

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. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Систематизированы результаты силового, теплового и комбинированного анализов напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики. Взаимосвязи, выявленные при системном анализе данных, являются базой для уточнения физических моделей разрушения изделий из  $Al_2O_3$ –TiC-керамики при эксплуатации.

**Ключевые слова:** системный анализ, компьютерная инженерия,  $Al_2O_3$ –TiC-керамика, поверхностный слой (ПС), интенсивность напряжений, статистическая характеристика.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание технологии изготовления высокоточных керамических изделий предполагает выполнение специального комплекса экспериментально-теоретических исследований [1–3]. Установлено [4, 5], что под действием комплекса тепловых и силовых нагрузок при шлифовании на поверхности  $Al_2O_3$ –TiC-керамики образуется поверхностный слой (ПС), состоящий из четырех подслоев, каждый из которых имеет оригинальную структуру, отличающуюся от исходной структуры спеченной керамики. ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики, являясь неотъемлемой частью изготовленных изделий, значительно влияет на характер их износа и разрушения при эксплуатации [6].

В основе разрушения ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики находится взаимосвязь специфическое напряженно-деформированное состояние — элементарный акт разрушения, определяющая одновременное образование эксплуатационных дефектов в изолированных областях [7]. Трудности, возникшие при описании этой взаимосвязи, были решены с использованием созданной методологии компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики, контактирующего с упругим телом [8, 9]. Эта методология, реализованная в виде со-

вокупности расчетных схем и автоматизированной системы термпрочностных расчетов, апробирована при изучении ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики. Основные закономерности напряженно-деформированного состояния внешнего и внутреннего подслоев ПС этой керамики при силовом (СА — силовое нагружение), тепловом (ТА — тепловое нагружение) и комбинированном (КА — силовое и тепловое нагружение) анализах приведены в статьях [10–12]. Несмотря на достаточно глубокое изучение напряженного состояния ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики эти результаты не были сведены в стройную систему, что уменьшало их информативность для практических приложений.

Цель настоящей работы — установить степень влияния разных видов нагружения на напряженное состояние ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики с использованием систематизированных результатов расчетов интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в контрольных точках (КТ) при СА, ТА и КА.

Статья является заключительной в цикле публикаций [10–12].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Систематизация результатов численных экспериментов выполнена с использованием четырех статистических характеристик (наименьшие  $\sigma_{\min}$ , наибольшие  $\sigma_{\max}$ , средние  $\sigma_{\text{ср}}$  и стандартное отклонение  $s$  для  $\sigma_i$ ), рассчитанных при СА, ТА и КА в КТ ПС шлифованной  $Al_2O_3$ –TiC-керамики [10–12]. В систематизированном виде эти данные представлены в виде 24 столбчатых диаграмм, классифицированных на четыре группы по чис-



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

лу статистических характеристик. Каждая группа состоит из шести диаграмм по числу поверхностей с выделенными КТ ( $C1$  — поверхность зерна, примыкающего к межзеренной фазе;  $C2$  — поверхность межзеренной фазы, примыкающей к зерну;  $C3$  — поверхность межзеренной фазы, примыкающей к матрице;  $C4$  — поверхность матрицы, примыкающей к межзеренной фазе;  $C5$  — поверхности зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к пластически деформированному слою;  $C6$  — поверхность слоя, примыкающего к зерну, межзеренной фазе и матрице). На каждой диаграмме приведены четыре блока из трех столбцов, причем каждый блок характеризует определенную систему ПС шлифованной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики (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).

