

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. ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

Установлены закономерности теплового и напряженного состояния поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием тепловой нагрузки. Выявлено, что роль теплового фактора в механизме разрушения этого слоя проявляется в формировании неблагоприятных микроструктурных концентраторов напряжений.

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

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением статьи [1]. Проблема непрогнозируемого разрушения керамических деталей при высокотемпературной эксплуатации может быть решена на основе системного анализа роли большого числа уже выявленных и еще не установленных факторов, определяющих специфику их напряженно-деформированного состояния [2–4]. Наиболее сложная и неоднозначная роль в этой совокупности принадлежит тепловому фактору [5, 6]. С одной стороны, высокая теплоустойчивость керамики позволяет эксплуатировать керамические изделия при экстремальных температурах [7–9], с другой — сложная архитектура поверхностного слоя (ПС) изготовленной керамической детали и неблагоприятное сочетание структурных элементов керамики, его создавших, приводят к формированию высоких локальных напряжений, определяющих неудовлетворительную термостойкость [10–12]. Это существенно ограничивает область применения керамических деталей и определяет необходимость совершенствования технологии их изготовления.

Результаты исследований теплового и напряженного состояния Al_2O_3 -TiC-керамики без учета реального состояния ПС после изготовле-

ния детали приведены в публикациях [13–17]. Однако сложная архитектура ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики влияет на его термомеханическое состояние и поведение детали при высокотемпературной эксплуатации. Степень этого влияния до настоящего времени не выявлена, что не позволяет сформулировать научно обоснованные требования к состоянию ПС изготовленной керамической детали. Поэтому выявление роли тепловой нагрузки в формировании теплового и напряженного состояния локальных объемов структурных элементов в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики с использованием основных положений компьютерной инженерии является актуальной научной задачей, имеющей важное прикладное значение [18–21].

В работе поставлена задача — с использованием базовых положений компьютерной инженерии изучить тепловое и напряженное состояние ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием тепловой нагрузки.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При решении поставленной задачи использовали расчетную схему № 1 и автоматизированную систему термомеханических расчетов KS-SL v.1.0 [22]. Исследовали характер изменения температуры T и 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 / Al_2O_3 ; система № 4 — TiC-MgO- Al_2O_3 /TiC.



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

На ПС действовал 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 σ_{\min} , наибольшие σ_{\max} , средние $\sigma_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение s для σ_i . Статистический анализ данных выполняли с использованием программно-аналитического комплекса Statistica.

Для сравнительной оценки интенсивности напряжений σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [23]. Выделенные КТ располагались в поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C1); межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность C2); межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхность C3); матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность C4); зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающей к пластически деформированному слою (поверхность C5); слоя, примыкающей к зерну, межзеренной фазе и матрице (поверхность C6).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Под действием теплового потока в ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики четырех систем образуются температурные поля с изотермами одинаковой формы (рис. 1, а). Особенностью их теплового состояния является высокий градиент температур. Однако разноудаленное расположение изотерм с одинаковой температурой от точки 0 в разных системах ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики свидетельствует о значительном влиянии ее структурных элементов на уровень формируемых температур. Наиболее высокие температуры зафиксированы в системе № 1, наименее высокие — в системе № 4. Из характера изменения T в поверхности C5 разных систем под действием теплового потока (рис. 1, б) видно, что наиболее высокие температуры во всех системах образуются в центральной области этой поверхности (КТ74–КТ76).

Схема деформации ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики систем № 1, 2, 4 под действием теп-

лового потока показана на рис. 2, а. Эту схему выдавливания ПС керамики характеризует высокая локальность упругих деформаций с хорошо различимой границей, в пределах которой перемещаются все КТ. В качестве примера стрелкой показано направление перемещения точки 0 из исходного положения в точку 01. Видно, что точка 0 имеет наибольшие горизонтальные u и вертикальные v перемещения. Для других выделенных КТ u и v уменьшаются при увеличении расстояния между ними и точкой 0. Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются.

Схема деформации ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики системы № 3 имеет особенность, заключающуюся в присутствии трех локальных областей с резким изменением геометрической формы (рис. 2, б). Видно, что на фоне недеформированного контура, в котором структурные элементы керамики выделены разным цветом, образовались две локальные области А и Б на внешнем контуре ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики системы № 3 и третья область на поверхности зерна, контактирующей с межзеренной фазой и слоем.

