

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].017:543.57

ТЕПЛОВЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ Si_3N_4 -TiC-КЕРАМИКИ

С использованием базовых положений компьютерной инженерии изучено тепловое и напряженное состояние поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики четырех систем под действием теплового потока. Установлены закономерности распределения температур и напряжений в шести выделенных поверхностях поверхностного слоя. Определена специфика формирования структурной неоднородности напряжений и микроструктурных концентраторов напряжений, приводящих к изменению структуры керамики за счет образования несплошностей.

Ключевые слова: Si_3N_4 -TiC-керамика, поверхностный слой, напряженное состояние, тепловой поток, интенсивность напряжений, структурная неоднородность напряжений, микроструктурный концентратор напряжений, несплошности, компьютерная инженерия.

ВВЕДЕНИЕ

Достигнутый уровень совершенства многоцелевой Si_3N_4 -TiC-керамики явился результатом многолетних и разноплановых исследований [1–5]. Выбор исходных порошков и наилучших составов, оптимизация ключевых параметров спекания обеспечили получение высокоплотных заготовок с улучшенными свойствами [6, 7]. Усовершенствование процессов окончательного формообразования высокоточных деталей с использованием алмазных инструментов, развитие методов инженерии поверхности и доведение разработанных технологий до серийного применения многократно повысили привлекательность изделий из Si_3N_4 -TiC-керамики для разных отраслей промышленности [8–10]. Однако проблему эксплуатационной надежности этих керамических изделий, работающих в условиях повышенных температур, окончательно решить пока не удалось [11–13]. Воздействие интенсивного теплового потока способно перевести изделия из термостойкой Si_3N_4 -TiC-керамики в неработоспособное состояние так же внезапно, как и усиленная силовая нагрузка [14, 15]. Основными причинами нестабильного поведения керамики при высокой температуре являются значительная структурная неоднородность напряжений и

экстремально высокие структурные концентраторы напряжений в их поверхностном слое (ПС), приводящие к появлению дефектов и их последующему росту [16, 17].

Условия формирования критических напряжений в ПС Si_3N_4 -TiC-керамики со структурными дефектами при высоких температурах проанализированы в статье [18], влияние тонких пленок на тепловое и напряженное состояние керамики под действием теплового потока рассмотрено в статье [19]. Результаты этих исследований свидетельствуют о ключевом влиянии свойств и формы структурных элементов на термомеханическое состояние и поведение керамики при высокотемпературной эксплуатации, причем степень этого влияния определяется особенностями реальной структуры ПС керамики. В этой связи тепловой анализ напряженно-деформированного состояния ПС, сформировавшегося при изготовлении изделий из нитридной керамики и имеющего специфическую структуру [20, 21], является весьма актуальным для решения практических задач, так же как и результаты ранее проведенных тепловых анализов [22, 23] керамики различного состава.

В настоящей работе поставлена задача — с использованием базовых положений компьютерной инженерии [24] изучить характер распределения температуры и интенсивности напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием теплового потока для выявления особенностей изменения его структуры при эксплуатации. Настоящая статья является продолжением статьи [25], в которой изложены



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

результаты силового анализа напряженного состояния шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнены в автоматизированной системе термopочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы № 1 и метода контрольных точек (КТ) [26, 27]. Исследовали характер изменения температуры T и интенсивности напряжений σ_i в шести поверхностях C1–C6 (табл. 1) шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики четырех систем (№ 1–4, табл. 2) под действием теплового потока $Q = 9 \cdot 10^8$ Вт/м²; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду

Таблица 1

Обозначение поверхности	Структурные особенности поверхности	Номер КТ
C1	Поверхность зерна, контактирующая с межзеренной фазой	КТ1–КТ18
C2	Поверхность межзеренной фазы, контактирующая с зерном	КТ19–КТ34
C3	Поверхность межзеренной фазы, контактирующая с матрицей	КТ35–КТ50
C4	Поверхность матрицы, контактирующая с межзеренной фазой	КТ51–КТ66
C5	Фрагменты поверхностей зерна, межзеренной фазы и матрицы, контактирующие со слоем	КТ67–КТ82
C6	Поверхность слоя, контактирующая с фрагментами зерна, межзеренной фазы и матрицы	КТ83–КТ98

Таблица 2

Система	Зерно	Межзеренная фаза	Матрица	Слой
№ 1	Si_3N_4	Y_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4
№ 2	Si_3N_4	Y_2O_3	Si_3N_4	TiC
№ 3	TiC	Y_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4
№ 4	TiC	Y_2O_3	Si_3N_4	TiC

