

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+539.375

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

Установлены основные закономерности напряженного состояния поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием комбинированной нагрузки. Выявлена 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 (ПС), напряженное состояние, комбинированная нагрузка, интенсивность напряжений, структурная неоднородность напряжений, микроструктурный концентратор напряжений, несплошности, компьютерная инженерия.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические материалы на основе нитрида кремния занимают одну из верхних позиций в рейтинге материалов, способных создать условия для скачкообразного развития современной высокотемпературной техники [1–4]. Этот multifunctional материал с потенциально широкой областью применения выгодно отличается от оксидных аналогов совокупностью свойств и их стабильностью под действием разных внешних воздействий [5–9]. Однако этой группе материалов присущ общий недостаток: под действием технологических и эксплуатационных нагрузок формируется новая структура поверхностного слоя (ПС) шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики, что приводит к ухудшению ее структурно-чувствительных свойств [10–14].

Структура Si_3N_4 -керамики, сформированная в процессе спекания заготовки, определяет комплекс ее начальных свойств, являющийся решающим при определении области применения этого материала [15]. Однако многослойная структура ПС изделия, образовавшаяся при его изготовлении и характеризующаяся повышенной дефектностью, при действии эксплуатационных нагрузок приводит к формированию высокой неоднородности напряжений и обра-

зованию в ПС структурных концентраторов напряжений [16–20]. Это напряженное состояние является одной из основных причин отказов керамических изделий и сокращения их ресурса, который невозможно спрогнозировать без знания основных закономерностей трансформации структуры ПС изделия [21]. Поэтому выявление взаимосвязи структуры ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики с его напряженным состоянием позволит повысить точность прогнозирования ресурса изделия и границ его эффективного использования. В этой связи комбинированный анализ напряженно-деформированного состояния ПС, сформировавшегося при изготовлении изделий из нитридной керамики и имеющего специфическую структуру, является весьма актуальным для решения практических задач.

Цель работы — с использованием базовых положений компьютерной инженерии [22, 23] изучить характер распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики в условиях совместного действия теплового потока, сосредоточенной и распределенной силы.

Настоящая статья является продолжением статей [24, 25], в которых изложены результаты силового и теплового анализов напряженного состояния ПС 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) [23, 25]. Исследовали характер изменения интенсивности на-



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

пряжений σ_i в шести поверхностях C1–C6 (табл. 1) шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики четырех систем (№ 1–4, табл. 2) под действием сосредоточенной силы $F = 0,02 \text{ Н}$, приложенной под углом $\beta = 45^\circ$, распределенной силовой нагрузки $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и теплового потока $Q = 9 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$; коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $h = 1 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$. Значения статистических характеристик (наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$; $\Delta\sigma_i$ — диапазон изменения

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, контактирующих 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

σ_i ; медиана M_e для σ_i ; стандартное отклонение s для σ_i) в КТ определяли с использованием программного комплекса Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема деформации ПС керамики всех систем под действием комбинированной нагрузки показана на рис. 1. Эту однотипную схему вдавливания характеризует высокая локальность упру-

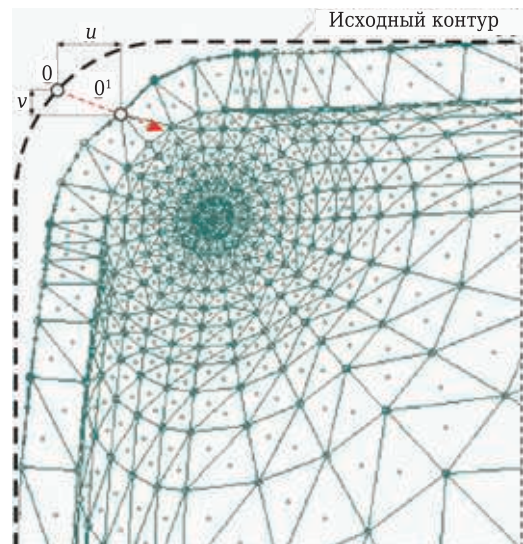


Рис. 1. Схема деформации ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 3 под действием комбинированной нагрузки

гих деформаций, причем наибольшие значения горизонтальных u и вертикальных v перемещений имеет точка 0, упруго перемещающаяся из исходного положения в точку 0'. Для выделенных КТ u и v уменьшаются при увеличении расстояния от них до точки 0. Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются.