Характер изменения σ_i в ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики разных поверхностей и систем под действием теплового потока весьма разнообразен (рис. 3). Детально проанализируем характер изменения σ_i во всех поверхностях структурных элементов, образующих ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики четырех систем под действием теплового потока.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C1 керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показан на рис. 3, а. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют однотипную ломаную форму с наибольшими σ_i в КТ8–КТ11, наименьшими — в КТ1 и КТ18. Форма кривой для системы № 1 отличается от других на участке КТ1 и КТ2, на котором зафиксированы наибольшие σ_i . В поверхности C1 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 291 (σ_{\min}) до 1300 МПа (σ_{\max}) при $\sigma_{\text{ср}} = 599,1$ МПа и $s = 281,2$; системы № 2

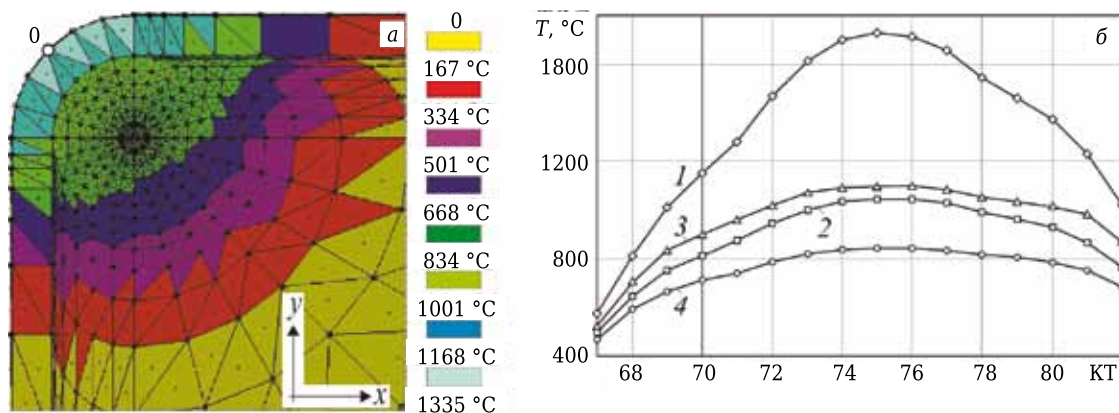


Рис. 1. Пример температурного поля в ПС шлифованной Al₂O₃-TiC-керамики системы № 3 (а) и характер изменения T в поверхности C5 (б) систем № 1–4 (1–4) под действием теплового потока

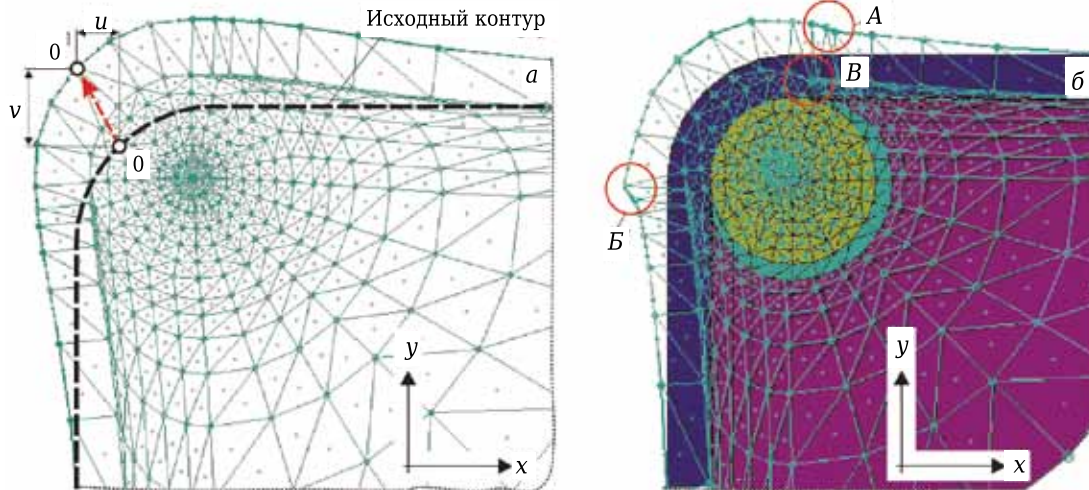


Рис. 2. Схема деформации ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики систем № 1, 2, 4 (а) и № 3 (б) под действием теплового потока