$h_a = 1 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град). Значения статистических характеристик (наименьшие $T_{\min}/\sigma_{\min}$, наибольшие $T_{\max}/\sigma_{\max}$, средние $T_{\text{ср}}/\sigma_{\text{ср}}$; $\Delta\sigma_i$ — диапазон изменения σ_i ; медиана M_e для σ_i ; стандартное отклонение s для T и σ_i) в совокупности КТ определяли с использованием программного комплекса Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичное температурное поле в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики, образовавшееся под действием теплового потока, показано на рис. 1, а. Установлено, что вид системы не влияет на форму изотерм, ориентированных относительно точки 0, но существенно влияет на удаленность изотерм с одинаковой температурой от точки 0. Это означает существенное влияние вида рассматриваемой системы на градиент температур; в ПС керамики системы № 1 зафиксирован наибольший градиент температур, а в ПС керамики системы № 4 — наименьший. Наибольшая T формируется в поверхности C5 (рис. 1, б), причем максимальная T зафиксирована в системе № 1, а минимальная — в системе № 4. В поверхности C5 ПС керамики системы № 1 T изменяется от 568 ($T_{\min}$) до 1719 °C ($T_{\max}$) при $T_{\text{ср}} = 1331,9$ °C и $s = 344,7$, системы № 2 — от 500 до 1047 °C при $T_{\text{ср}} = 886,9$ °C и $s = 158,2$, системы № 3 — от 528 до 1099 °C при $T_{\text{ср}} = 961,7$ °C и $s = 159$, системы № 4 — от 470 до 843 °C при $T_{\text{ср}} = 749,9$ °C и $s = 103,9$.

Схема деформации ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики всех систем под действием теплового потока показана на рис. 2. Эту однотипную схему выдавливания ПС керамики характеризует высокая локальность упругих деформаций, причем наибольшие значения горизонтальных u и вертикальных v перемещений имеет точка 0, упруго перемещающаяся из исходного положения в точку 0¹. Для выделенных КТ u и v уменьшаются при увеличении расстояния от них до точки 0. Результаты расчетов u и v для

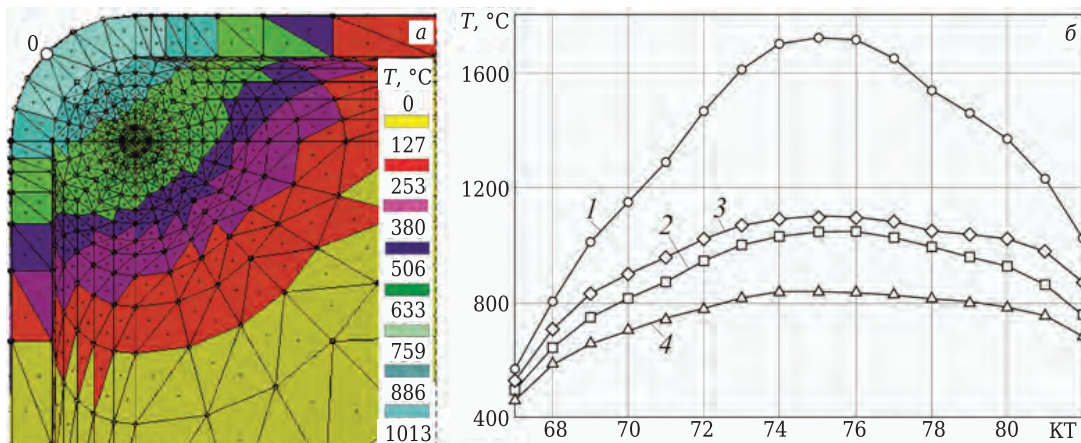


Рис. 1. Температурное поле в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики системы № 2 (а) и характер изменения T в поверхности C5 систем № 1–4 (1–4) (б) под действием теплового потока

одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются.

Установлено, что поля σ_i , сформировавшиеся в ПС керамики четырех систем под действием теплового потока, характеризуются наибольшими значениями в слое (рис. 3). Общий вид полей σ_i , зафиксированный в ПС керамики систем № 1, 2 и № 3, 4, различается. В качестве примера на рис. 3, а показано поле σ_i в ПС керамики системы № 2, а на рис. 3, б — системы № 3. Видно, что основным различием этих полей является распределение σ_i во внутреннем объеме зерна.

Характер изменения σ_i в разных поверхностях ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием теплового потока показан на рис. 4. Графики классифицированы на три группы. *Первая группа* — график для поверхности СЗ (рис. 4, в), с кривыми одинаковой формы для всех четырех систем. Особенность *второй группы* графиков для поверхностей С1, С2 и С4 (рис. 4, а, б и г) — особая форма кривой для системы № 1 на периферийном участке. *Третья группа* — графики для поверхностей С5 и С6, на которых форма кривых для системы № 1 принципиально отличается от формы кривых для трех других систем.