Разработанная методика анализа степени влияния разных видов нагружения на статистические характеристики для  $\sigma_i$  предусматривала качественную и количественную оценку. Качественная оценка проведена как в поверхностях, так и в системах ПС шлифованной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики с выделением вида нагружения, при котором зафиксированы наибольшее значение статистической характеристики и последовательность ее уменьшения. Для количественной оценки использовали коэффициент, характеризующий отношение значений определенной статистической характеристики при двух разных нагружениях в фиксированной поверхности. Этот коэффициент обозначен  $K_{ijl}$ , где  $i$  — номер отношения «видов анализов» (1 — TA/CA, 2 — KA/CA, 3 — KA/TA);  $j$  — номер статистической характеристики (1 —  $\sigma_{мин}$ , 2 —  $\sigma_{макс}$ , 3 —  $\sigma_{ср}$ , 4 —  $s$ );  $l$  — обозначение поверхности (1–6 — поверхности  $C1$ – $C6$  соответственно). Например, коэффициент  $K_{212}$  определяет значение отношения  $\sigma_{мин}$  при TA к  $\sigma_{мин}$  при CA в поверхности  $C2$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диаграммы, определяющие влияние вида нагружения на  $\sigma_{мин}$ ,  $\sigma_{макс}$ ,  $\sigma_{ср}$  и  $s$  для  $\sigma_i$  в поверхностях  $C1$ – $C6$  ПС шлифованной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики систем № 1–4, показаны на рис. 1–4. Результаты свидетельствует: (1) о заметных различиях в значениях статистических характеристик  $\sigma_{мин}$ ,  $\sigma_{макс}$ ,  $\sigma_{ср}$  и  $s$  для  $\sigma_i$  для системы № 1 и систем № 2–4; (2) о внешне хаотичном влиянии вида нагружения на  $\sigma_{мин}$ ,  $\sigma_{макс}$ ,  $\sigma_{ср}$  и  $s$ . Между тем детальный анализ этих диаграмм позволил выявить важные взаимосвязи между видом нагружения и напряженным состоянием ПС шлифованной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики. Последовательно рассмотрим эти результаты по каждому блоку во всех группах диаграмм.

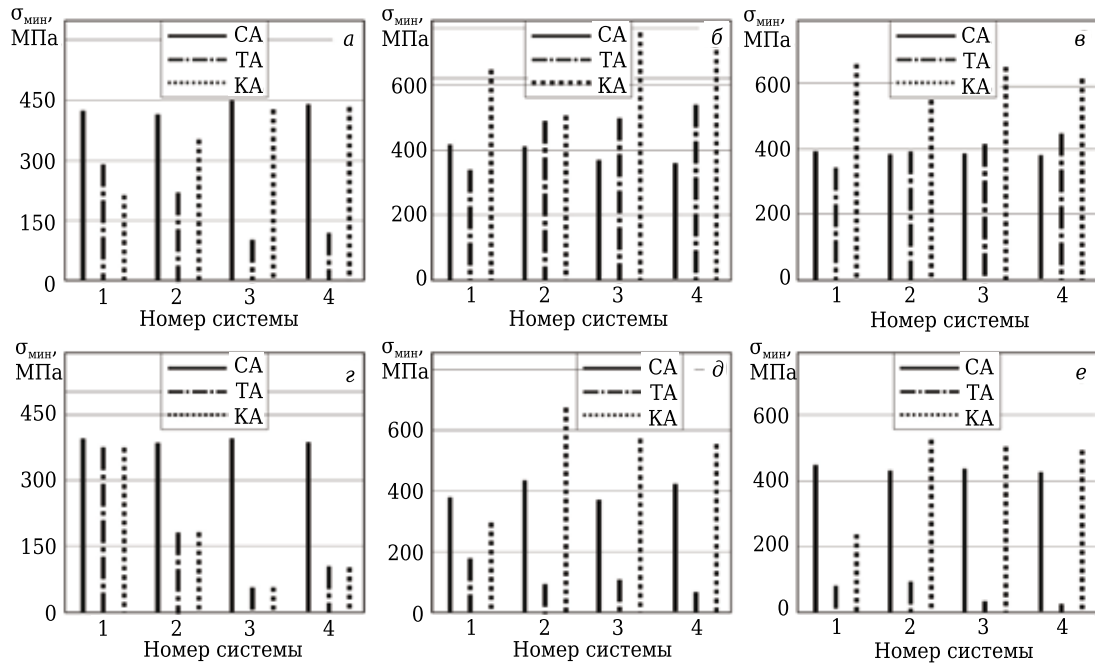
На рис. 1 показано влияние вида нагружения на  $\sigma_{мин}$ . Видно, что в поверхности  $C1$  наибольшее влияние на  $\sigma_{мин}$  оказывает силовое нагружение (см. рис. 1, а), причем в системе № 1  $\sigma_{мин}$  уменьшается в последовательности CA → TA → KA, в системах № 2, 3 и 4 — в последовательности CA → KA → TA. Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{111}$  0,68, 0,53, 0,22 и 0,27;  $K_{211}$  0,50, 0,85, 0,95 и 0,99;  $K_{311}$  0,73, 1,61, 4,26 и 3,71 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхностях  $C2$  и  $C3$  наибольшие  $\sigma_{мин}$  характерны для комбинированного нагружения (см. рис. 1, б, в). Степень влияния нагружения на  $\sigma_{мин}$  в системе № 1 уменьшается в последовательности KA → CA → TA, в системах № 2–4 — в последовательности KA → TA → CA. Значения коэффициентов для поверхности  $C2$ :  $K_{112}$  0,81, 1,19, 1,36 и 1,5;  $K_{212}$  1,55, 1,23, 2,06 и 2,02;  $K_{312}$  1,91, 1,03, 1,52 и 1,35 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности  $C3$ :  $K_{113}$  0,87, 1,02, 1,08 и 1,18;  $K_{213}$  1,69, 1,43, 1,69 и 1,62;  $K_{313}$  1,93, 1,41, 1,57 и 1,38 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. В поверхности  $C4$  наибольшее влияние на  $\sigma_{мин}$  оказывает силовое нагружение, а тепловое и комбинированное нагружения одинаково действуют на  $\sigma_{мин}$  (см. рис. 1, г). Значения коэффициентов:  $K_{114}$  0,95, 0,47, 0,14 и 0,27;  $K_{214}$  0,95, 0,47, 0,14 и 0,27;  $K_{314}$  1, 1, 1 и 1 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