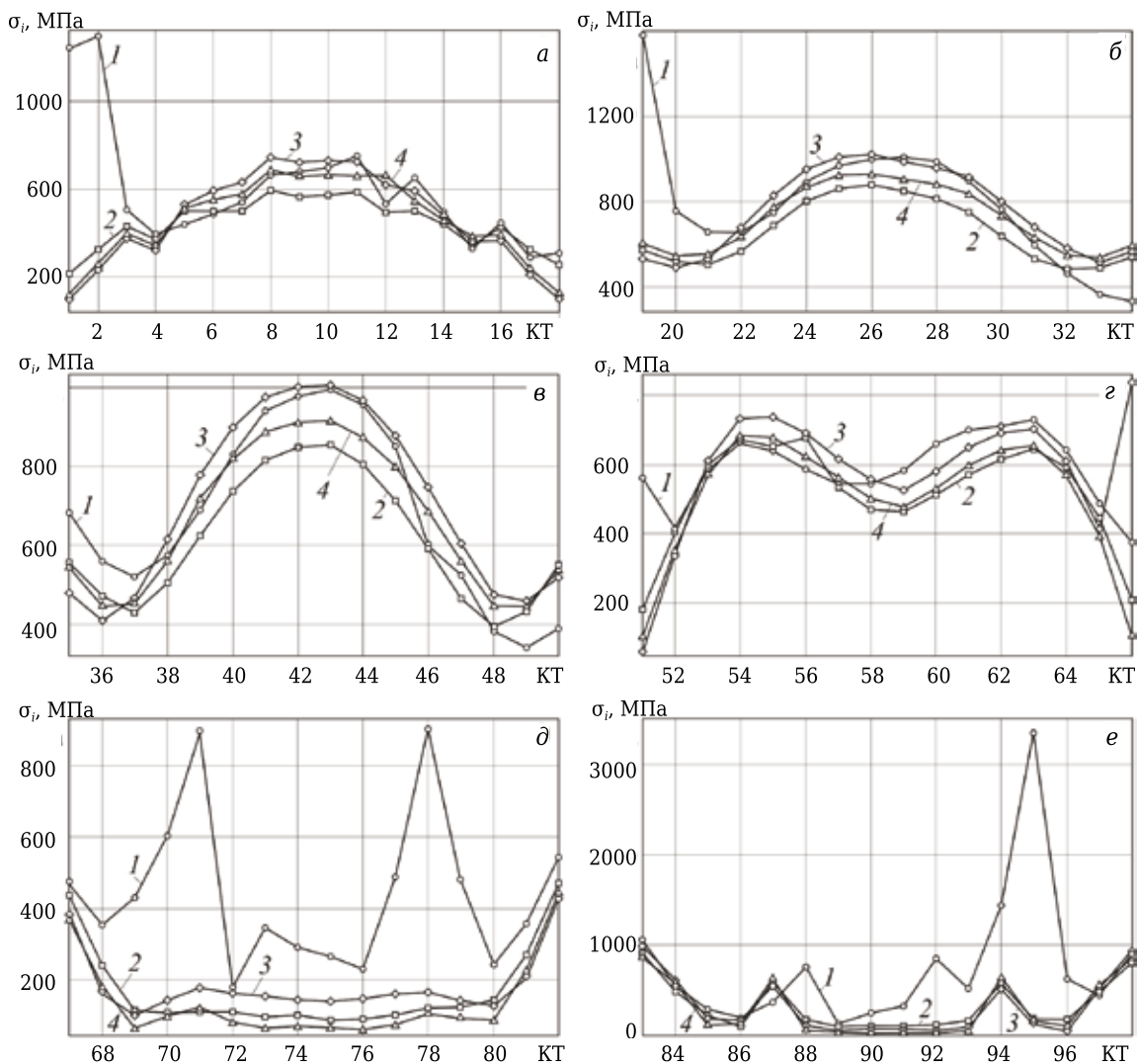


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) керамики систем № 1-4 (1-4) под действием теплового потока

— от 218 до 599 МПа при $\sigma_{cp} = 444,1$ МПа и $s = 114,9$; системы № 3 — от 100 до 748 МПа при $\sigma_{cp} = 467,8$ МПа и $s = 219,9$; системы № 4 — от 117 до 679 МПа при $\sigma_{cp} = 452,7$ МПа и $s = 189,2$.