Кривые изменения σ_i в КТ поверхности С1 ПС керамики систем № 1–4 показаны на рис. 4, а. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют однотипную ломаную форму с наибольшими значениями σ_i в КТ8 и КТ12, наименьшими — в КТ1 и КТ18. Кривая для системы № 1 отличается от других кривых только на участке КТ1–КТ2, на котором зафиксирована наибольшая σ_i для этой системы. Установлено, что в поверхности С1 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 291 ($\sigma_{\text{мин}}$) до 1300 МПа ($\sigma_{\text{макс}}$) при $\Delta\sigma_i = 1009$ МПа и $M_e = 519$ МПа, системы № 2 — от 218 до 599 МПа при $\Delta\sigma_i = 381$ МПа и $M_e = 470$ МПа, системы № 3 — от 100 до 748 МПа при $\Delta\sigma_i = 648$ МПа и $M_e = 505$ МПа, системы № 4 — от 117 до 679 МПа при $\Delta\sigma_i = 562$ МПа и $M_e = 487$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшими

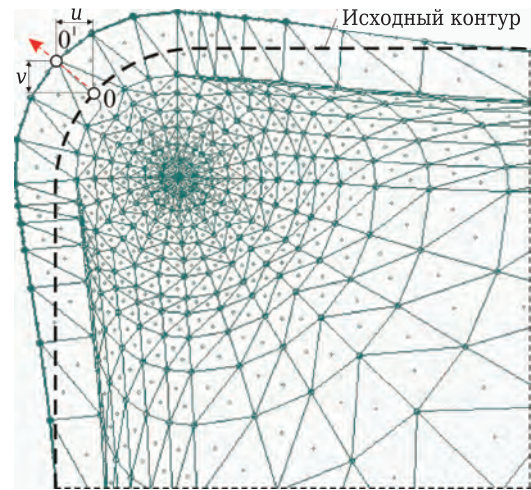


Рис. 2. Схема деформации ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики системы № 2 под действием теплового потока

— система № 2; системы № 3 и 4 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e , причем у системы № 3 эти значения несколько выше, чем у системы № 4. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 2,6 и 1,1 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции для σ_i (0,99), значимым на уровне 0,05, характеризуется связь систем № 1, 2, № 2, 4 и № 3, 4, наименьшим (0,98) — связь систем № 1, 3 и № 1, 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С2 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, б. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют однотипную сглаженную форму, особенностью которой является наибольшая σ_i в КТ26 и наименьшая σ_i в КТ20 (для систем № 3 и 4) и КТ32 (для системы № 2). Форма кривой для системы № 1 отличается от формы других кривых на участках КТ19–КТ21 и КТ33–КТ34; наибольшая σ_i зафиксирована в КТ19, наименьшая — в КТ34. В поверхности С2 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 336 до 1590 МПа при $\Delta\sigma_i = 1254$ МПа и $M_e = 770,5$ МПа, системы № 2 — от 485 до 884 МПа

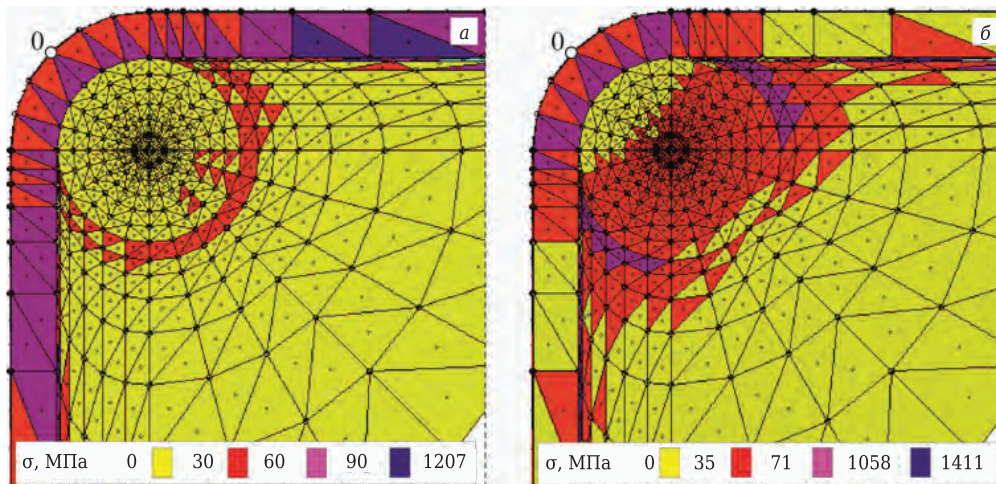


Рис. 3. Поля σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 2 (а) и № 3 (б) под действием теплового потока

