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

УПК 666.3:546.28'1711:621.914.22

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ $Si_3N_4$ —TiC-КЕРАМИКИ\*

Систематизированы результаты силового, теплового и комбинированного анализов напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики. Взаимосвязи, выявленные при упорядочении данных численных экспериментов, рекомендованы для создания инновационных инструментов из нитридкремниевой керамики с учетом изменения структуры ее поверхностного слоя и адаптирования к его разрушению под действием эксплуатационных нагрузок.

**Ключевые слова:** системный анализ,  $Si_3N_4$ –TiC-керамика, поверхностный слой, интенсивность напряжений, статистическая характеристика, компьютерная инженерия.

## **ВВЕДЕНИЕ**

ешение актуальной проблемы режущих инструментов из  $Si_3N_4$ -ТiС-керамики, заключающейся в установлении закономерностей износа при контакте с заготовкой, требует особого внимания к физическим процессам в их поверхностном слое (ПС) [1, 2]. В публикациях [3–8] показано, что ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики после шлифования имеет оригинальную многослойную структуру с большим числом разнообразных дефектов и специфическую морфологию поверхности. Этот ПС, сформировавшийся при заточке инструмента, значительно влияет на условия контактного взаимодействия с обрабатываемой заготовкой, а также на соотношение между адгезионной и деформационной составляющими силы трения [9, 10]. Результаты исследования инструментов из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики свидетельствуют о существенном влиянии характеристик ПС на интенсивность их износа, особенно на начальном этапе эксплуатации [11, 12].

Более неоднозначной является взаимосвязь условий нагружения инструмента, зависящих от параметров режима резания, с характером разрушения их ПС [13, 14]. Экспериментально выявить природу этой взаимосвязи не удается из-за

\* Статья является заключительной в цикле публикаций [17–19].

 $\bowtie$ 

B. B. Кузин E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru отсутствия необходимых знаний о роли внешнего нагружения в деформации ПС шлифованной  $Si_3N_4$ –TiC-керамики. Однако обоснованно подойти к объяснению этой взаимосвязи позволили методология компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики [15, 16] и совокупность результатов силового, теплового и комбинированного анализов  $Si_3N_4$ –TiC-керамики [17–19].

Цель настоящей работы — систематизировать ранее полученные результаты расчетов интенсивности напряжений о; при силовом, тепловом и комбинированном анализах и на этой основе выявить взаимосвязь вида нагружения с напряженным состоянием ПС шлифованной  $Si_3N_4$ —TiC-керамики.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный анализ выполнен с использованием четырех статистических характеристик (наименьшие  $\sigma_{\text{мин}}$ , наибольшие  $\sigma_{\text{макс}}$ , средние  $\sigma_{\text{ср}}$  и стандартное отклонение s для  $\sigma_i$ ), значения которых были определены в результате силового (СА), теплового (ТА) и комбинированного (КА) анализов ПС керамики [17-19]. Эти результаты показаны в виде 24 столбчатых диаграмм, разделенных на четыре группы для каждой статистической характеристики. Каждая группа включает 6 диаграмм для поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (С1); межзеренной фазы, примыкающей к зерну (С2); межзеренной фазы, примыкающей к матрице (СЗ); матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (С4); для поверхностей зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к слою (С5); для поверхности слоя, примыкающего к зерну, межзеренной фазе и матрице (C6). Каждая диаграмма содержит 4 блока для следующих систем шлифованной  $Si_3N_4$ —TiC-керамики: № 1  $Si_3N_4$  (зерно) — MgO (межзеренная фаза)—  $Si_3N_4$  (матрица) /  $Si_3N_4$  (слой), № 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.