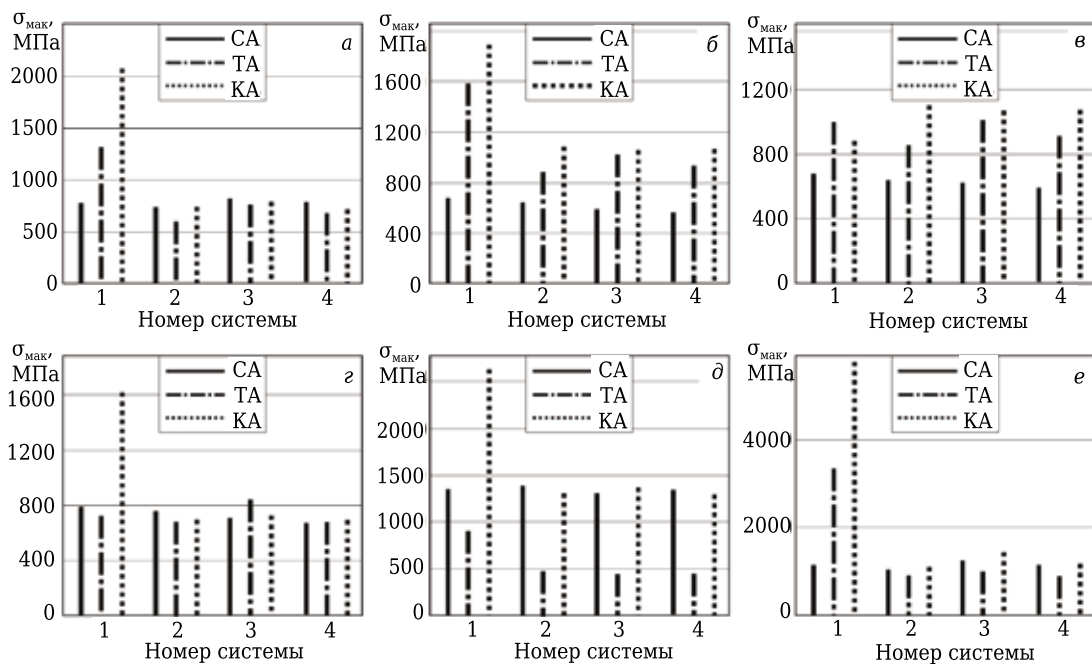
В поверхностях  $C5$  и  $C6$  наибольшее влияние на  $\sigma_{мин}$  в системе № 1 оказывает силовое нагружение, в системах № 2–4 — комбинированное (см. рис. 1, д, е). В системе № 1  $\sigma_{мин}$  уменьшается в последовательности CA → KA → TA, в других системах — в последовательности KA → CA → TA. Значения коэффициентов для поверхности  $C5$ :  $K_{115}$  0,47, 0,21, 0,29 и 0,15;  $K_{215}$  0,78, 1,55, 1,55 и 1,31;  $K_{315}$  1,66, 7,47, 5,36 и 8,76 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности  $C6$ :  $K_{116}$  0,18, 0,22, 0,08 и 0,06;  $K_{216}$  0,53, 1,22, 1,15 и 1,15;  $K_{316}$  2,99, 5,62, 14,76 и 18,92 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