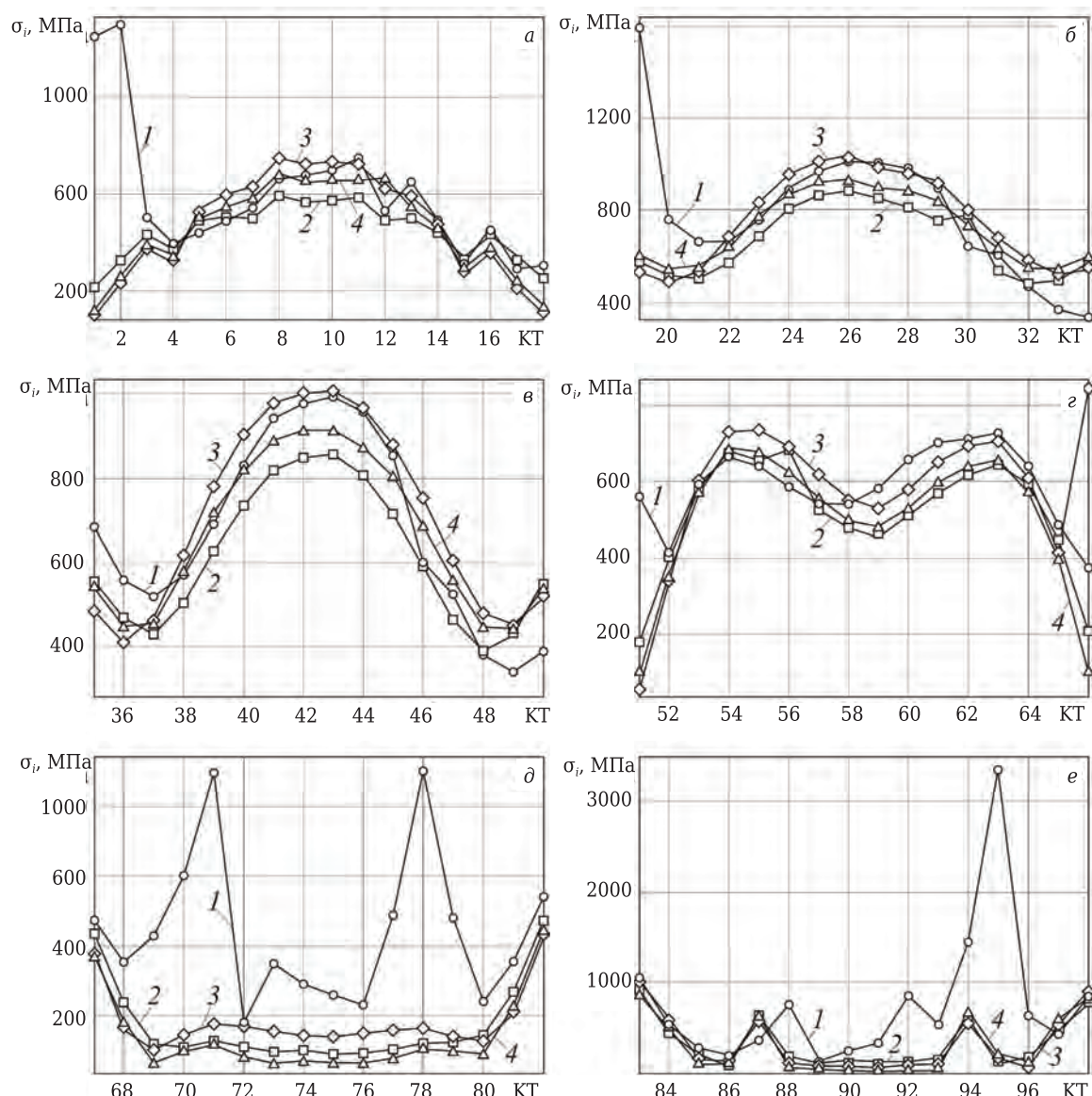


Рис. 4. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 (1–4) под действием теплового потока

при $\Delta\sigma_i = 399$ МПа и $M_e = 614$ МПа, системы № 3 — от 498 до 1024 МПа при $\Delta\sigma_i = 526$ МПа и $M_e = 743,5$ МПа, системы № 4 — от 536 до 933 МПа при $\Delta\sigma_i = 397$ МПа и $M_e = 691$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшими — система № 2. Системы № 3 и 4 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e , причем у системы № 3 $\Delta\sigma_i$ и M_e несколько выше, чем у системы № 4. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 2,1 и 1,3 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,97) для σ_i характеризуется связь систем № 3, 4, наименьшим (0,58) — связь систем № 1, 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C3 ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 показан на рис. 2, в. Видно, что все кривые имеют одинаковую форму; наибольшая σ_i