Статистические характеристики σ_i в поверхности *C1* керамики разных систем показывают, что наибольшими σ_{cp} и s характеризуется система № 1, наименьшими σ_{cp} — система № 2, наименьшими s — система № 3. Система № 4 имеет промежуточные значения σ_{cp} и s . Коэффициенты корреляции, значимые на уровне 0,05, для σ_i систем № 2, 3 и 4 имеют значения не менее 0,98, что свидетельствует о высокой степени связи между ними. Коэффициент корреляции для системы № 1 по отношению к трем другим системам имеет очень малое значение из-за разного характера изменения σ_i в КТ1 и КТ2 в этой системе по сравнению с тремя другими системами.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности *C2* керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показан на рис. 3, б. Кривые для систем № 2–4 имеют однотипную сглаженную форму; в КТ25–КТ27 зафиксированы наибольшие σ_i , в КТ20 и КТ31 — наименьшие. Кривая для системы № 1 отличается от других формой участка КТ1–КТ3 с наибольшими σ_i и наименьшим значением σ_i в КТ34. В поверхности *C2* керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 336 до 1590 МПа при $\sigma_{cp} = 798,5$ МПа и $s = 303,1$; системы № 2 — от 485 до 884 МПа при $\sigma_{cp} = 664,1$ МПа и $s = 145,8$; системы № 3 — от 498 до 1024 МПа при $\sigma_{cp} = 757,6$ МПа и $s = 200,9$; системы № 4 — от 536 до 933 МПа при $\sigma_{cp} = 721,7$ МПа и $s = 153,9$.

Наибольшие σ_{cp} и s имеет система № 1, наименьшие — система № 2; системы № 3 и 4 имеют промежуточные значения σ_{cp} и s . Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь систем № 1, 2 и 3, наименьшим (0,39) — связь систем № 1 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности *C3* керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показан на рис. 3, в. Видно, что все кривые имеют сглаженную форму, один максимум в КТ43 и два минимума в КТ36–КТ37 и КТ48–КТ49. В поверхности *C3* керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 341 до 999 МПа при $\sigma_{cp} = 677,6$ МПа и $s = 225,1$; системы № 2 — от 389 до 857 МПа при $\sigma_{cp} = 612,5$ МПа и $s = 162,6$; системы № 3 — от 413 до 1009 МПа при $\sigma_{cp} = 707,8$ МПа и $s = 225,5$; системы № 4 — от 444 до 915 МПа при $\sigma_{cp} = 666,1$ МПа и $s = 182$. Наименьшие σ_{cp} и s имеет система № 2, наибольшие — система № 3. Системы № 1 и 4 занимают промежуточные значения σ_{cp} и s . Наибольшим коэффициентом корреляции (0,98), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь систем № 3 и 4, наименьшим (0,91) — связь систем № 1 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности *C4* керамики систем № 1–4 под действием теплово-

