

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].017:539.375

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

С использованием базовых положений компьютерной инженерии изучено напряженное состояние поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки. Выявлено формирование микроструктурных концентраторов напряжений в точке приложения сосредоточенной силы, приводящих к изменению структуры керамики за счет образования несплошностей.

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

ВВЕДЕНИЕ

Изменение структуры поверхностного слоя (ПС) керамики под действием эксплуатационных нагрузок является начальной стадией сложного и продолжительного процесса выхода изделия из работоспособного состояния [1–8]. Исследования изделий из оксидной, нитридной и карбидной керамики в разных условиях эксплуатации показали, что механизм изменения структуры ПС керамики заключается в спонтанном образовании видимых и скрытых дефектов, имеющих разную форму и размеры, как в изолированных областях, так и в смежных [9–11].

Кинетика этого процесса включает три взаимосвязанных этапа [12, 13]. Первый — формирование напряженно-деформированного состояния ПС керамики под действием внешней нагрузки. Второй — первичная трансформация исходной структуры ПС керамики за счет появления единичных дефектов в виде несплошностей в результате упругих смещений контактирующих частиц. Третий — накопление и объединение несплошностей с образованием зародышевых трещин. Главным негативным последствием этого циклически повторяющегося механизма является моментальное формирование структурных концентраторов напряжений вокруг вновь образовавшихся несплошностей

[14]. Увеличение числа несплошностей и, соответственно, микроструктурных концентраторов напряжений «ухудшает» напряженное состояние и создает благоприятные условия для спонтанного образования новых дефектов [15, 16].

Роль каждого этапа в изменении структуры ПС керамики при ее эксплуатации интуитивно понятна. Однако ограниченный объем знаний о взаимодействии сложных явлений на этих этапах, а также отсутствие данных о влиянии трансформированной структуры на напряженное состояние не позволяют построить обобщенную модель эксплуатации керамических изделий. Особого внимания требует взаимосвязь структуры ПС, трансформированной под действием технологических и эксплуатационных нагрузок, с напряженным состоянием. Эта взаимосвязь детально исследована в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики с использованием базовых положений компьютерной инженерии [17]. Систематизированные результаты силового, теплового, комбинированного и системного анализов напряженно-деформированного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики показали глубокое понимание процесса изменения его структуры под действием эксплуатационных нагрузок [18–21]. Для Si_3N_4 -TiC-керамики аналогичные исследования ранее не выполнялись.

В настоящей работе поставлена цель — изучить характер распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием силовой, тепловой и комбинированной нагрузки для выявления особенностей процесса изменения структуры ПС керамики при ее эксплуатации. Результаты исследований будут изложены в четырех статьях. В настоящей статье



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

приведены результаты численных экспериментов с использованием силовой нагрузки.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термopочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы № 1 и метода контрольных точек (КТ) [17, 22]. Исследовали характер изменения 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 сосредоточенной ($F = 0,02 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$) и распределенной ($P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$) силы. Анализ статистических характеристик (наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$ значения σ_i , диапазон изменения значений $\Delta\sigma_i$ и стандартное отклонение s для σ_i) в КТ каждой поверхности выполнен с использованием программного комплекса Statistica. Более подробно методика численных экспериментов приведена в статье [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерная схема деформации ПС шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики (на примере системы № 1) под действием силовой нагрузки показана на рис. 1, а. Видно, что точка 0, к которой приложена сосредоточенная сила, перемещается с некоторым отклонением от направления сосредоточенной силы и имеет наибольшие значения горизонтальных u и вертикальных v перемещений среди всех КТ. Значения u и v для этих КТ уменьшаются с увеличением расстояния от них до точки 0.

Поля σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики всех систем, образовавшиеся при одновременном воздействии сосредоточенной и распределенной силы, однотипны. В качестве примера на рис. 1, б показано поле σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки. Видно, что наиболее сложное напряженное состояние формируется в верхней части ПС в области, к которой