фиксируется в КТ43, наименьшая — в КТ48 (для систем № 2 и 4) и КТ49 (для систем № 1 и 3). В поверхности C3 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 341 до 999 МПа при $\Delta\sigma_i = 658$ МПа и $M_e = 642,5$ МПа, системы № 2 — от 389 до 857 МПа при $\Delta\sigma_i = 468$ МПа и $M_e = 571,5$ МПа, системы № 3 — от 413 до 1009 МПа при $\Delta\sigma_i = 596$ МПа и $M_e = 686,5$ МПа, системы № 4 — от 444 до 915 МПа при $\Delta\sigma_i = 471$ МПа и $M_e = 634$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 3 соответственно, наименьшими — система № 2; система № 4 имеет промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e . Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 1,4 и 1,2 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,99) для σ_i характеризуется связь систем № 3, 4, наименьшим (0,9) — связь систем № 1, 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 2, г. Видно, что форма кривой для системы № 1 отличается от формы кривых для систем № 2–4 на периферийных участках (КТ51–КТ52 и КТ65–КТ66). Центральная часть всех кривых характеризуется двумя максимумами σ_i (КТ54–КТ56, КТ63) и одним минимумом σ_i (КТ58–КТ59). В поверхности С4 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 375 до 728 МПа при $\Delta\sigma_i = 353$ МПа и $M_e = 589,5$ МПа, системы № 2 — от 180 до 686 МПа при $\Delta\sigma_i = 506$ МПа и $M_e = 547$ МПа, системы № 3 — от 57 до 843 МПа при $\Delta\sigma_i = 786$ МПа и $M_e = 613,5$ МПа, системы № 4 — от 103 до 681 МПа при $\Delta\sigma_i = 578$ МПа и $M_e = 565$ МПа. Наибольшими $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 3, наименьшим $\Delta\sigma_i$ — система № 1, наименьшей M_e — система № 2; система № 4 имеет промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e . Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 2,2 и 1,1 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,96) для σ_i характеризуется связь систем № 2, 4, наименьшим (0,43) — связь систем № 1, 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, д. Видно, что форма кривой для системы № 1 и кривых для других систем существенно различаются, прежде всего, присутствием двух пиков в КТ71 и

КТ78 с наибольшими значениями σ_i . Кривые для систем № 2–4 имеют сглаженную форму — практически горизонтальный участок между КТ69 и КТ80 и повышение σ_i на периферийных участках КТ67–КТ69 и КТ80–КТ82. Во всех КТ поверхности С5 σ_i имеет близкие значения для разных систем: в системе № 1 σ_i изменяется от 176 до 903 МПа при $\Delta\sigma_i = 727$ МПа и $M_e = 393$ МПа, в системе № 2 — от 90 до 473 МПа при $\Delta\sigma_i = 383$ МПа и $M_e = 118$ МПа, в системе № 3 — от 106 до 439 МПа при $\Delta\sigma_i = 333$ МПа и $M_e = 157,5$ МПа, в системе № 4 — от 63 до 444 МПа при $\Delta\sigma_i = 381$ МПа и $M_e = 92$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшим $\Delta\sigma_i$ — система № 3, наименьшей M_e — система № 4; система № 2 имеет промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e . Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 2,2 и 4,3 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,86) для σ_i имеет связь систем № 2, 4, наименьшим (0,29) — связь систем № 1, 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 4, е. Видно, что кривые для систем № 2–4 имеют одинаковую форму, которая характеризуется наибольшими значениями σ_i на их периферийных участках и присутствием двух пиков в КТ87 и КТ94 на практически горизонтальном участке от КТ85 до КТ96. Форма кривой для