На рис. 2 показано влияние вида нагружения на  $\sigma_{макс}$ . Видно, что в поверхности  $C1$  наибольшее влияние на  $\sigma_{макс}$  в системе № 1 оказывает комбинированное нагружение, а в системах № 2–4 — силовое (см. рис. 2, а). В системе № 1  $\sigma_{макс}$  уменьшается в последовательности KA → TA → CA, а в других системах — в последовательности CA → KA → TA. Значения коэффициентов для поверхности  $C1$ :  $K_{121}$  1,67, 0,81, 0,91 и 0,87;  $K_{221}$  2,65, 1, 0,94 и 0,95;  $K_{321}$  1,59, 1,23, 1,03 и 1,1 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности  $C2$  наибольшие  $\sigma_{макс}$  зафиксированы при комбинированном нагружении, а уменьшение  $\sigma_{макс}$  происходит во всех случаях одинаково в последовательности KA → TA → CA (см. рис. 2, б). Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{122}$  2,34, 1,37, 1,73 и 1,65;  $K_{222}$  2,8, 1,69, 1,79 и 1,9;  $K_{322}$  1,19, 1,23, 1,03 и 1,15



**Рис. 1.** Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\min}$  в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики систем № 1–4 при СА, ТА и КА



**Рис. 2.** Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\max}$  в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики систем № 1–4 при СА, ТА и КА

для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. В поверхности C3 наибольшие  $\sigma_{\max}$  зафиксированы в системе № 1 при тепловом нагружении, а в системах № 2–4 — при комбинированном (см. рис. 2, в). Уменьшение  $\sigma_{\max}$  происходит в последовательности ТА → КА → СА и КА → ТА → СА в системах № 1 и № 2–4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности C3:  $K_{123}$  1,48, 1,34, 1,62 и 1,55;  $K_{223}$  1,3, 1,72, 1,72 и 1,82;

$K_{323}$  0,88, 1,29, 1,06 и 1,18 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

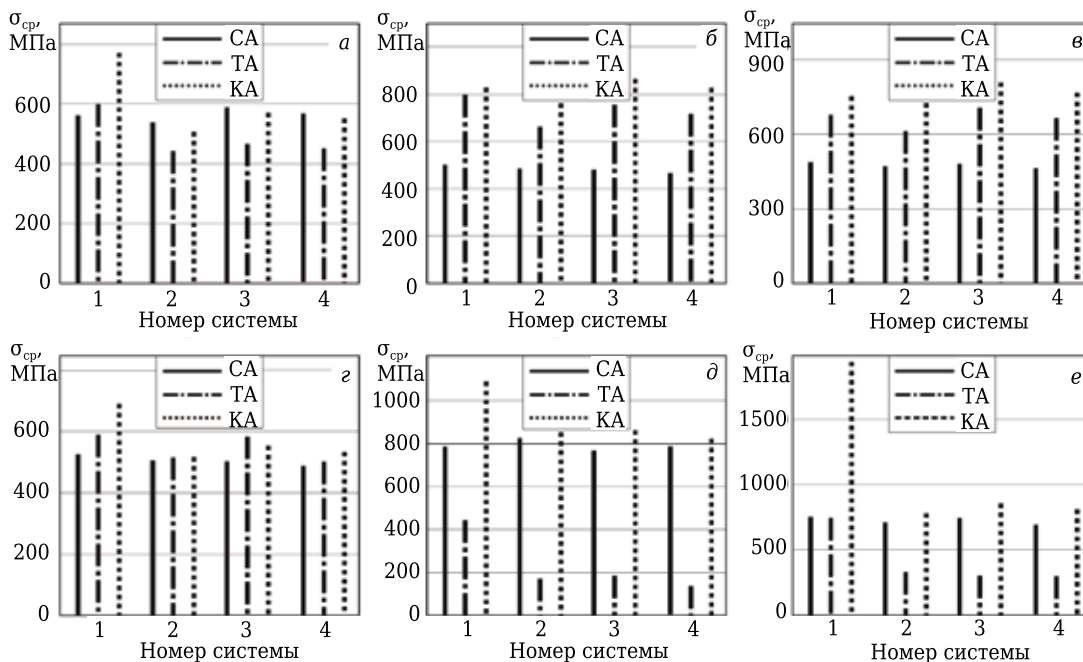
В поверхности C4 наибольшие  $\sigma_{\max}$  зафиксированы в системах № 1 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 2 — при силовом, в системе № 3 — при тепловом (см. рис. 2, г). Уменьшение  $\sigma_{\max}$  в системах № 1 и 4 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 2 — в последовательности СА → КА → ТА, а в