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

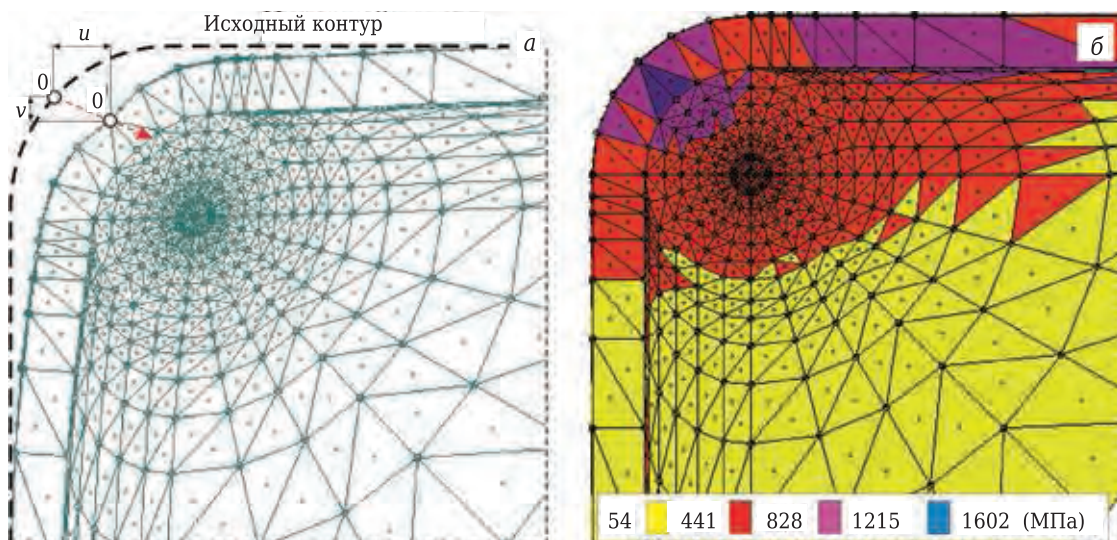


Рис. 1. Схема деформации и поле интенсивности напряжений σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки

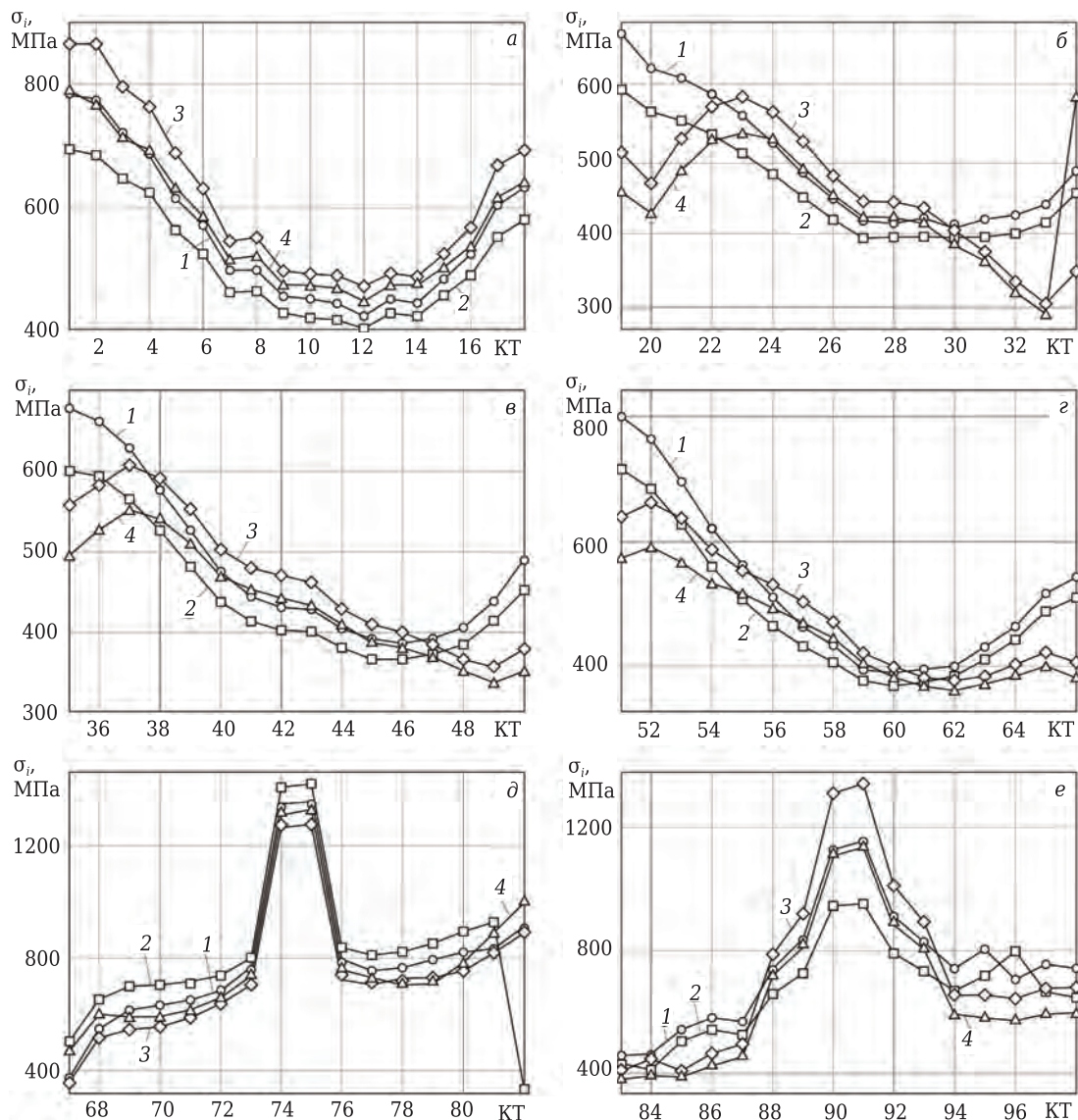


Рис. 2. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 (1–4) под действием силовой нагрузки

приложена силовая нагрузка. Наибольшая σ_i (до 1600 МПа) формируется в локальной области слоя, на которую действует сосредоточенная сила, а во внутреннем объеме керамики σ_i не превышает 441 МПа.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C1 Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, а. Видно, что все кривые одинаковы по форме; в КТ1 зафиксированы наибольшие значения σ_i , а в КТ12 — наименьшие. В поверхности C1 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 425 ($\sigma_{\text{мин}}$) до 781 МПа ($\sigma_{\text{макс}}$) при $\Delta\sigma_i = 356$ МПа, системы № 2 — от 401 до 696 МПа при $\Delta\sigma_i = 295$ МПа, системы № 3 — от 469 до 862 МПа при $\Delta\sigma_i = 393$ МПа, системы № 4 — от 446 до 783 МПа при $\Delta\sigma_i = 337$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 4 имеют проме-

жуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 1 эти значения несколько выше, чем у системы № 4. Связь для σ_i в этой поверхности всех систем имеет наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C2 Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, б. Видно, что в центральной области этой поверхности (КТ20–КТ33) форма всех кривых одинакова, а на периферийных участках (КТ19–КТ23 и КТ33–КТ34) форма кривых для систем № 1 и 2 отличается от формы кривых для систем № 3 и 4. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ19 (для систем № 1 и 2) и КТ23 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ27 (для систем № 1 и 2) и КТ33 (для систем № 3 и 4). В поверхности C2 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 415 до 677 МПа при $\Delta\sigma_i = 262$ МПа, систе-

мы № 2 — от 394 до 604 МПа при $\Delta\sigma_i = 210$ МПа, системы № 3 — от 304 до 590 МПа при $\Delta\sigma_i = 286$ МПа, системы № 4 — от 290 до 592 МПа при $\Delta\sigma_i = 302$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 4, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 3 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 1. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i имеет связь систем № 1 и 2, наименьший (0,5) — связь систем № 1 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, в. Видно, что центральная часть кривых от КТ38 до КТ46 имеет одинаковую форму, а их периферийные участки по форме различаются. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ35 (для систем № 1 и 2) и КТ37 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ46 (для систем № 1 и 2) и КТ49 (для систем № 3 и 4). В поверхности С3 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 388 до 677 МПа при $\Delta\sigma_i = 289$ МПа, системы № 2 — от 369 до 600 МПа при $\Delta\sigma_i = 231$ МПа, системы № 3 — от 359 до 609 МПа при $\Delta\sigma_i = 250$ МПа, системы № 4 — от 341 до 554 МПа при $\Delta\sigma_i = 195$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 3 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 2. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,89) — связь систем № 3 и 4, № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, г. Видно, что форма всех кривых идентична форме кривых для системы С3. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ51 (для систем № 1 и 2) и КТ52 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ61 (для систем № 1 и 2) и КТ62 (для систем № 3 и 4). В поверхности С4 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 392 до 801 МПа при $\Delta\sigma_i = 409$ МПа, системы № 2 — от 371 до 717 МПа при $\Delta\sigma_i = 346$ МПа, системы № 3 — от 378 до 659 МПа при $\Delta\sigma_i = 281$ МПа, системы № 4 — от 363 до 591 МПа при $\Delta\sigma_i = 228$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 2 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 3. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,86) — связь систем № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием

силовой нагрузки показан на рис. 2, д. Видно, что форма этих кривых принципиально отличается от формы кривых для поверхностей С1–С4 присутствием пика в КТ73–КТ76. Соответственно в этих КТ формируются наибольшие значения σ_i для всех систем, а в КТ67 (для систем № 1, 3 и 4) и КТ82 (для системы № 2) — наименьшие. Во всех КТ поверхности С5 керамики значения σ_i для разных систем очень близки: σ_i системы № 1 изменяется в диапазоне от 374 до 1347 МПа при $\Delta\sigma_i = 973$ МПа, системы № 2 — от 104 до 1428 МПа при $\Delta\sigma_i = 1324$ МПа, системы № 3 — от 360 до 1284 МПа при $\Delta\sigma_i = 924$ МПа, системы № 4 — от 472 до 1340 МПа при $\Delta\sigma_i = 868$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 2, наименьшими — система № 4. Системы № 1 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 1 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 3. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 3, наименьший (0,62) — связь систем № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, е. Видно, что форма кривых сходна с формой кривых для поверхности С5 при значительно большей ширине основания пика. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется во всех системах в КТ91, наименьшая — в КТ83. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 448 до 1148 МПа при $\Delta\sigma_i = 700$ МПа, системы № 2 — от 405 до 954 МПа при $\Delta\sigma_i = 549$ МПа, системы № 3 — от 415 до 1341 МПа при $\Delta\sigma_i = 926$ МПа, системы № 4 — от 391 до 1138 МПа при $\Delta\sigma_i = 747$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 4 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 4 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 1. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,86) — связь систем № 2 и 3, № 2 и 4.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показаны на рис. 3. Для всех распределений 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 Si₃N₄-TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, а. Установлено, что в поверхности С1 среднее значение σ_i (далее σ_{cp}) составляет 559,8 МПа при $s = 119$ %,