Степень влияния разных видов нагружения на статистические характеристики оценена на основе анализа характера их изменения в каждом блоке и значений коэффициента  $K_{ijl}$ , где i—номер отношения видов анализа (1— TA / CA, 2— KA / CA, 3— KA / TA); j—номер статистической характеристики (1— $\sigma_{\text{мин}}$ , 2— $\sigma_{\text{макс}}$ , 3— $\sigma_{\text{ср}}$ , 4—s); l— обозначение поверхности (1-6— поверхности C1-C6 соответственно). Например, коэффициент  $K_{112}$  определяет значение отношения  $\sigma_{\text{мин}}$  при TA к  $\sigma_{\text{мин}}$  при CA в поверхности C2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1–4 показаны диаграммы влияния разных видов нагружения на статистические характеристики в поверхностях C1–C6 ПС керамики четырех систем. Общий анализ этих диаграмм показал, что степень влияния силового нагружения на  $\sigma_{\text{мин}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$  оказалась наибольшей в 38 блоках (из 72), комбинированного — в 30 блоках, теплового — в четырех блоках. Наибольшее влияние на s оказывает комбинированное нагружение; доминирование этого вида нагружения проявляется в 13 блоках (из 24). Силовое на-

гружение оказывает превалирующее влияние на s в восьми блоках, тепловое — в трех.

Последовательно проанализируем выявленные взаимосвязи для каждой статистической характеристики.

Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{мин}}$  показано на рис. 1. Видно, что силовое нагружение оказывает превалирующее влияние на  $\sigma_{\text{мин}}$  в 15 блоках (из 24), комбинированное нагружение — в 9 блоках.

В поверхности C1 наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы в системах № 1 и 2 при силовом нагружении (см. рис. 1, a), системах № 3 и 4 — при комбинированном. Уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в системах № 1 и 2 происходит в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ , системах № 3 и 4 — в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{111}$  0,2, 0,37, 0,24 и 0,52;  $K_{211}$  0,78, 0,55, 1,33 и 1,09;  $K_{311}$  3,92, 1,47, 5,46 и 2,12 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C2 наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы в системах № 1, 3 и 4 при комбинированном нагружении (см. рис. 1,  $\delta$ ), в системе № 2 — при силовом. Уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в системах № 1, 3 и 4 происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системе № 2 — в последовательности  $CA \to KA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{112}$  0,86, 0,82, 0,98 и 0,76;  $K_{212}$  1,09, 0,99, 1,33 и 1,07;  $K_{312}$  1,27, 1,2, 1,35 и 1,41 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C3 наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при силовом нагружении

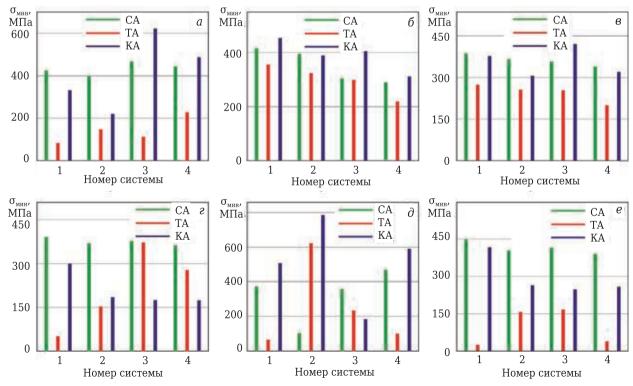


Рис. 1. Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{мин}}$  в поверхностях C1 (a), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС шлифованной  $Si_3N_4$ —ТіС-керамики систем № 1–4 при CA, ТА и KA

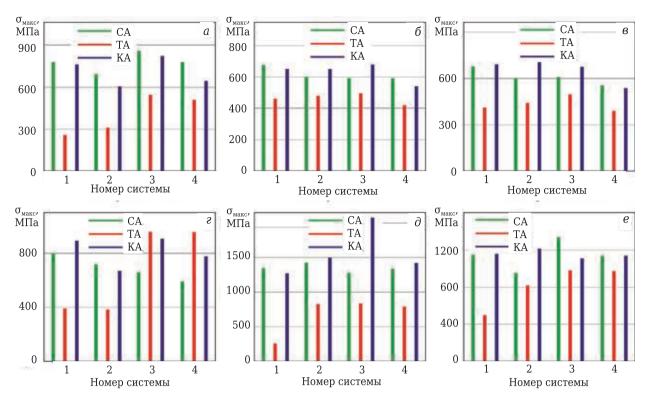


Рис. 2. Влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{макс}}$  в поверхностях C1 (a), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС шлифованной  $Si_3N_4$ —ТіС-керамики систем № 1—4 при СА, ТА и КА