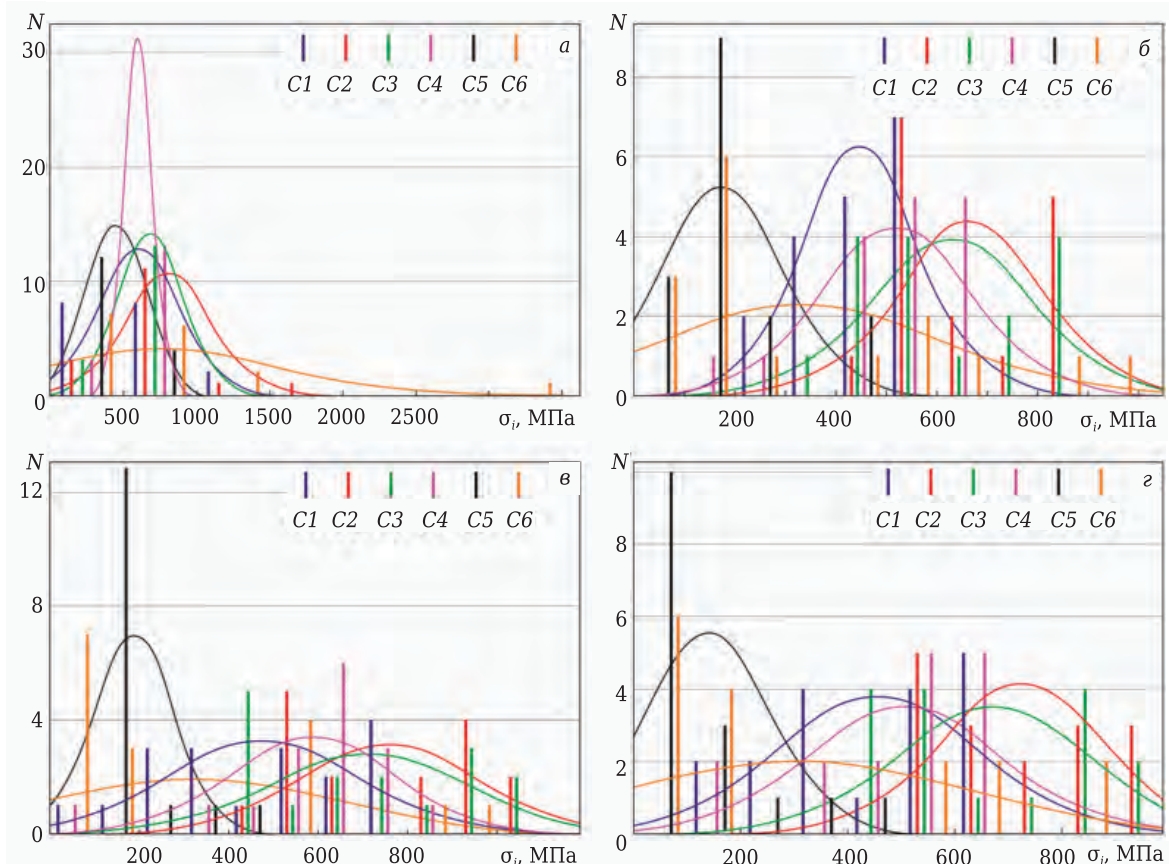


Рис. 5. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностях С1–С6 керамики систем № 1–4 (а–г) под действием теплового потока

системы № 1, имеющей один основной пик в КТ95 и два дополнительных пика в КТ88 и КТ92, свидетельствует о формировании структурных концентраторов напряжений в этой поверхности.

В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 79 до 3347 МПа при $\Delta\sigma_i = 3268$ МПа и $M_e = 538$ МПа, системы № 2 — от 93 до 912 МПа при $\Delta\sigma_i = 819$ МПа и $M_e = 180$ МПа, системы № 3 — от 34 до 998 МПа при $\Delta\sigma_i = 964$ МПа и $M_e = 137,5$ МПа, системы № 4 — от 26 до 893 МПа при $\Delta\sigma_i = 867$ МПа и $M_e = 133$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 1, наименьшим $\Delta\sigma_i$ — система № 3, наименьшей M_e — система № 4; система № 2 имеет промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e . Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 4,0 и 3,9 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,96) для σ_i характеризуется связь систем № 3, 4, наименьшим (0,35) — связь систем № 1, 3.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики систем № 1–4 под действием теплового потока показаны на рис. 5. Выявлены два общих признака: значения σ_i во всех поверхностях можно считать нормально распределенными, наибольшее число КТ концентрируется в диапазоне σ_i 350–700 МПа. При однотипной форме кривых распределения σ_i в КТ значения статистических характеристик для разных систем существенно различаются.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 1 показано на рис. 5, а. Установлено, что в поверхности С1 $\sigma_{cp} = 599,1$ МПа при $s = 281,2$, в поверхности С2 $\sigma_{cp} = 798,5$ МПа при $s = 303,1$, в поверхности С3 $\sigma_{cp} = 677,6$ МПа при $s = 225,1$, в поверхности С4 $\sigma_{cp} = 589,8$ МПа при $s = 101,3$, в поверхности С5 $\sigma_{cp} = 442,6$ МПа при $s = 214,7$, в поверхности С6 $\sigma_{cp} = 748,6$ МПа при $s = 778,4$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 1 характеризуются поверхности С2 и С6 соответственно, наименьшими σ_{cp} и s — поверхности С5 и С4 соответственно. Наибольшие значения σ_{cp} и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,8 и 7,7 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 2 показано на рис. 5, б. Установлено, что в поверхности С2 — 664,1 МПа при $s = 145,9$, в поверхности С3 — $\sigma_{cp} = 612,5$ МПа при $s = 162,6$, в поверхности С4 — $\sigma_{cp} = 515,3$ МПа при $s = 151,2$, в поверхности С5 — $\sigma_{cp} = 171,9$ МПа при $s = 121,6$, в поверхности С6 — $\sigma_{cp} = 333$ МПа при $s = 279,4$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 2 характеризуются поверхности С2 и С6 соответственно, наименьшими σ_{cp} и s — поверхности С5 и С1 соответственно. Наибольшие значения σ_{cp} и s выше, чем наименьшие, соответственно в 3,9 и 2,9 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 3 показано на рис. 5, в.