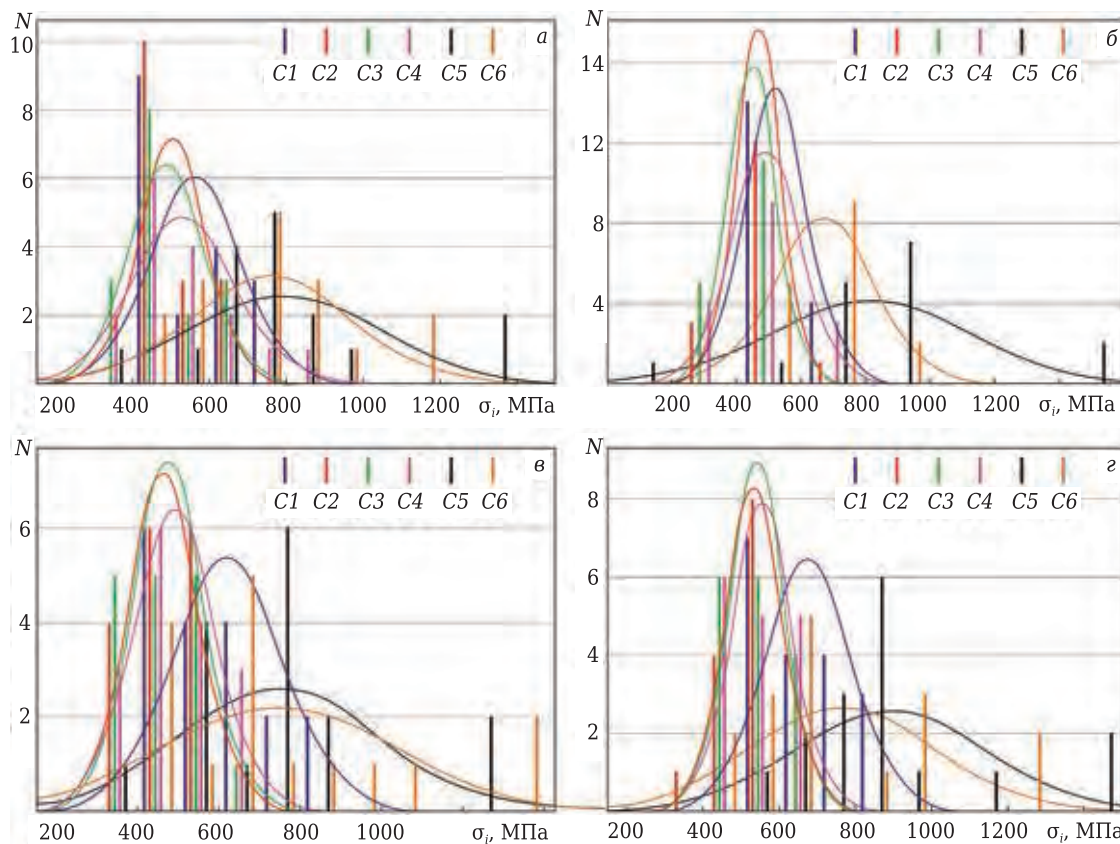


Рис. 3. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей C1–C6 керамики систем № 1–4 (а–г) под действием силовой нагрузки

в поверхности C2 — 501,9 МПа при $s = 89,2 \%$, в поверхности C3 — 485,1 МПа при $s = 99,7 \%$, в поверхности C4 — 526 МПа при $s = 131,8 \%$, в поверхности C5 — 792,1 МПа при $s = 250,9 \%$, в поверхности C6 — 754,3 МПа при $s = 202,6 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 1 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} — поверхность C3, наименьшими s — поверхность C2. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,6 раза, соответственно для s — в 2,8 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 2 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, б. В поверхности C1 σ_{cp} составляет 515 МПа при $s = 97,7 \%$, в поверхности C2 — 464,1 МПа при $s = 72,5 \%$, в поверхности C3 — 448,6 МПа при $s = 81,1 \%$, в поверхности C4 — 486,5 МПа при $s = 111,0 \%$, в поверхности C5 — 810,8 МПа при $s = 308,5 \%$, в поверхности C6 — 667,5 МПа при $s = 155,7 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 2 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} — поверхность C3, наименьшими s — поверхность C2. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,8 раза, соответственно для s — в 4,3 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 3 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, в. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет

616,2 МПа при $s = 133,6 \%$, в поверхности C2 — 462,4 МПа при $s = 89,3 \%$, в поверхности C3 — 472,1 МПа при $s = 86,3 \%$, в поверхности C4 — 488,2 МПа при $s = 99,8 \%$, в поверхности C5 — 745,8 МПа и $s = 245,7 \%$, в поверхности C6 — 741,9 МПа при $s = 291,9 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 3 характеризуются поверхности C5 и C6, наименьшими — поверхности C3 и C2 соответственно. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,6 раза, соответственно для s — в 3,4 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 4 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, г. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет 571,7 МПа при $s = 111,3 \%$, в поверхности C2 — 447,8 МПа при $s = 81,9 \%$, в поверхности C3 — 439,7 МПа при $s = 71,5 \%$, в поверхности C4 — 453,2 МПа при $s = 80,9 \%$, в поверхности C5 — 788 МПа при $s = 249 \%$, в поверхности C6 — 660,6 МПа при $s = 241,8 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 4 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} и s — поверхность C3. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,8 раза, соответственно для s — в 3,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования характера распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 –

TiC-керамики четырех систем под действием силовой нагрузки установлено, что наибольшие напряжения формируются в локальных объемах поверхностей C5 и C6, находящихся в непосредственной близости от точки приложения сосредоточенной силы. Напряженное состояние этих поверхностей принципиально отличается от напряженного состояния поверхностей C1–C4, о чем свидетельствует вид кривых изменения σ_i в КТ. Кривые изменения σ_i в КТ поверхностей C5–C6 имеют пики в центральной части, характеризующие появление микроструктурных концентраторов напряжений в этих областях, и, соответственно, высокую вероятность образования эксплуатационных дефектов в виде несплошностей. Кривые изменения σ_i в КТ поверхностей C1–C4 имеют простой вид с наименьшими значениями σ_i в центральной части, что свидетельствует о значительном уменьшении влияния сосредоточенной силы на напряженное состояние внутреннего объема Si₃N₄-TiC-керамики.