системе № 3 — в последовательности ТА → КА → СА. Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{124}$  0,91, 0,91, 1,19 и 1,01;  $K_{224}$  2,03, 0,92, 1,03 и 1,03;  $K_{324}$  2,23, 1,02, 0,86 и 1,02 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

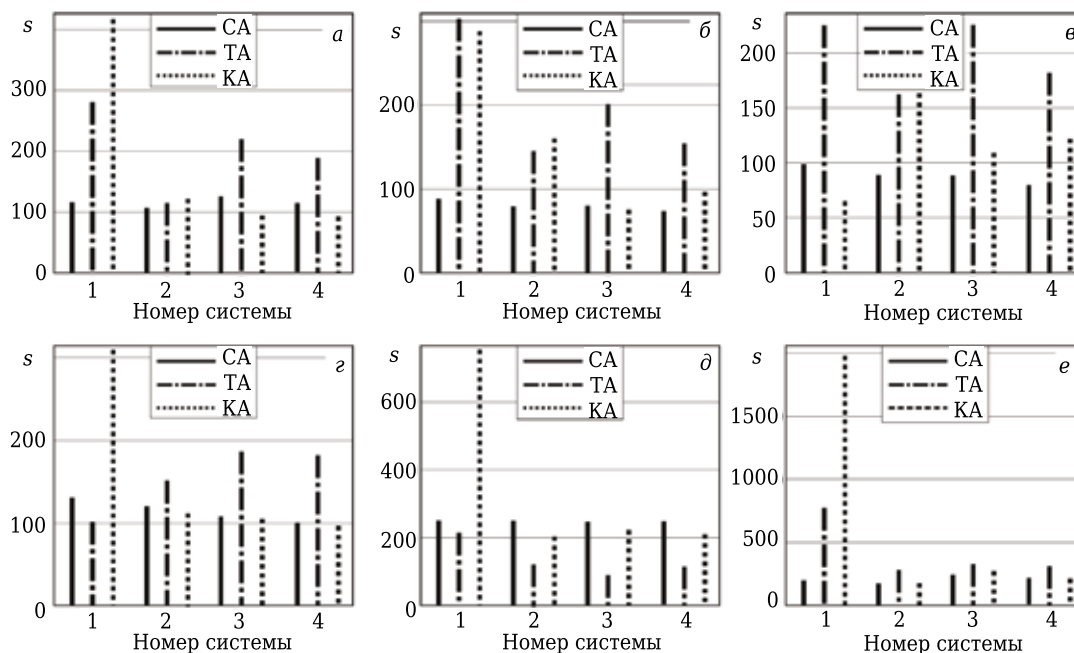
В поверхности С5 наибольшие значения  $\sigma_{\max}$  зафиксированы в системах № 1 и 3 при комбинированном нагружении, а в системах № 2 и 4 — при силовом (см. рис. 2, д). В системах № 1 и

3 уменьшение  $\sigma_{\max}$  происходит в последовательности КА → СА → ТА, а в системах № 2 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов:  $K_{125}$  0,67, 0,34, 0,33 и 0,33;  $K_{225}$  1,95, 0,94, 1,04 и 0,96;  $K_{325}$  2,91, 2,76, 3,12 и 2,92 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С6 наибольшие  $\sigma_{\max}$  зафиксированы при комбинированной нагрузке (см. рис. 2, е), уменьшение  $\sigma_{\max}$  в системе № 1 происходит



