) нагрузки.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При решении поставленной задачи использовали расчетную схему № 1 и автоматизированную систему термочисленных расчетов KS-SL v.1.0 [12]. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в структурных элементах, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики четырех систем: система № 1 — Al_2O_3 (зерно)–MgO (межзеренная фаза)– Al_2O_3 (матрица)/ Al_2O_3 (слой); система № 2 — Al_2O_3 –MgO– Al_2O_3 /TiC; система № 3 — TiC–MgO– Al_2O_3 /TiC; система № 4 — TiC–MgO– Al_2O_3 /TiC. На ПС действовали сосредоточенная сила $F = 0,02$ Н, приложенная под углом $\beta = 45^\circ$, распределенная силовая нагрузка $P = 5 \cdot 10^8$ Па и тепловой поток $Q = 9 \cdot 10^8$ Вт/м²; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $h = 1 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град). По результатам расчетов определяли следующие статистические характеристики для σ_i в КТ каждой поверхности: наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение s для σ_i . Статистический анализ данных выполняли с использованием программного комплекса Statistica.

Для сравнительной оценки интенсивности напряжений σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [13]. Выделенные КТ располагались в поверхности: зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C1); межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

С2); межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхность С3); матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность С4); зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к пластически деформированному слою (поверхность С5); слоя, примыкающей к зерну, межзеренной фазе и матрице (поверхность С6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Под действием комбинированной нагрузки происходит упругая деформация ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики всех систем по схеме выдавливания с локальным продавливанием в месте приложения сосредоточенной силы (рис. 1). Видно, что направление перемещения точки 0 (точка приложения сосредоточенной силы), расположенной на исходном контуре, в точку 01 (показано стрелкой) совпадает с траекторией действия сосредоточенной силы. Эта сила ограничивает также горизонтальные u и вертикальные v перемещения точки 0, из чего соседние точки имеют большие значения u и v , чем точка 0.

Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются, причем наибольшему выдавливанию подвержен ПС керамики систем № 2 и 4 со слоем TiC на поверхности (рис. 1, б и г), наименьшему — ПС керамики системы № 1 (рис. 1, а). Промежуточное значение по значениям u и v занимает ПС керамики системы № 3 (рис. 1, в).

Несмотря на общую схему деформации ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики для всех систем, зафиксирована специфика в упругой деформации ПС керамики системы № 1. Эта особенность заключается в растяжении поверх-

ности зерна, примыкающей к слою Al_2O_3 , в непосредственной близости от точки 0 (см. рис. 1, а). Видно, что на стабильно деформированном зерне образовалась локальная область А, резко отличающаяся от правильной геометрической формы сетки конечных элементов.

Поля σ_i в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики разных систем под действием комбинированной нагрузки показаны на рис. 2. Анализ этих полей позволяет отметить две особенности: первая — наибольшие σ_i фиксируются в слоях Al_2O_3 и TiC, вторая — поле σ_i в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики системы № 1 (рис. 2, а) отличается от полей σ_i в ПС керамики систем № 2, 3 и 4 более сложным напряженным состоянием зерна и высокими значениями σ_i . Эта особенность связана со спецификой упругой деформации ПС керамики системы № 1.

Характер изменения σ_i в разных поверхностях шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики четырех систем под действием комбинированной нагрузки весьма разнообразен (рис. 3). Видно, что форма кривой для системы № 1 на всех графиках значительно или принципиально (в зависимости от поверхности) отличается от других кривых. Детально проанализируем характер изменения σ_i во всех поверхностях структурных элементов, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики четырех систем под действием комбинированной нагрузки.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С1 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, а. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют однотипную сглаженную форму с наибольшими σ_i в КТ2, а форма кривой для системы № 1 принципиально отличается от других на участках КТ1–КТ7 и КТ13–КТ18. В поверхности С1 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 212 ($\sigma_{\min}$) до 2068 МПа ($\sigma_{\max}$) при $\sigma_{\text{ср}} = 770,6$ МПа и $s = 417,2$; системы № 2 — от 352 до 739 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 508,8$ МПа и $s = 122,5$; системы № 3 — от 426 до 773 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 570,7$ МПа и $s = 95,4$; системы № 4 — от 434 до 746 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 551,2$ МПа и $s = 93,6$. Статистические характеристики σ_i в поверхности С1 керамики разных систем показывают, что наибольшими $\sigma_{\text{ср}}$ и s характеризуется система № 1, наименьшими $\sigma_{\text{ср}}$ — система № 2, наименьшими s — система № 3. Система № 4 имеет промежуточные значения $\sigma_{\text{ср}}$ и s .