Установлено, что под действием комбинированной нагрузки в ПС керамики всех систем формируются поля σ_i трех видов, причем вид этих полей в ПС керамики систем № 1 и 2 одинаков (рис. 2). В качестве примера на рис. 2, а показано поле σ_i в ПС керамики систем № 1 и 2, на рис. 2, б — системы № 3, на рис. 2, в — системы № 4. Видно, что эти поля различаются распределением σ_i в зерне, межзеренной фазе и слое матрицы, примыкающей к межзеренной фазе.

Характер изменения σ_i в разных поверхностях ПС шлифованной керамики под действием комбинированной нагрузки показан на рис. 3. Первая группа — графики для поверхностей C1–

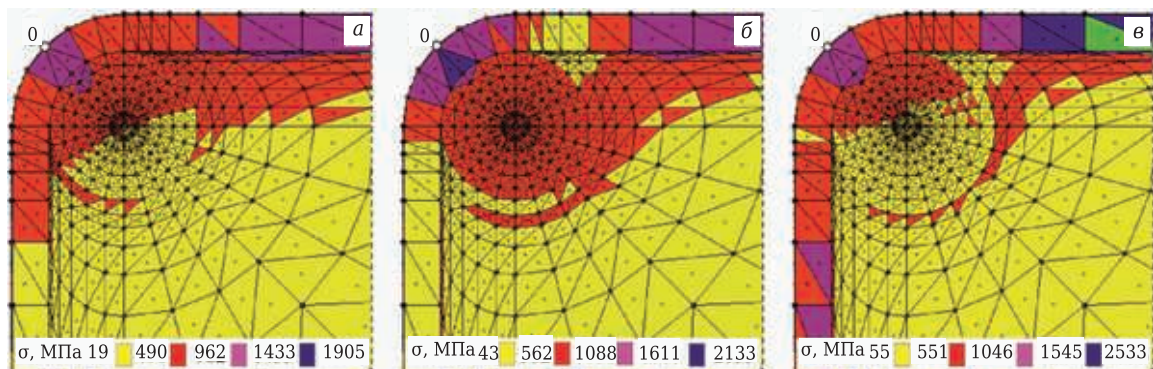


Рис. 2. Поля σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики систем № 1 и 2 (а), № 3 (б) и 4 (в) под действием комбинированной нагрузки