**Рис. 3.** Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{ср}}$  в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики систем № 1–4 при СА, ТА и КА



**Рис. 4.** Влияние вида нагружения на  $s$  в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики систем № 1–4 при СА, ТА и КА

в последовательности КА → ТА → СА, а в системах № 2–4 — в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов:  $K_{126}$  2,92, 0,87, 0,8 и 0,78;  $K_{226}$  5,06, 1,05, 1,16 и 1,03;  $K_{326}$  1,73, 1,2, 1,44 и 1,31 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{ср}}$  показано на рис. 3. В поверхности С1 наибольшие  $\sigma_{\text{ср}}$  зафиксированы в системе № 1 при комбинированном нагружении, а в системах № 2–4 — при силовом (см. рис. 3, а). В системе № 1 уменьшение  $\sigma_{\text{ср}}$  происходит в последовательности КА → ТА → СА, а в трех других системах — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов:  $K_{131}$  1,07, 0,82, 0,79 и 0,79;  $K_{231}$  1,37, 0,94, 0,97 и 0,97;  $K_{331}$  1,29, 1,15, 1,22 и 1,22 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхностях С2 и С3 наибольшие  $\sigma_{\text{ср}}$  характерны для комбинированного нагружения; уменьшение  $\sigma_{\text{ср}}$  происходит в последовательности КА → ТА → СА (см. рис. 3, б, в). Значения коэффициентов для поверхности С2:  $K_{132}$  1,58, 1,37, 1,57 и 1,55;  $K_{232}$  1,64, 1,57, 1,79 и 1,78;  $K_{332}$  1,04, 1,15, 1,14 и 1,15 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности С3:  $K_{133}$  1,39, 1,3, 1,47 и 1,43;  $K_{233}$  1,54, 1,54, 1,68 и 1,65;  $K_{333}$  1,11, 1,18, 1,14 и 1,15 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С4 наибольшие  $\sigma_{\text{ср}}$  зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при комбинированном нагружении, а в системе № 3 — при тепловом (см. рис. 3, г). В системах № 1, 2 и 4  $\sigma_{\text{ср}}$  уменьшается в последовательности КА → ТА → СА, а в системе № 3 — в последовательности ТА → КА → СА. Значения коэффициентов:  $K_{134}$  1,12, 1,01, 1,16 и 1,03;  $K_{234}$  1,31, 1,02, 1,1 и 1,09;  $K_{334}$  1,17, 1,00, 0,95 и 1,06 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхностях С5 и С6 наибольшие  $\sigma_{\text{ср}}$  зафиксированы при комбинированном нагружении, а уменьшение  $\sigma_{\text{ср}}$  происходит в последовательности КА → СА → ТА (см. рис. 3, д, е). Значения коэффициентов для поверхности С5:  $K_{135}$  0,56, 0,21, 0,24 и 0,18;  $K_{235}$  1,38, 1,03, 1,13 и 1,04;  $K_{335}$  2,47, 4,96, 4,63 и 5,94 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности С6:  $K_{136}$  0,99, 0,47, 0,41 и 0,43;  $K_{236}$  2,58, 1,10, 1,15 и 1,16;  $K_{336}$  2,6, 2,35, 2,8 и 2,69 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Влияние вида нагружения на  $s$  показано на рис. 4. В поверхности С1 наибольшие  $s$  зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, а в системах № 3 и 4 — при тепловом (см. рис. 4, а). В системах № 1 и 2  $s$  уменьшается в последовательности КА → ТА → СА, а в системах № 3 и 4 — в последовательности ТА → СА → КА. Значения коэффициентов:  $K_{141}$  2,41, 1,07, 1,75 и 1,65;  $K_{241}$  3,57, 1,14, 0,76 и 0,81;  $K_{341}$  1,48, 1,07, 0,43 и 0,49 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхностях С2 и С3 наибольшие значения  $s$  зафиксированы в системах № 1, 3 и 4 при