Коэффициенты корреляции, значимые на уровне 0,05, для σ_i разных систем свидетельствуют о разной степени связи между ними. Коэффициент корреляции для σ_i системы № 1 по отношению к трем другим системам характеризуется наименьшими значениями (0,59, 0,66 и 0,67 систем № 2, 3 и 4 соответственно). В наибольшей степени коррелируют σ_i системы № 4 с σ_i систем № 2 и 3 с коэффициентами 0,94 и 0,97 соответственно.

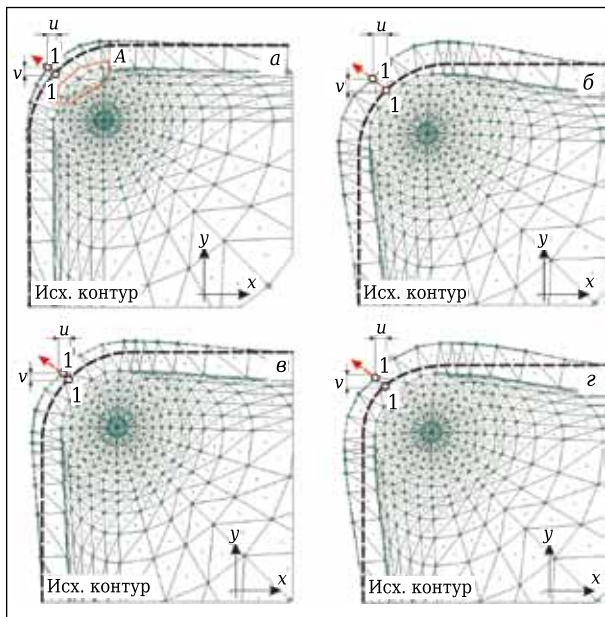


Рис. 1. Схема деформации ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики систем № 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) под действием комбинированной нагрузки