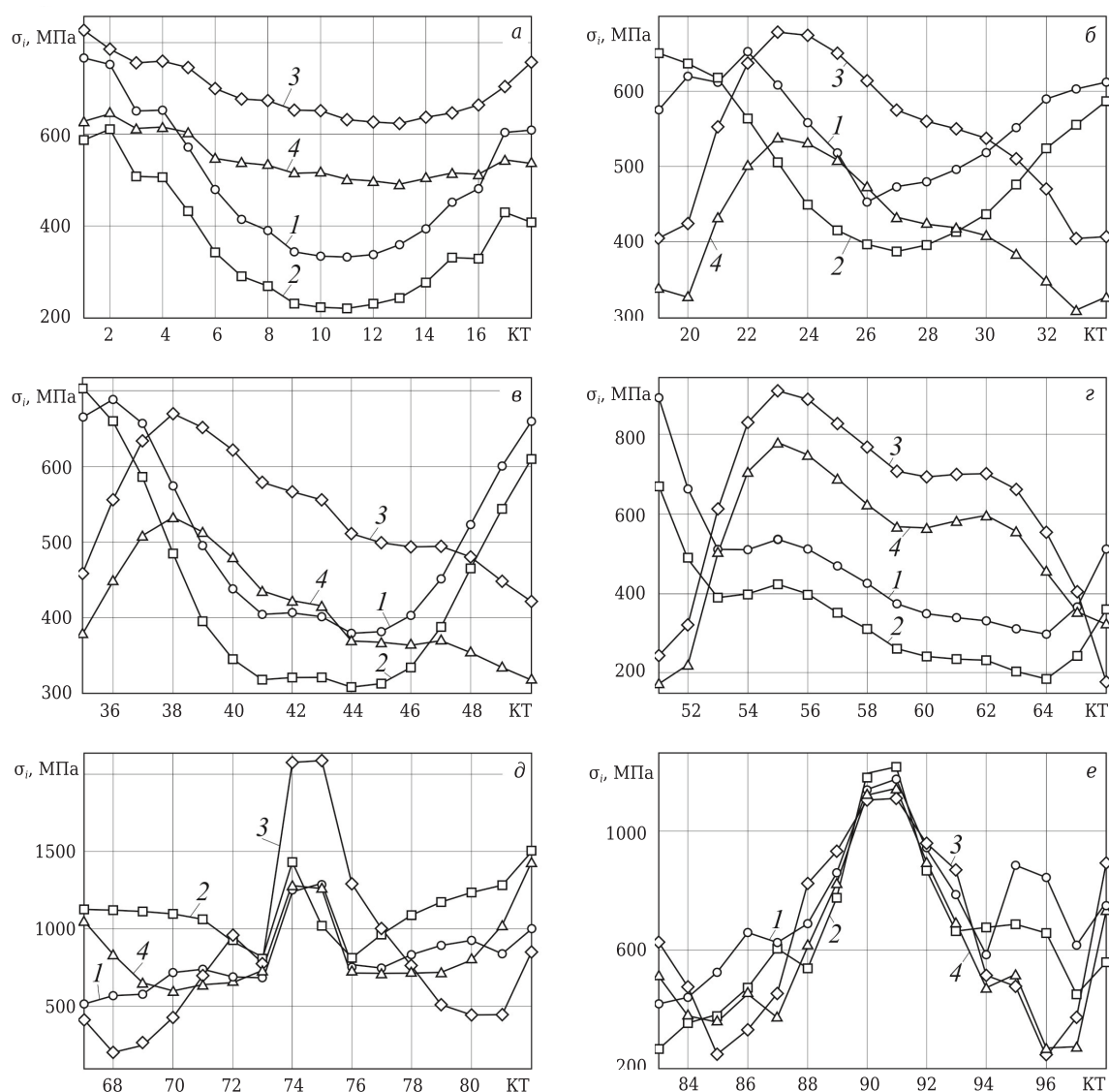


Рис. 3. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 (1–4) под действием комбинированной нагрузки

C4 (см. рис. 3, а–г) с кривыми одинаковой формы для систем № 1, 2 и № 3, 4. Особенность второй группы графиков для поверхностей C5 и C6 (см. рис. 3, д, е) — близкие по форме кривые в центральной части для всех систем.

Кривые изменения σ_i в КТ поверхности C1 ПС керамики систем № 1–4 показаны на рис. 3, а. Видно, что кривые для систем № 1, 2 имеют однотипную сглаженную форму с наименьшими значениями σ_i в КТ11, наибольшими — в КТ1 (для системы № 1) и КТ2 (для системы № 2). Кривые для систем № 3, 4 имеют более сглаженную форму с наименьшими значениями σ_i в КТ13, наибольшими — в КТ1. Установлено, что в поверхности C1 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 333 ($\sigma_{\text{мин}}$) до 765 МПа ($\sigma_{\text{макс}}$) при $\Delta\sigma_i = 432$ МПа и $M_e = 466$ МПа, системы № 2 — от 221 до 610 МПа при $\Delta\sigma_i = 389$ МПа и $M_e = 331$ МПа, системы № 3 — от 623 до 824 МПа при $\Delta\sigma_i = 201$ МПа и $M_e = 675$ МПа, системы № 4 — от 488 до 646 МПа при