тепловом нагружении, а в системе № 2 — при комбинированном (см. рис. 4, б, в). В системах № 1 и 4  $s$  уменьшается в последовательности ТА → КА → СА, а в системе № 2 — в последовательности КА → ТА → СА. В поверхности С2 системы № 3  $s$  уменьшается в последовательности ТА → СА → КА, а в поверхности С3 системы № 3 — в последовательности ТА → КА → СА. Значения коэффициентов для поверхности С2:  $K_{142}$  3,40, 1,81, 2,48 и 2,09;  $K_{242}$  3,24, 2, 0,94 и 1,32;  $K_{342}$  0,95, 1,1, 0,38 и 0,63 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности С3:  $K_{143}$  2,27, 1,82, 2,54 и 2,27;  $K_{243}$  0,66, 1,83, 1,23 и 1,52;  $K_{343}$  0,29, 1, 0,48 и 0,67 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхностях С4 и С6 наибольшие значения  $s$  зафиксированы в системах № 2, 3 и 4 при тепловом нагружении, а в системе № 1 — при комбинированном (см. рис. 4, г, е). В поверхности С4 системы № 1  $s$  уменьшается в последовательности КА → СА → ТА, систем № 2, 3 и 4 — в последовательности ТА → СА → КА. В поверхности С6 системы № 1  $s$  уменьшается в последовательности КА → ТА → СА, систем № 2 и 4 — в последовательности ТА → СА → КА, системы № 3 — в последовательности ТА → КА → СА. Значения коэффициентов для поверхности С4:  $K_{144}$  0,77, 1,25, 1,73 и 1,81;  $K_{244}$  2,36, 0,93, 0,97 и 0,96;  $K_{344}$  3,05, 0,74, 0,56 и 0,53 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Значения коэффициентов для поверхности С6:  $K_{146}$  3,85, 1,57, 1,32 и 1,43;  $K_{246}$  9,8, 0,99, 1,1 и 0,96;  $K_{346}$  2,54, 0,63, 0,83 и 0,67 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С5 наибольшие значения  $s$  зафиксированы для системы № 1 при комбинированном нагружении, а для систем № 2, 3 и 4 — при силовом (см. рис. 4, д). В системе № 1  $s$  уменьшается в последовательности КА → СА → ТА, а в системах № 2, 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов:  $K_{145}$  0,86, 0,48, 0,36 и 0,46;  $K_{245}$  3, 0,81, 0,9 и 0,85;  $K_{345}$  3,51, 1,68, 2,47 и 1,83 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Системный анализ данных СА, ТА и КА позволил детализировать представления о термомеханических процессах в ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –TiC-керамики, имеющем сложную структуру. Выявлено превалирующее влияние комбинированного нагружения на статистические характеристики  $\sigma_{\text{мин}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$ ; тепловое нагружение оказывает на них наименьшее влияние. Степень влияния комбинированного нагружения на  $\sigma_{\text{мин}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$  оказалась наибольшей в 52 блоках (из 72), силового нагружения — в 17 блоках, теплового нагружения — только в трех блоках.

Степень влияния вида нагружения на каждую статистическую характеристику распреде-

ляется следующим образом. Комбинированное нагружение оказывает преобладающее влияние на  $\sigma_{\min}$  в 14 блоках (из 24), силовое нагружение — в 10 блоках. Наибольшее влияние на  $\sigma_{\max}$  оказывает комбинированное нагружение в 17 блоках, силовое нагружение — в пяти блоках, тепловое — в двух блоках. Комбинированное нагружение оказывается приоритетным для  $\sigma_{\text{ср}}$  в 21 блоке, силовое нагружение — в двух блоках, тепловое — в одном блоке. Однако на  $s$  наибольшее влияние оказывает тепловое нагружение; доминирование этого вида нагружения проявляется в 14 блоках (из 24). Комбинированное нагружение оказывается преобладающим в восьми блоках, силовое — в двух блоках.