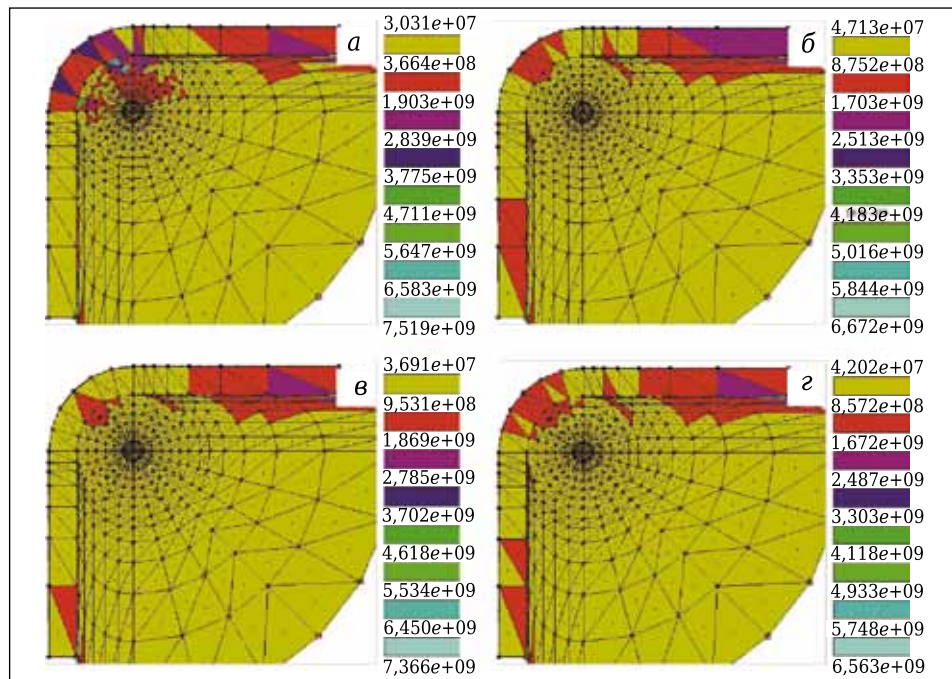


Рис. 2. Поля σ_i в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики систем № 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (з) под действием комбинированной нагрузки