$\Delta\sigma_i = 158$ МПа и $M_e = 534$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 1 и 3, наименьшими — системы № 4 и 2 соответственно; системы № 3 и 4 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$ и M_e . Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 2,7 и 2 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции для σ_i (0,98), значимым на уровне 0,05, характеризуется связь систем № 1, 2, наименьшим (0,83) — связь систем № 1, 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C2 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, б. Видно, что форма кривых для систем № 1 и 2 принципиально отличается от форма кривых для систем № 3 и 4. Кривые для систем № 1, 2 имеют однотипную сглаженную форму, особенностью которой является наибольшая σ_i в КТ22 (для системы № 1) и КТ19 (для системы № 2) с наименьшей σ_i в КТ26 (для системы № 1) и КТ27 (для системы № 2). Кривые для систем № 3, 4

также имеют однотипную сглаженную форму, особенностью которой является наибольшая σ_i в КТ23 и наименьшая в КТ33. В поверхности С2 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 453 до 652 МПа при $\Delta\sigma_i = 199$ МПа и $M_e = 567,5$ МПа, системы № 2 — от 389 до 651 МПа при $\Delta\sigma_i = 262$ МПа и $M_e = 490$ МПа, системы № 3 — от 404 до 679 МПа при $\Delta\sigma_i = 275$ МПа и $M_e = 552,5$ МПа, системы № 4 — от 309 до 540 МПа при $\Delta\sigma_i = 231$ МПа и $M_e = 420,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 3 и 1, наименьшими — системы № 1 и 4 соответственно. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 1,4 и 1,3 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,98) для σ_i характеризуется связь систем № 3 и 4; связь систем № 1 и 2 имеет коэффициент корреляции 0,88.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, в. Видно, что форма кривых для систем № 1 и 2 отличается от формы кривых для систем № 3 и 4. Кривые для систем № 1, 2 имеют сглаженную форму с наибольшей σ_i в КТ36 (для системы № 1) и КТ35 (для системы № 2), с наименьшей σ_i в КТ44. Кривые для систем № 3, 4 характеризуются наибольшей σ_i в КТ38 и наименьшей в КТ50. В поверхности С3 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 379 до 690 МПа при $\Delta\sigma_i = 311$ МПа и $M_e = 474$ МПа, системы № 2 — от 308 до 705 МПа при $\Delta\sigma_i = 397$ МПа и $M_e = 393,5$ МПа, системы № 3 — от 423 до 673 МПа при $\Delta\sigma_i = 250$ МПа и $M_e = 535,5$ МПа, системы № 4 — от 321 до 534 МПа при $\Delta\sigma_i = 213$ МПа и $M_e = 398,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 2 и 3, наименьшими — системы № 4 и 2 соответственно. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 1,9 и 1,4 раза. Связь систем № 1 и 2 (для σ_i) характеризуется коэффициентом корреляции 0,99, систем № 3 и 4 — коэффициентом корреляции 0,94.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, г. Видно, что форма кривых для систем № 1 и 2 отличается от формы кривых для систем № 3 и 4. Кривые для систем № 1, 2 характеризуются наибольшей σ_i в КТ51 и наименьшей в КТ64. Кривые для систем № 3, 4 имеют наибольшую σ_i в КТ55 и наименьшую в КТ51. В поверхности С4 ПС керамики системы № 1 σ_i изменяется от 300 до 891 МПа при $\Delta\sigma_i = 591$ МПа и $M_e = 447,5$ МПа, системы № 2 — от 185 до 669 МПа при $\Delta\sigma_i = 484$ МПа и $M_e = 331,5$ МПа, системы № 3 — от 175 до 908 МПа при $\Delta\sigma_i = 733$ МПа и $M_e = 696$ МПа, системы № 4 — от 174 до 776 МПа при $\Delta\sigma_i = 602$ МПа и $M_e = 564,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 1,2 и 2,1 раза. Связь систем № 1 и 2 (для σ_i) характе-