Эти заключения по влиянию вида нагружения на  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и  $s$  подтверждают значения коэффициентов, приведенных в соответствующих разделах анализа. В частности, интегральные значения коэффициентов  $K_{ijl}$ , где  $i$  — 2 (КА/СА), составляют 1,15, 1,6, 1,36 и 1,78 в группах  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и  $s$  соответственно, а коэффициентов  $K_{ijl}$ , где  $i$  — 3 (КА/ТА), в этих же группах — 3,83, 1,52, 1,94 и 1,36. Значения этих коэффициентов однозначно указывают на преобладающее влияние комбинированного нагружения на статистические характеристики. Интегральные значения коэффициентов  $K_{ijl}$ , где  $i$  — 1 (ТА/СА), составляющие 0,59, 1,18, 0,96 и 1,73 в группах  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и  $s$  соответственно, свидетельствуют о конкурентном влиянии на  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и однозначном влиянии на  $s$ .

Результаты системного анализа интерпретированы следующим образом. На состояние ПС  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики на этапе, предшествующем разрушению, важнейшее влияние оказывает комбинированное нагружение контактных поверхностей эксплуатируемых изделий. При одновременном действии силовых и тепловых нагрузок формируется сложное напряженно-деформированное состояние ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики. Это состояние является критическим для керамики, так как экстремально высокие локальные напряжения на границах ее структурных элементов в совокупности с микроструктурными концентраторами

напряжений с высокой вероятностью приведут к зарождению структурных дефектов в виде несплошностей, к быстрому образованию зародышевых трещин и их росту. Это определяет жесткие требования к состоянию ПС изделий, изготовленных из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики, для высокотемпературной эксплуатации в условиях интенсивных силовых нагрузок.

Изделия, изготовленные из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики и предназначенные только для эксплуатации при высокой температуре, менее требовательны к состоянию ПС. Однако при этом необходимо учитывать, что под действием экстремально высоких температур возможно увеличение случайных отказов изделий из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики. В основе этого влияния — многочисленные микроструктурные концентраторы напряжений, образующиеся под действием теплового потока на границе зерен оксида алюминия с ПС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация ранее проведенных результатов исследований интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в КТ ПС шлифованной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики при СА, ТА и КА обеспечила возможность их эффективного анализа. Обобщенные и компетентно упорядоченные результаты стали более доступными как в целом, так и в отдельных частях. Результаты системного анализа имеют существенный научный потенциал для уточнения физических моделей разрушения изделий под действием эксплуатационных нагрузок, учитывающих трансформацию структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiC-керамики. Выявленные взаимосвязи между видами нагружения и статистическими характеристиками при СА, ТА и КА имеют большое значение для создания новых технологических процессов поверхностной обработки высокоточных керамических изделий ответственного назначения.

\*\*\*

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

## Библиографический список

1. **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.
2. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // *Новые огнеупоры.* — 2010. — № 12. — С. 13–19.
3. **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.

4. **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.
5. **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.
6. **Kuzin, V. V.** Correlation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -ceramic structure with the mechanism of surface layer formation for

workpieces during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 1. — P. 82–85.

**Кузин, В. В.** Взаимосвязь структуры  $Al_2O_3$ -керамики с механизмом формирования поверхностного слоя заготовок при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2019. — № 1. — С. 65–68.

5. **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, issue 1, May. — 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.

6. **Kuzin, V. V.** Selection of ceramic tools in the production preparation stage taking account of operating properties / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 496–501.

**Кузин, В. В.** Выбор керамических инструментов на стадии технологической подготовки производства с учетом их эксплуатационных характеристик / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров // Новые огнеупоры. — 2018. — № 9. — С. 65–70.

7. **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, issue 2, July. — 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.

8. **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.

9. **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.

10. **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.

11. **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.

12. **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. ■

Получено 05.10.20

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Ассоциация производителей и потребителей огнеупоров  
«Санкт-Петербургский научно-технический центр»  
Ассоциация «СПб НТЦ»

## XI Научно-практическая конференция Актуальные проблемы огнеупорного производства

Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2020 г.

Тематика конференции: огнеупорное сырье, современные технологии в производстве и эксплуатации огнеупоров, технологическое и лабораторное оборудование, подтверждение качества огнеупоров/независимая экспертиза, стандартизация и информационное обеспечение в области огнеупоров.

Тел: (812) 309-18-82, e-mail: [refinfo@mail.ru](mailto:refinfo@mail.ru), [www.ogneupor-spb.ru](http://www.ogneupor-spb.ru)