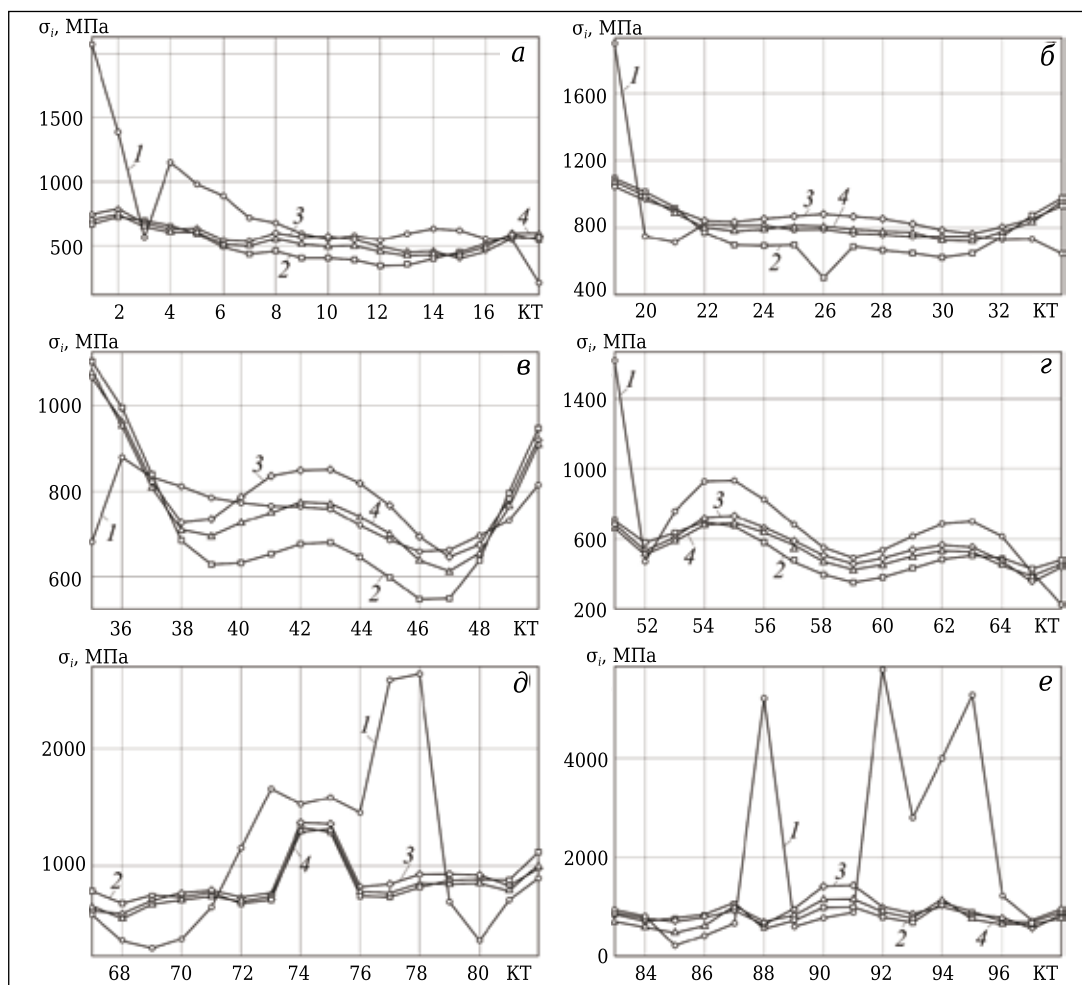


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (з), C5 (д) и C6 (е) керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С2 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, б. Кривые для систем № 3 и 4 имеют однотипную сглаженную форму; в КТ26 зафиксированы наибольшие σ_i , в КТ30 — наименьшие. Кривая для системы № 2 отличается от кривых для систем № 3 и 4 формой на участке КТ25–КТ27 за счет резкого уменьшения σ_i . Кривая для системы № 1 отличается от других кривых формой на участках КТ19–КТ22 и КТ32–КТ34, причем на этих участках (кроме КТ19) зафиксированы меньшие значения σ_i по сравнению с другими системами.

В поверхности С2 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 643 до 1900 МПа при $\sigma_{ср} = 828,1$ МПа и $s = 289,3$; системы № 2 — от 501 до 1088 МПа при $\sigma_{ср} = 761,8$ МПа и $s = 161$; системы № 3 — от 757 до 1057 МПа при $\sigma_{ср} = 865$ МПа и $s = 76,1$; системы № 4 — от 723 до 1073 МПа при $\sigma_{ср} = 829,2$ МПа и $s = 97,5$. Наибольшие $\sigma_{ср}$ имеет система № 3, наибольшие s — система № 1, наименьшие $\sigma_{ср}$ — система № 2, наименьшие s — система № 3. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь систем № 4 с системами № 2 и 3 (коэффициенты 0,91 и 0,95 соответственно), наименьшим коэффициентом (0,47) — связь систем № 1 и 2.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, в. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют сглаженную форму, два максимума в КТ35 и КТ50 и один минимум в КТ47. Кривая для системы № 1 имеет максимум в КТ36 и минимум в КТ47. В поверхности С3 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 658 до 881 МПа при $\sigma_{ср} = 751,2$ МПа и $s = 65,3$; системы № 2 — от 547 до 1102 МПа при $\sigma_{ср} = 724,8$ МПа и $s = 163,3$; системы № 3 — от 648 до 1071 МПа при $\sigma_{ср} = 808,5$ МПа и $s = 109,3$; системы № 4 — от 612 до 1076 МПа при $\sigma_{ср} = 767,2$ МПа и $s = 122$. Наименьшие $\sigma_{ср}$ имеет система № 2, наименьшие s — система № 1, наибольшие $\sigma_{ср}$ — система № 3, наибольшие s — система № 2. Связь системы № 4 с системами № 2 и 3 характеризуется наибольшими коэффициентами (0,96 и 0,97 для σ_i систем № 2 и 3 соответственно) корреляции, значимыми на уровне 0,05. Наименьший коэффициент корреляции (0,35) для σ_i определяет связь систем № 1 и 2.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, г. Все кривые характеризуются однотипной формой на участке КТ52–КТ65 двумя максимумами в КТ55 и КТ63 и одним минимумом в КТ59. Кривая для системы № 1 на центральном участке имеет более рельефную форму, чем другие кривые. Эта кривая имеет также еще одну особенность: значение σ_i в периферийной КТ51 более чем в 2 раза больше, чем значения σ_i других систем.

В поверхности С4 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 228 до 1620 МПа при $\sigma_{ср} = 690,9$ МПа и $s = 309,3$; системы № 2 — от 351 до 697 МПа при $\sigma_{ср} = 516,8$ МПа и $s = 111,8$; системы № 3 — от 357 до 729 МПа при $\sigma_{ср} = 555,9$ МПа и $s = 105,4$; системы № 4 — от 374 до 694 МПа при $\sigma_{ср} = 533,6$ МПа и $s = 97$. Наибольшие $\sigma_{ср}$ имеет система № 1, наименьшие $\sigma_{ср}$ — система № 4, наибольшие s — система № 3, наименьшие s — система № 1. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь систем № 3 и 4, наименьшим (0,71) — связь систем № 1 и 2.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, д. Видно, что форма кривой для системы № 1 принципиально отличается от одинаковой формы других кривых, имеющих резкий пик между КТ73 и КТ76 на достаточно стабильном фоне изменения σ_i в этой поверхности. Кривая для системы № 1 свидетельствует о высокой неоднородности изменения σ_i в поверхности С5: на периферийных участках σ_i уменьшается, а в ее центральной части многократно увеличивается, что свидетельствует о формировании мощного микроструктурного концентратора напряжений.