Статистический анализ, выполненный раздельно для поверхностей C1–C4, C5–C6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4, показал сле-

дующее. В поверхностях C1–C4 значения σ_i изменяются от 290 (поверхность C2 в системе № 4) до 862 МПа (поверхность C1 в системе № 3) при средней σ_i по 16 поверхностям 496,1 МПа; значения s изменяются от 71,5 (поверхность C3 в системе № 4) до 133,6 % (поверхность C1 в системе № 3) при среднем s по 16 поверхностям 97,3 %. В поверхностях C5–C6 значения σ_i изменяются от 104 (поверхность C5 в системе № 2) до 1428 МПа (поверхность C5 в системе № 2) при средней σ_i по 8 поверхностям 745,1 МПа; значения s изменяются от 155,7 (поверхность C6 в системе № 2) до 308,5 % (поверхность C5 в системе № 2) при среднем s по 8 поверхностям 243,3 %.

Эти результаты указывают на высокую вероятность появления несплошностей в ПС детали из Si₃N₄-TiC-керамики под действием силовой нагрузки на границе поверхностей C5 и C6 в зоне приложения сосредоточенной силы.

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

Библиографический список

1. **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.
2. **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.
3. **Torrecillas, San Millan R.** Specifics of wear of ceramic cutting tool inserts featuring Al₂O₃-TiC dies when face milling hardened cast iron / San Millan R. Torrecillas, A. E. Seleznev, V. D. Gurin [et al.] // *Materials Science Forum*. — 2016. — Vol. 876. — P. 43–49.
4. **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.
5. **Zhao, Jun.** Cutting performance and failure mechanisms of an Al₂O₃/WC/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.
6. **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.
7. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // *Трение и износ*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.
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. **Volosova, M. A.** Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / M. A. Volosova,

V. V. Kuzin // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

Волосова, М. А. Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // *Металловедение и термическая обработка*. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

8. **Kuzin, V. V.** Service-induced damages of the ceramic thrust bearing pivot in the seal section of electrical centrifugal pump system / V. V. Kuzin, S. Y. Fedorov, V. L. Reutov [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 564–568.

Кузин, В. В. Эксплуатационные повреждения пяты упорного керамического подшипника в узле гидрозаклещи установки электроцентробежных насосов / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, В. Л. Реутов [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2018. — № 1. — С. 63–67.

9. **Song, S.** Performance optimization of complicated structural SiC/Si composite ceramics prepared by selective laser sintering / S. Song, B. Lu, L. Wang [et al.] // *Ceram. Int.* — 2020. — Vol. 46, № 1. — P. 568–575.

10. **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.

11. **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.

12. **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, № 1. — 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.

13. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 2 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 2. — P. 178–182.

Кузин, В. В. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 2 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 3. — С. 50–55.

14. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.

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

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

17. **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.

18. **Kuzin, V. V.** Computer engineering of the surface layer of ground Al_2O_3 -TiC ceramics. Force analysis / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 413–417.

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.

19. **Kuzin, V. V.** Computer engineering of the surface layer of ground Al_2O_3 -TiC ceramics. Thermal analysis / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 418–423.

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.

20. **Кузин, В. В.** Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Комбинированный анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 9. — С. 67–72.

21. **Кузин, В. В.** Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Системный анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 10. — С. 65–71.

22. **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 14.12.20

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Nano Tech 2021

Международная выставка-конференция нанотехнологий



International Nanotechnology Exhibition & Conference
nano tech 2021
国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議

27–29 января 2021 г.
Токио, Япония

Нanomатериалы:

фуллерен, углеродные нанотрубки, фотонные, композиционные, высокочистые, биосовместимые, нанокompозитные материалы, высокопроизводительные магнитные материалы, высокочистые нанопокpытия, наночернила, наночастицы, графен, целлюлозные нановолокна

Оценка и измерение:

SPM / AFM, сверхточные измерительные приборы, электронные микроскопы (SEM / TEM), высокоэффективные / высокочувствительные датчики, молекулярная визуализация, измерительные инструменты для оценки и проектирования, симуляция, программное обеспечение для молекулярного проектирования

Технология изготовления:

наночастичная смесь / дисперсия, литография следующего поколения, наноимпринт, лазерная обработка, обработка электронным/ионным лучом, технология слияния / связывания, травление, обработка загрязненных зарядов, технология изготовления тонкой пленки, технология ультраточной обработки поверхности, технология нанотранзисторов, точные технологии печати шаблонов, 3D-принтеры

<https://www.nanotechexpo.jp/>