(см. рис. 1, в), в системе № 3 — при комбинированном. Уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в системах № 1, 2 и 4 происходит в последовательности СА  $\rightarrow$  КА  $\rightarrow$  ТА, в системе № 3 — в последовательности КА  $\rightarrow$  СА  $\rightarrow$  ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{113}$  0,71, 0,7, 0,71 и 0,59;  $K_{213}$  0,98, 0,83, 1,18 и 0,94;  $K_{313}$  1,37, 1,19, 1,65 и 1,59 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C4 керамики всех систем наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы при силовом нагружении (см. рис. 1, г). Уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в системах № 1, 2 уменьшается в последовательности СА  $\rightarrow$  КА  $\rightarrow$  ТА, в системе № 3 и 4 — в последовательности СА  $\rightarrow$  ТА  $\rightarrow$  КА. Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{114}$  0,13, 0,41, 0,99 и 0,77;  $K_{214}$  0,77, 0,5, 0,46 и 0,48;  $K_{314}$  5,77, 1,21, 0,47 и 0,62 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C5 наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 3 — при силовом (см. рис. 1,  $\partial$ ). Уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в системах № 1 и 4 происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системе № 2 — в последовательности  $KA \to TA \to CA$ , в системе № 3 — в последовательности  $CA \to TA \to KA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{115}$  0,18, 6,01, 0,66 и 0,21;  $K_{215}$  1,36, 7,58, 0,53 и 1,25;  $K_{315}$  7,71, 1,26, 0,8 и 5,86 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C6 наибольшие  $\sigma_{\text{мин}}$  зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 1, e), причем уменьшение  $\sigma_{\text{мин}}$  в них происходит в последовательности  $CA \to KA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{116}$ 

0,06, 0,39, 0,4 и 0,1;  $K_{216}$  0,93, 0,65, 0,6 и 0,66;  $K_{316}$  16,04, 1,68, 1,47 и 6,62 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

На рис. 2 показано влияние вида нагружения на  $\sigma_{\text{макс}}$ . Видно, что силовое и комбинированное нагружения одинаково влияют на  $\sigma_{\text{макс}}$  (по 11 блоков), а наибольшее влияние теплового нагружения проявляется в двух блоках.

В поверхности C1 всех систем наибольшие  $\sigma_{\text{макс}}$  зафиксированы при силовом нагружении (см. рис. 2, a), причем уменьшение  $\sigma_{\text{макс}}$  происходит в последовательности  $\text{CA} \rightarrow \text{KA} \rightarrow \text{TA}$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{121}$  0,33, 0,45, 0,64 и 0,66;  $K_{221}$  0,98, 0,88, 0,96 и 0,83;  $K_{321}$  2,95, 1,96, 1,5 и 1,26 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C2 наибольшие  $\sigma_{\text{макс}}$  зафиксированы в системах № 1 и 4 при силовом нагружении (см. рис. 2,  $\delta$ ), а в системах № 2 и 3 — при комбинированном. Уменьшение  $\sigma_{\text{макс}}$  в системах № 1 и 4 происходит в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ , в системах № 2 и 3 — в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{122}$  0,68, 0,8, 0,84 и 0,71;  $K_{222}$  0,96, 1,08, 1,15 и 0,91;  $K_{322}$  1,41, 1,35, 1,37 и 1,29 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C3 наибольшие  $\sigma_{\text{макс}}$  зафиксированы в системах № 1–3 (см. рис. 2, в). Уменьшение  $\sigma_{\text{макс}}$  в системах № 1–3 происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системе № 4 — в последовательности  $CA \to KA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{123}$ 