В поверхности С5 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 293 до 2630 МПа при $\sigma_{ср} = 1091,4$ МПа и $s = 753,9$; системы № 2 — от 672 до 1306 МПа при $\sigma_{ср} = 853,3$ МПа и $s = 204,5$; системы № 3 — от 568 до 1368 МПа при $\sigma_{ср} = 864,5$ МПа и $s = 223,1$; системы № 4 — от 552 до 1297 МПа при $\sigma_{ср} = 821,9$ МПа и $s = 210,7$. Наибольшими $\sigma_{ср}$ и s характеризуется система № 1, наименьшим $\sigma_{ср}$ — система № 4, наименьшим s — система № 2. Наибольший коэффициент корреляции (0,99), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 3 и 4, наименьший (0,18) — связь систем № 1 и 2.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3, е. Видно, что форма кривых для систем № 2–4 является практически одинаковой, а форма кривой и значения σ_i системы № 1 существенно отличаются присутствием трех выраженных пиков. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 236 до 5800 МПа при $\sigma_{ср} = 1944,3$ МПа и $s = 1980,8$; системы № 2 — от 523 до 1096 МПа при $\sigma_{ср} = 782,7$ МПа и $s = 176,5$; системы № 3 — от 502 до 1440 МПа при $\sigma_{ср} = 859,4$ МПа и $s = 271,7$; системы № 4 — от 492 до 1174 МПа при $\sigma_{ср} = 814,8$ МПа и $s = 212,2$. Наибольшие $\sigma_{ср}$ и s имеет система № 1, наименьшие $\sigma_{ср}$ и s — система № 2. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,96), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь системы № 4 с системами № 2 и 3, наименьшим (0,04) — связь систем № 1 и 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Под совместным действием силовых и тепловых нагрузок ПС Al_2O_3 -TiC-керамики всех систем деформируются по однотипной схеме выдавливания с локальным продавливанием в точке приложения сосредоточенной силы. Превалирующую роль теплового фактора в упругой деформации ПС керамики компенсируют силовые нагрузки, причем распределенная сила объемно и равномерно уменьшает степень «тепловой» деформации [2], а сосредоточенная сила — локально. Процесс сдерживания упругого выдавливания зависит от совокупности структурных элементов, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики.

Сосредоточенная сила оказывает специфическое влияние на деформацию ПС керамики системы № 1; под ее действием в поверхности зерна, примыкающей к слою Al_2O_3 , формируется локальная область растяжения в непосредственной близости от точки приложения сосредоточенной силы. Образование этой области определяет существенное отличие напряженного состояния ПС Al_2O_3 -TiC-керамики системы № 1 от напряженного состояния ПС керамики других систем.

Выявленные особенности в полной мере проявляются на графиках изменения σ_i в поверхностях C1–C6, причем в наибольшей степени эти особенности проявляются в поверхностях зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к пластически деформированному слою (поверхности C5), и в поверхности слоя, примыкающей к зерну, межзеренной фазе и матрице (поверхности C6) (см. рис. 3, д, е). Например, в поверхности C5 наибольшие σ_i (2630 МПа) и s (753,9) зафиксированы в системе № 1, наименьшие σ_i (1297 МПа) — в системе № 4 и наименьшие s (204,5) — в системе № 2; разница в σ_i и s составляет более 2 и 3,6 раза соответственно. В поверхности C6 наибольшие σ_i (5800 МПа) и s (1980,8) зафиксированы в системе № 1, наименьшие σ_i (1096 МПа) и s (176,5) — в системе № 2; разница в σ_i и s составляет более 5,2 и 11,2 раза соответственно.