ризуется коэффициентом корреляции 0,99, систем № 3 и 4 — коэффициентом корреляции 0,98.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, д. Видно, что на всех кривых присутствует пик в КТ74–КТ75, а их периферийные пики стохастично изменяются. В поверхности С5 системы № 1 σ_i изменяется от 509 до 1274 МПа при $\Delta\sigma_i = 765$ МПа и $M_e = 732,5$ МПа, в системе № 2 — от 788 до 1502 МПа при $\Delta\sigma_i = 714$ МПа и $M_e = 1099,5$ МПа, в системе № 3 — от 189 до 2083 МПа при $\Delta\sigma_i = 1894$ МПа и $M_e = 703,5$ МПа, в системе № 4 — от 592 до 1422 МПа при $\Delta\sigma_i = 830$ МПа и $M_e = 713,5$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 3 и 2 соответственно, наименьшим $\Delta\sigma_i$ — система № 2, наименьшей M_e — система № 3. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, в 2,7 и 1,6 раза соответственно. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,59) для σ_i имеет связь систем № 1 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 ПС керамики систем № 1–4 показан на рис. 3, е. Видно, что кривые для всех систем имеют практически одинаковую форму с пиком в КТ90–КТ91. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется от 417 до 1160 МПа при $\Delta\sigma_i = 743$ МПа и $M_e = 714$ МПа, системы № 2 — от 265 до 1215 МПа при $\Delta\sigma_i = 950$ МПа и $M_e = 631$ МПа, системы № 3 — от 247 до 1110 МПа при $\Delta\sigma_i = 863$ МПа и $M_e = 568$ МПа, системы № 4 — от 258 до 1139 МПа при $\Delta\sigma_i = 881$ МПа и $M_e = 513$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ и M_e характеризуются системы № 2 и 1, наименьшими $\Delta\sigma_i$ и M_e — системы № 1 и 4 соответственно. Наибольшие значения $\Delta\sigma_i$ и M_e выше, чем наименьшие, соответственно в 1,3 и 1,4 раза. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,96) для σ_i характеризуется связь систем № 3 и 4, наименьшим (0,63) — связь систем № 1 и 3.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики систем № 1–4 под действием комбинированной нагрузки показаны на рис. 4. Видно, что значения σ_i во всех поверхностях являются нормально распределенными, однако форма кривых распределения σ_i в КТ свидетельствует о существенных различиях в статистических характеристиках для разных систем.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 ПС керамики системы № 1 показано на рис. 4, а. Установлено, что в поверхности С1 $\sigma_{ср} = 495,3$ МПа при $s = 146,2$, в поверхности С2 $\sigma_{ср} = 557,9$ МПа при $s = 61,4$, в поверхности С3 $\sigma_{ср} = 509,4$ МПа при $s = 115,5$, в поверхности С4 $\sigma_{ср} = 462,7$ МПа при $s = 152,9$, в поверхности С5 $\sigma_{ср} = 806,9$ МПа при $s = 221,8$, в поверхности С6 $\sigma_{ср} = 742$ МПа при $s = 219,7$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 1 характеризуется поверхность С5, наименьшими — поверхности С4 и С2 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,7 и 3,6 раза.