го потока показан на рис. 3, г. Все кривые имеют одинаковую форму на участке от КТ54 до КТ65, а их периферийные участки для систем № 1 и 3 несколько отличаются от двух других. В общем случае все кривые имеют два максимума (КТ54, КТ55 и КТ63) и периферийные участки с наименьшими значениями σ_i для систем № 2 и 4, причем в КТ51 выделяется значение σ_i для системы № 1, а в КТ66 — значение σ_i для системы № 3. В поверхности *C4* керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 375 до 728 МПа при $\sigma_{cp} = 589,8$ МПа и $s = 101,3$; системы № 2 — от 180 до 686 МПа при $\sigma_{cp} = 515,3$ МПа и $s = 151,2$; системы № 3 — от 57 до 843 МПа при $\sigma_{cp} = 584,6$ МПа и $s = 186,9$; системы № 4 — от 103 до 681 МПа при $\sigma_{cp} = 502,4$ МПа и $s = 182,1$. Наибольшие σ_{cp} имеет система № 1, наименьшие σ_{cp} — система № 4, наибольшие s — система № 3, наименьшие s — система № 1. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,98), значимым на уровне 0,05, для σ_i характеризуется связь систем № 2 и 3, наименьшим (0,27) — связь систем № 1 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности *C5* керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показан на рис. 3, д. Форма кривых выделяется среди кривых для поверхностей *C1–C4* тремя моментами: первый — форма кривой для системы № 1 принципиально отличается от формы других кривых; второй — на кривой для системы № 1 присутствуют два резких пика в КТ71 и КТ78, свидетельствующие о формировании микроструктурных концентраторов напряжений; третий — центральный участок кривых для систем № 2–4 от КТ69 до КТ80 характеризуется значениями σ_i меньшими, чем на периферии. В поверхности *C5* керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 176 до 903 МПа при $\sigma_{cp} = 442,6$ МПа и $s = 214,6$; системы № 2 — от 90 до 473 МПа при $\sigma_{cp} = 171,9$ МПа и $s = 121,6$; системы № 3 — от 106 до 439 МПа при $\sigma_{cp} = 186,6$ МПа и $s = 90,2$; системы № 4 — от 63 до 444 МПа при $\sigma_{cp} = 138,4$ МПа и $s = 115$. Наибольшими σ_{cp} и s характеризуется система № 1, наименьшим σ_{cp} — система № 3, наименьшим s — система № 3. Наибольший коэффициент корреляции (0,99), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 2 и 4, наименьший (0,09) — связь систем № 1 и 2.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности *C6* керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показан на рис. 3, е. Видно, что форма кривых для систем № 2–4 является практически одинаковой, а форма кривой и значения σ_i для системы № 1 существенным образом различаются. На участке КТ91–КТ97 этой кривой присутствует резкий пик, иллюстрирующий многократное увеличение σ_i в КТ93–КТ96. В поверхности *C6* керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 79 до 3347 МПа при $\sigma_{cp} = 748,6$ МПа и $s = 778,4$; системы № 2 — от 93 до 912 МПа при $\sigma_{cp} = 333$ МПа и $s = 279,4$; системы № 3 — от 34 до 998 МПа

при $\sigma_{cp} = 306,4$ МПа и $s = 325,9$; системы № 4 — от 26 до 893 МПа при $\sigma_{cp} = 303$ МПа и $s = 315,4$. Наибольшие σ_{cp} и s имеет система № 1, наименьшие σ_{cp} — система № 4, наименьшие s — система № 2. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99), значимым на уровне 0,05, для σ_i разных систем характеризуется связь систем № 2, 3 и 4, наименьшим (0,11) — связь систем № 1 и 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совокупность структурных элементов, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики, определяет его тепловое и напряженное состояние под действием тепловой нагрузки. Изменение набора этих структурных элементов (в работе эти наборы заданы системами) приводит к трансформациям температурного поля, степени деформаций и уровня напряжений. Наиболее высокие температуры образуются в системе № 1, наименее высокие — в системе № 4. Под действием сформировавшегося температурного поля происходит локальное выдавливание ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики всех систем, причем схема упругих деформаций для систем № 1, 2 и 4 является однотипной, а для системы № 3 специфической. Эта специфика заключается в наличии трех локальных областей с резким изменением формы ПС. В разных системах горизонтальные u и вертикальные v перемещения одинаковых КТ существенно отличаются друг от друга, что приводит к значительным различиям в их напряженном состоянии.

Набор структурных элементов, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики, влияет на значения σ_i и характер их изменения. Например, в поверхности С6 наибольшие σ_i (3347 МПа) зафиксированы в системе № 1, наименьшие σ_i (26 МПа) — в системе № 4, причем разница более чем 120 раз. С учетом вероятностного характера сочетания структурных элементов в ПС керамики можно отметить факт формирования еще одного вида микроструктурных концентраторов напряжений, образующихся на границах чередующихся наборов структурных элементов. По характеру изменения σ_i в разных поверхностях выделяется система № 1; в поверхностях С1, С2, С4, С5 и С6 этой систе-

мы формируются микроструктурные концентраторы напряжений, причем в первых трех поверхностях они формируются на периферийных участках, в двух последних — в центральной части.