По характеру изменения σ_i в разных поверхностях выделяется также система № 1; например, в поверхностях C1, C2, C4, C5 и C6 этой системы формируются выраженные микроструктурные концентраторы напряжений. В первых трех поверхностях (C1, C2 и C4) они формируются на периферийных участках, в двух последних — в центральной части. Эти концентраторы напряжений в совокупности с экстремально высокими локальными напряжениями приводят к образованию структурных дефектов на границе зерна Al_2O_3 – слой Al_2O_3 , последующему зарождению и росту трещин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием основных положений компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики, автоматизированной системы термочастотных расчетов KS-SL v.1.0 и метода контрольных точек выявлены основные закономерности изменения интенсивности напряжений в структурных элементах Al_2O_3 -TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки. Результаты комбинированного анализа напряженного состояния ПС шлифованной керамики значительно расширили знания о термомеханических процессах в слое толщиной несколько микрометров, имеющем сложную структуру, а также позволили прогнозировать возможное поведение керамических инструментов и деталей при эксплуатации.

Установлено, что в результате совместного действия силовых и тепловых нагрузок формируется сложное напряженно-деформированное состояние ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики, на которое значительное влияние оказывает сочетание ее структурных элементов (систем). При выбранном комплексе нагрузок главную роль в характере упругой деформации имеет тепловой поток, под действием которого происходит выдавливание ПС керамики. Распределенная сила снижает степень «тепловой» деформации, равномерно уменьшая объем выдавленного материала, а сосредоточенная сила оказывает локальное влияние, продавливая ПС в зоне ее приложения.

Выявленные микроструктурные концентраторы напряжений в поверхностях C1, C2, C4, C5 и C6 системы № 1 в совокупности с экстремально высокими локальными напряжениями приводят к образованию эксплуатационных дефектов на границе зерна Al_2O_3 – слой Al_2O_3 , зарождению и росту трещин. В этой связи при описании механизма износа и разрушения керамических изделий рекомендуется учитывать не только напряжения, формирующиеся в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки, но и присутствие микроструктурных концентраторов напряжений.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

Библиографический список

1. Кузин, В. В. Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Силовой анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 7. — С. 67–71.
2. Кузин, В. В. Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-

керамики после шлифования. Тепловой анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 8. — С. 53–58.

3. **Cheng, Moli.** Mechanical properties of two types of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ceramic cutting tool material at room and elevated temperatures / Moli Cheng, Hanlian Liu, Bin Zhao [et al.] // Ceram. Int. — 2017. — Vol. 43, № 16. — P. 13869–13874.

4. **Kuzin, V. V.** The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools: Part 1. Macrolevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, and M. A. Volosova // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.

Кузин, В. В. Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Трение и износ. — 2014. — № 6. — С. 728–734.

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

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.

6. **Zhao, Jun.** Cutting performance and failure mechanisms of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC}/\text{TiC}$ micro-nano-composite ceramic tool / Jun Zhao, Xunliang Yuan, Yonghui Zhou // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2010. — Vol. 28, № 3. — P. 330–337.

7. **Grigoriev, S. N.** Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

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.

8. **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 // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 40–44.

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.

9. **Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 5. A combined load operates / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 197–200.

Волосова, М. А. Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 5. Действует комбинированная нагрузка / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 49–53.

10. **Овчинский, А. С.** Процессы разрушения композиционных материалов. Имитация микро- и макромеханизмов на ЭВМ / А. С. Овчинский. — М.: Наука, 1988. — 277 с.

11. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 1 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61. — P. 94–99.

Кузин, В. В. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 2. — С. 39–45.

12. **Кузин, В. В.** Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 6. — С. 64–69.

13. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 30.08.20

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**ICSOBA 2020 — 38-я Международная конференция и выставка
Международного комитета по изучению бокситов, глинозема и алюминия**

12–16 октября 2020 г.

г. Цзинань, Китай

<https://icsoba.org/>