Установлено, что в поверхности С1 σ_{cp} составляет $\sigma_{cp} = 467,8$ МПа при $s = 219,9$, в поверхности С2 — $\sigma_{cp} = 757,6$ МПа при $s = 200,9$, в поверхности С3 — $\sigma_{cp} = 707,8$ МПа при $s = 225,5$, в поверхности С4 — $\sigma_{cp} = 584,6$ МПа при $s = 186,9$, в поверхности С5 — $\sigma_{cp} = 186,6$ МПа при $s = 90,2$, в поверхности С6 — $\sigma_{cp} = 306,4$ МПа при $s = 325,9$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 3 характеризуются поверхности С2 и С6 соответственно, наименьшими — поверхность С5. Наибольшие значения σ_{cp} и s выше, чем наименьшие, соответственно в 4,1 и 3,6 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 4 показано на рис. 5, г. Установлено, что в поверхности С1 σ_{cp} составляет $\sigma_{cp} = 452,7$ МПа при $s = 189,2$, в поверхности С2 — $\sigma_{cp} = 721,7$ МПа при $s = 153,9$, в поверхности С3 — $\sigma_{cp} = 666,1$ МПа при $s = 181,9$, в поверхности С4 — $\sigma_{cp} = 502,4$ МПа при $s = 182,1$, в поверхности С5 — $\sigma_{cp} = 138,4$ МПа при $s = 115$, в поверхности С6 — $\sigma_{cp} = 303$ МПа при $s = 315,4$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 4 характеризуются поверхности С2 и С6 соответственно, наименьшими σ_{cp} и s — поверхность С5. Наибольшие значения σ_{cp} и s выше, чем наименьшие, соответственно в 5,2 и 2,7 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований распределения температур и интенсивности напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики четырех систем под действием теплового потока выявлена базовая закономерность: наибольшая Т формируется в поверхности С5 системы № 1, наименьшая — в системе № 4; наибольшее значение средней температуры $T_{cp} = 1332$ °С зафиксировано в центральной части поверхности С5 системы № 1.

Изменение интенсивности напряжений в ПС керамики имеет более сложный характер, причем обнаруженные различия характерны как для систем, так и для поверхностей. Наибольшие средние значения σ_i ($\sigma_{cp} = 757,6$ МПа) зафиксированы в поверхности С2 системы № 3.

Кривые σ_i для поверхностей С1–С3 имеют простой вид с наибольшей σ_i в центральной части; для поверхности С4 кривые σ_i имеют два максимума и один минимум (при некотором отклонении кривых для систем № 2–4 от этой формы на периферийных участках); в поверхности С5 на кривой для системы № 1 присутствуют два пика, а кривые для систем № 2–4 характеризуются простой сглаженной формой на практически горизонтальном участке между КТ69 и повышением σ_i на периферийных участках.

Отмечено, что в поверхности С3 кривые для всех систем имеют одинаковую форму; в поверхностях С1, С2 и С4 форма кривой для системы № 1 несколько отличается от формы других кривых

на периферийном участке; в поверхностях $C5$ и $C6$ форма кривой для системы № 1 значительно отличается от формы кривых для других систем. Пики в центральной части кривых σ_i в поверхностях $C5$ – $C6$ указывают на присутствие в них микроструктурных концентраторов напряжений и, соответственно, на высокую вероятность образования эксплуатационных дефектов в виде несплошностей на границе поверхностей $C5$ и $C6$ в ПС керамики.

Обобщенный статистический анализ по системам № 1–4 ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики показал, что значения σ_i во всех

поверхностях можно считать нормально распределенными, а наибольшее число КТ концентрируется в диапазоне σ_i 350–700 МПа. При этом системы в разной степени реагируют на действие теплового потока: наибольшей неоднородностью напряжений характеризуется система № 1, наименьшей — система № 2.