В совокупности это означает, что роль теплового фактора в разрушении ПС деталей из Al_2O_3 -TiC-керамики при эксплуатации заключается в формировании многочисленных микроструктурных концентраторов напряжений разного вида, приводящих к появлению структурных дефектов на границе зерен оксида алюминия со слоем, сформировавшимся при шлифовании в результате пластической деформации этих зерен. Формирование столь сложного напряженно-деформированного состояния и экстремально высоких локальных напряжений на границах структурных элементов керамики с высокой вероятностью приведет к зарождению в ней дефектов в виде несплошностей, быстрому образованию зародышевых трещин и их росту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием основных положений компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики, автоматизированной системы термомеханических расчетов KS-SL v.1.0 и метода контрольных точек изучен характер изменения температуры и интенсивности напряжений в структурных элементах керамики под действием теплового шока. Полученные результаты позволили конкретизировать знания о тепловых и деформационных процессах, о формировании напряженного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики с учетом разного сочетания ее структурных элементов, об особенностях термомеханических процессов в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики. Установлено, что роль теплового фактора в механизме разрушения ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики проявляется в формировании крайне неблагоприятных 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. Zhao, Jun. Cutting performance and failure mechanisms of an Al_2O_3 /WC/TiC micro-nano-composite ceramic tool / Jun Zhao, Xunliang Yuan, Yonghui Zhou // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2010. — Vol. 28, № 3. — P. 330–337.
3. 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, 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.

4. 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. Микро-

уровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

5. **Cheng, M.** Mechanical properties of two types of Al₂O₃/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.

6. **Yin, Z.** High temperature mechanical properties of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic tool materials / Zengbin Yin, Chuanzhen Huang, Bin Zou [et al.] // Ceram. Int. — 2013. — Vol. 39, № 8. — P. 8877–8883.

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. **Yin, Zengbin.** Friction and wear behaviors of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials / Zengbin Yin, Juntang Yuan, Chuanzhen Huang [et al.] // Ceram. Int. — 2016. — Vol. 42, № 1. — P. 1982–1989.

9. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.

Кузин, В. В. Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.

10. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al₂O₃-TiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63–68.

11. **Li, Jing.** Influence of cobalt phase on mechanical properties and thermal shock performance of Al₂O₃-TiC composites / Jing Li, Lai-peng Ma // Ceram. Int. — 2005. — Vol. 31, № 7. — P. 945–951.

12. **Kuzin, V. V.** Features of Al₂O₃-TiC ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigoriev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

Кузин, В. В. Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al₂O₃-TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.

13. **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. Grigoriev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 157–163.

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.

14. **Grigoriev, S. N.** Influence of thermal loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, M. A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477.

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

15. **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. Grigoriev, V. N. Ermolin // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.

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.

16. **Kuzin, V. V.** Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

Кузин, В. В. Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное 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.

17. **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. Grigoriev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

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.

18. **Dong, Wang.** Microstructure design and preparation of Al₂O₃/TiC/TiN micro-nano-composite ceramic tool materials based on properties prediction with finite element method / Dong Wang, Chao Xue, Yan Cao [et al.] // Ceram. Int. — 2018. — Vol. 44, № 51. — P. 5093–5101.

19. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 268–271.

20. **Xu, C.** Finite element design and fabrication of Al₂O₃ / TiC / CaF₂ gradient self-lubricating ceramic tool material / Chonghai Xu, Guangchun Xiao, Yonglian Zhang [et al.] // Ceram. Int. — 2014. — Vol. 40, № 7. — Part B. — P. 10971–10983.

21. **Xiaoqin, Shen.** Finite-element analysis of residual stresses in Al₂O₃-TiC/W18Cr4V diffusion bonded joints / Xiaoqin Shen, Yajiang Li, U. A. Putschkov [et al.] // Computational Materials Science. — 2009. — Vol. 45, № 2. — P. 407–410.

22. **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.

23. **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 31.07.20
© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2020 г.