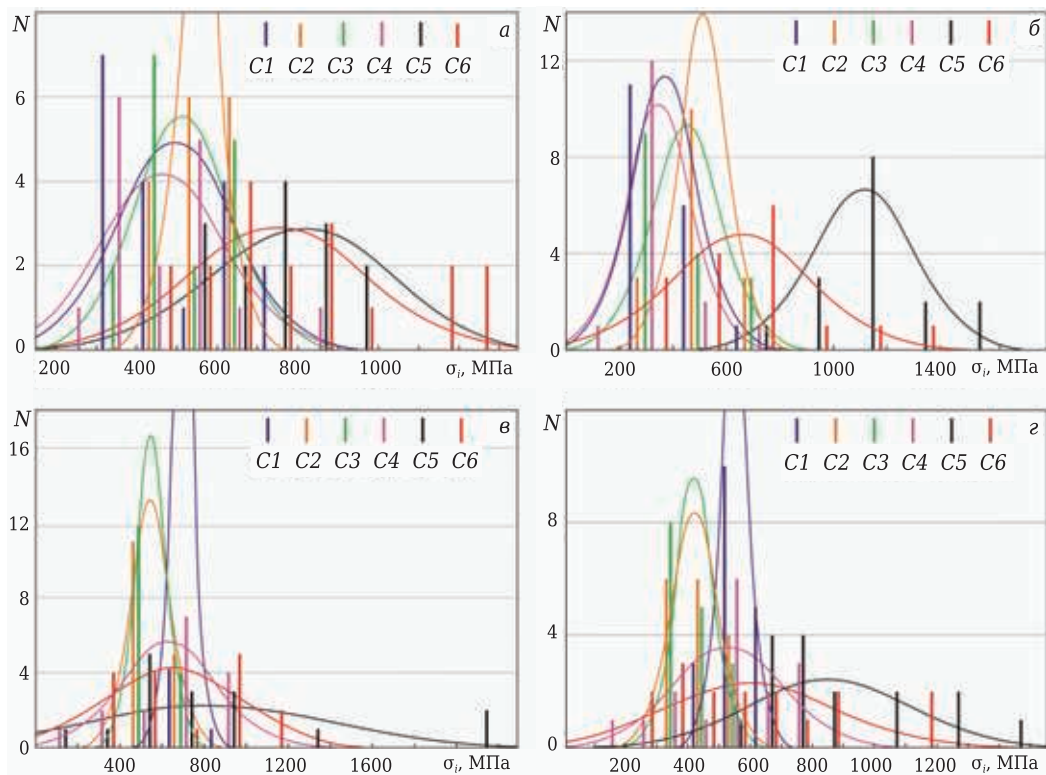


Рис. 4. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей C1–C6 керамики систем № 1–4 (а–г) под действием комбинированной нагрузки

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 2 показано на рис. 4, б. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 359,7$ МПа при $s = 127,2$, в поверхности C2 — $\sigma_{ср} = 501,4$ МПа при $s = 91,7$, в поверхности C3 — $\sigma_{ср} = 444,9$ МПа при $s = 137,5$, в поверхности C4 — $\sigma_{ср} = 337,2$ МПа при $s = 125,8$, в поверхности C5 — $\sigma_{ср} = 1103,3$ МПа при $s = 192,5$, в поверхности C6 — $\sigma_{ср} = 645,3$ МПа при $s = 268,1$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 2 характеризуются поверхности C5 и C6, наименьшими — поверхности C4 и C2 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 3,3 и 2,9 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 3 показано на рис. 4, в. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 694,4$ МПа при $s = 61,2$, в поверхности C2 — $\sigma_{ср} = 541,6$ МПа при $s = 96,8$, в поверхности C3 — $\sigma_{ср} = 542,9$ МПа при $s = 76,8$, в поверхности C4 — $\sigma_{ср} = 624,6$ МПа при $s = 226,2$, в поверхности C5 — $\sigma_{ср} = 815,3$ МПа и $s = 570,7$, в поверхности C6 — $\sigma_{ср} = 651$ МПа при $s = 299,7$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 3 характеризуется поверхность C5, наименьшими — поверхности C2 и C1 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 1,5 и 9,3 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 ПС керамики системы № 4 показано на рис. 4, г. Установлено, что в поверхности C1 $\sigma_{ср} = 546,3$