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

Библиографический список

1. **Tian, Chunyan.** Thermal shock and thermal fatigue behavior of Si_3N_4 –TiC nano-composites / Chunyan Tian, Ning Liu, Maohu Lu // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* — 2008. — Vol. 26, № 5. — P. 478–484.
2. **Xu, Weiwei.** Dynamic fatigue behavior of Si_3N_4 -based ceramic tool materials at ambient and high temperatures / Weiwei Xu, Juntang Yuan, Zengbin Yin // *Ceram. Int.* — 2019. — Vol. 45, № 17, part A. — P. 21572–21578.
3. **Xu, Zhongguo.** Effects of pulse conditions on microstructure and mechanical properties of $Si_3N_4/6061Al$ composites prepared by spark plasma sintering (SPS) / Han Jiang, Zhongguo Xu, Ziyang Xiu [et al.] // *J. Alloys Compd.* — 2018. — Vol. 763. — P. 822–834.
4. **Zhan, Guo-Dong.** Micromechanisms of creep-fatigue crack growth in α – β - $SiAlON$ at 1200 °C / Guo-Dong Zhan, Jian-Lin Shi, Ting-Rong Lai, Tung-Sheng Yen // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 1997. — Vol. 17, № 10. — P. 1267–1276.
5. **Szafran, M.** Si_3N_4 – Al_2O_3 –TiC– Y_2O_3 composites intended for the edges of cutting tools / M. Szafran, E. Bobryk, D. Kukla [et al.] // *Ceram. Int.* — 2000. — Vol. 26, № 6. — P. 579–582.
6. **Bernard-Granger, G.** High temperature creep behaviour of β - Si_3N_4 α - $YSiAlON$ ceramics / G. Bernard-Granger, J. Crampon, R. Duclos // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 1997. — Vol. 17, № 13. — P. 1647–1654.
7. **Bao, Y.** Strength degradation and lifetime prediction of HP- Si_3N_4 /TiC under static load at 1200 °C / Y. Bao, Z. Jin, L. Sun // *Mater. Lett.* — 2000. — Vol. 45, № 1. — P. 27–31.
8. **Kuzin, V.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / V. Kuzin // *Key Engineering Materials. Precision Machining.* — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.
9. **Sun, J.** Analysis of surface morphology and roughness on Si_3N_4 ceramic grinding / H. Wang, Y. Wu, P. Zhou [et al.] // *Academic Journal of Manufacturing Engineering.* — 2018. — Vol. 16, № 3. — P. 20–28.
10. **Kuzin, V. V.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / V. V. Kuzin // *Russian Engineering Research.* — 2004. — Vol. 24. — № 1. — P. 23–28.

Кузин, В. В. Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // *Вестник машиностроения.* — 2004. — № 1. — С. 37–41.

Кузин, В. В. Оценка надежности керамических инструментов при ограниченном объеме испытаний

на стойкость на основе установленных критериев износа / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 7. — С. 66–70.

12. **Kuzin, V. V.** Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / V. V. Kuzin // *Russian Engineering Research.* — 2003. — Vol. 23. — № 12. — P. 32–36.

Кузин, В. В. Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / В. В. Кузин // *Вестник машиностроения.* — 2003. — № 12. — С. 41–45.

13. **Kuzin, V. V.** Tribological aspect in technological assurance of ceramic component quality / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refract. Ind. Ceram.* — 2019. — Vol. 60, № 3. — P. 280–283.

Кузин, В. В. Трибологический аспект в технологическом обеспечении качества керамических деталей / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, С. Н. Григорьев // *Новые огнеупоры.* — 2019. — № 5. — С. 122–126.

14. **Kuzin, V. V.** Thermal state of ceramic cutting tools in high-speed cutting / V. V. Kuzin // *Russian Engineering Research.* — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 32–40.

Кузин, В. В. Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / В. В. Кузин // *Вестник машиностроения.* — 2004. — № 9. — С. 47–52.

15. **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.

16. **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.

17. **Kuzin, V. V.** Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov // *Journal of Friction and Wear.* — 2013. — Vol. 34, № 3. — P. 199–203.

Кузин, В. В. Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Ку-

зун, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.

18. **Kuzin, V.** Effect of thermal loading on stresses in defective surface layer of ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Portnoy // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 189–192.

19. **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. Grigor'ev, 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.

20. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Si₃N₄-ceramic surface quality / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 78–81.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Si₃N₄-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 67–70.

21. **Kuzin, V. V.** Production process planning for preparing Si₃N₄-ceramic objects taking account of edge defectiveness / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 5. — P. 562–565.

Кузин, В. В. Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si₃N₄-керамики с учетом требуемой дефектности кромок / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68.

22. **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.

23. **Kuzin, Valery V.** A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton [et al.] // Proceedings of the 10th International Conference on Manufacturing Research (ICMR 2012). — 2012. — P. 523–528.

24. **Kuzin, V. V.** Basic framework for computer-aided engineering of polished ceramic surface layers / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 349–354.

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.

25. **Кузин, В. В.** Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si₃N₄-TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 12. — С. 54–60.

26. **Kuzin, V. V.** Microstructural model of the surface layer of ceramics after diamond grinding taking into account its real structure and the conditions of contact interaction with elastic body / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 303–308.

Кузин, В. В. Микроструктурная модель поверхностного слоя керамики после алмазного шлифования, учитывающая его реальную структуру и условия контактного взаимодействия с упругим телом / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 5. — С. 59–64.

27. **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 11.01.21

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ФОРУМ ПО ОГНЕУПОРНЫМ МИНЕРАЛАМ 2021

REFRACTORY MINERALS

FORUM 2021

ONLINE

16–17 марта 2021 г.



<http://imformed.com/get-imformed/forums/refractory-minerals-forum-2021-online/>