МПа при $s = 49,7$, в поверхности C2 — $\sigma_{ср} = 419,3$ МПа при $s = 76,5$, в поверхности C3 — $\sigma_{ср} = 415,1$ МПа при $s = 66,8$, в поверхности C4 — $\sigma_{ср} = 525,9$ МПа при $s = 179,2$, в поверхности C5 — $\sigma_{ср} = 853,6$ МПа при $s = 263,1$, в поверхности C6 — $\sigma_{ср} = 598,7$ МПа при $s = 277$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s в системе № 4 характеризуются поверхности C5 и C6, наименьшими — поверхности C3 и C1 соответственно. Наибольшие значения $\sigma_{ср}$ и s выше, чем наименьшие, соответственно в 2,1 и 5,6 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены основные закономерности распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики в условиях совместного действия теплового потока, сосредоточенной и распределенной силы. Проанализированы особенности напряженного состояния в разных поверхностях четырех систем керамики. 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 в этих локальных областях. 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. При этом системы в разной степени реагируют на

действие комбинированной нагрузки: наибольшей неоднородностью напряжений характеризуется система № 3, наименьшей — система № 4.

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

Библиографический список

1. **Lengauer, M.** Silicon nitride tools for the hot rolling of high-alloyed steel and superalloy wires — crack growth and lifetime prediction / *M. Lengauer, R. Danzer* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28. — P. 2289–2298.
2. **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.
3. **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.
4. **Khadera, Iyas.** Characterization of a silicon nitride ceramic material for ceramic springs / *Iyas Khadera, Christof Koplin, Christian Schröder* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2020. — Vol. 40, № 10. — P. 3541–3554.
4. **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.
5. **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.
5. **Zhao, Bin.** High temperature tribological properties of silicon nitride in dry sliding contact against Inconel 718 heated by laser / *Bin Zhao, Iyas Khaderb. Rahul Raga* [et al.] // Wear. — 2019. — Vol. 434/435. — P. 203000.
6. **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.
7. **Кузин, В. В.** Трибологический аспект в технологическом обеспечении качества керамических деталей / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев* // Новые огнеупоры. — 2019. — № 5. — С. 122–126.
7. **Liu, Ning.** Tribochemical aspects of silicon nitride ceramic sliding against stainless steel under the lubrication of seawater / *Ning Liu, Jianzhang Wang, Beibei Chen* [et al.] // Tribology International. — 2013. — Vol. 61. — P. 205–213.
8. **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.
9. **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.
9. **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. Фёдоров* // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

10. **Harrer, Walter.** Influence of surface defects on the biaxial strength of a silicon nitride ceramic — increase of strength by crack healing / *Walter Harrer, Robert Danzer, R. Morrell* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 27–35.
11. **Lu, Tao.** Fabrication of high thermal conductivity silicon nitride ceramics by pressureless sintering with MgO and Y₂O₃ as sintering additives / *Tao Lu, Tun Wang, Yingfei Jia* [et al.] // Ceram. Int. — 2020. — Vol. 46, № 17. — P. 27175–27183.
12. **Kuzin, V. V.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / *V. V. Kuzin* // Russ. Eng. Res. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.
13. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.
13. **Bao, Y.** Strength degradation and lifetime prediction of HP-Si₃N₄/TiC under static load at 1200 °C / *Y. Bao, Z. Jin, L. Sun* // Mater. Lett. — 2000. — Vol. 45, № 1. — P. 27–31.
14. **Maniette, Y.** Fracture toughness and crack bridging of a silicon nitride ceramic / *Y. Maniette, M. Inagaki, M. Sakai* // J. Eur. Ceram. Soc. — 1991. — Vol. 7, № 4. — P. 255–263.
15. **Westman, Anna-Karin.** Interaction of encapsulation glass and silicon nitride ceramic during HIPing / *Anna-Karin Westman, Hans T. Larker* // J. Eur. Ceram. Soc. — 1999. — Vol. 19, № 16. — P. 2739–2746.
16. **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.
17. **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.
17. **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.
18. **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.
18. **Kuzin, V.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / *V. Kuzin* // Key Eng. Mater. Precision Machining. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.
19. **Sun, Jian.** Analysis of surface morphology and roughness on Si₃N₄ ceramic grinding / *Jian Sun, Yuhou Wu, Peng Zhou* [et al.] // Academic Journal of Manufacturing Engineering. — 2018. — Vol. 16, № 3. — P. 20–28.
20. **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.
21. **Kuzin, V. V.** Evaluation of ceramic tool reliability with a limited number of tests based on established wear criteria / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 4. — P. 386–390.
22. **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.

22. **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.

23. **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.

24. **Кузин, В. В.** Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 12. — С. 54–60.

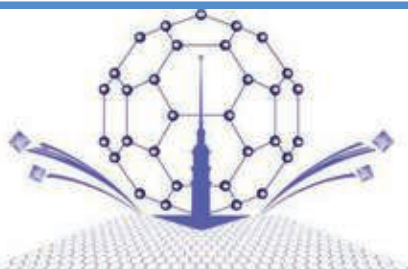
25. **Кузин, В. В.** Тепловой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2021. — № 1. — С. 61–68.

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

Получено 05.02.21

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



15-я международная конференция «Advanced Carbon NanoStructures 2021» (ACNS'2021)

28.06.2021–02.07.2021
Санкт-Петербург, Россия

Организаторы:

Институт Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», Москва, Россия
Петербургский институт ядерной физики
имени Б. П. Константинова, Россия
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт
(технический университет), Россия

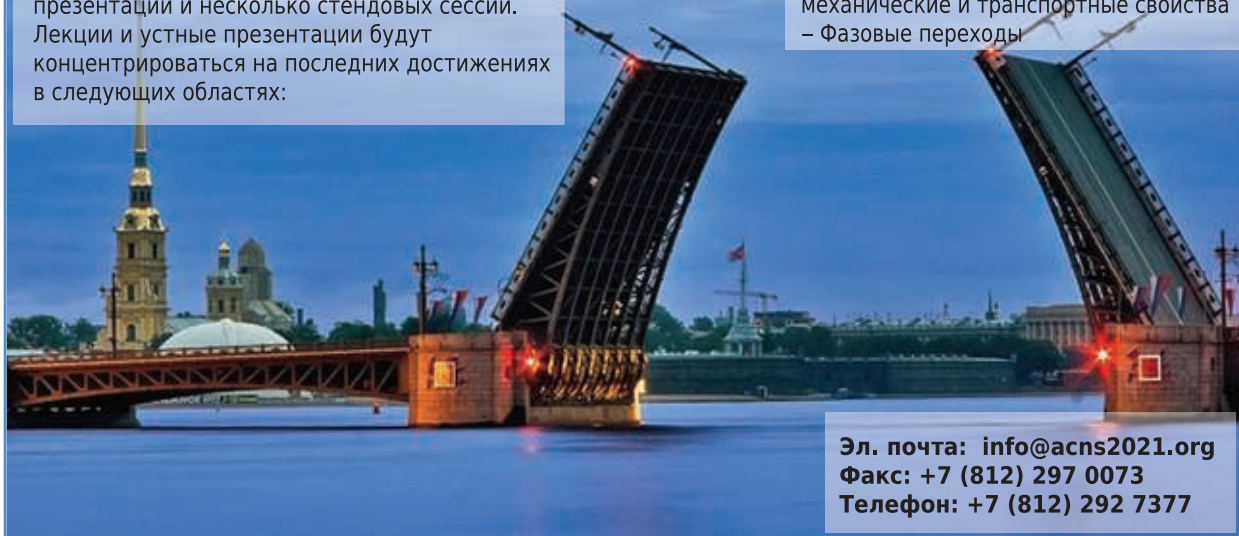
Программа традиционно будет включать лекции приглашенных спикеров, устные презентации и несколько стендовых сессий. Лекции и устные презентации будут концентрироваться на последних достижениях в следующих областях:

Материалы:

- * Фуллерены
- * Углеродные нанотрубки
- * Графен
- * Наноалмазные частицы
- * Линейные атомы углерода
- * Углерод на основе карбида
- * Композиты на основе нанолуглеродов

Явления:

- Синтез
- Электронные, магнитные, оптические, механические и транспортные свойства
- Фазовые переходы



Эл. почта: info@acns2021.org
Факс: +7 (812) 297 0073
Телефон: +7 (812) 292 7377