0,61, 0,73, 0,81 и 0,7;  $K_{223}$  1,02, 1,18, 1,11 и 0,96;  $K_{323}$  1,68, 1,61, 1,36 и 1,38 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C5 наибольшие значения  $\sigma_{\text{макс}}$  зафиксированы в системе № 1 при силовом нагружении, в системах № 2–4 — при комбинированном (см. рис. 2,  $\partial$ ). Уменьшение  $\sigma_{\text{макс}}$  в системе № 1 происходит в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ , в системах № 2–4 — в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{125}$  0,19, 0,58, 0,65 и 0,59;  $K_{225}$  0,95, 1,05, 1,62 и 1,06;  $K_{325}$  5, 1,82, 2,49 и 1,79 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C6 наибольшие  $\sigma_{\text{макс}}$  зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 3 — при силовом (см. рис. 2, e). Уменьшение  $\sigma_{\text{макс}}$  в системах № 1, 2 и 4 происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , системе № 3 — в последовательности  $CA \to TA$ 

 $\rightarrow$  KA  $\rightarrow$  TA. Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{126}$  0,43, 0,86, 0,73 и 0,8678;  $K_{226}$  1,01, 1,27, 1, 0,83 и 1;  $K_{326}$  2,33, 1,48, 1,13 и 1,17 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Влияние вида нагружения на  $\sigma_{cp}$  показано на рис. 3. Видно, что силовое нагружение оказывается приоритетным для  $\sigma_{cp}$  в 12 блоках, комбинированное нагружение — в 10 блоках, тепловое — в двух блоках.

В поверхности C1 наибольшие  $\sigma_{cp}$  зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при силовом нагружении, в системе № 3 — при комбинированном (см. рис. 3, a). Уменьшение  $\sigma_{cp}$  происходит в системах № 1, 2 и 4 в последовательности  $CA \to KA \to TA$ , в системе № 3 — в последовательности  $KA \to CA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{131}$  0,34, 0,46, 0,73 и 0,68;  $K_{231}$  0,86, 0,68, 1,12 и 0,96;  $K_{331}$  2,54, 1,48, 1,54 и 1,41 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C2 наибольшие  $\sigma_{\rm cp}$  зафиксированы в системах № 1–3 при комбинированном нагружении, в системе № 4 — при силовом (см. рис. 3, б). Уменьшение  $\sigma_{\rm cp}$  происходит в системах № 1–3 в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системе № 4 — в последовательности  $CA \to KA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{132}$  0,82, 0,85, 0,89 и 0,77;  $K_{232}$  1,1, 1,08, 1,17 и 0,94;  $K_{332}$  1,35, 1,28, 1,31 и 1,22 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C3 наибольшие  $\sigma_{cp}$  зафиксированы в системах № 1 и 3 при комбинирован-

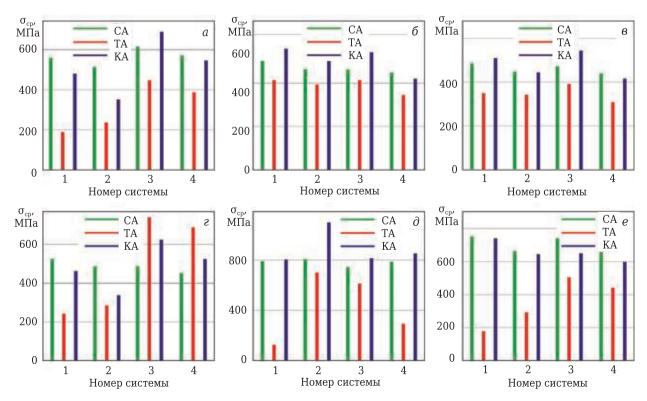


Рис. 3. Влияние вида нагружения на  $\sigma_{cp}$  в поверхностях C1 (a), C2 (b), C3 (b), C4 (c), C5 (b) и C6 (c) ПС шлифованной  $Si_3N_4$ —ТіС-керамики систем № 1–4 при CA, ТА и KA

ном нагружении, в системах № 2 и 4 — при силовом (см. рис. 3, e). Уменьшение  $\sigma_{cp}$  в системах № 1 и 3 происходит в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ , в системах № 2 и 4 — в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{133}$  0,72, 0,77, 0,83 и 0,7;  $K_{233}$  1,05, 0,99, 1,15 и 0,94;  $K_{333}$  1,46, 1,30, 1,39 и 1,35 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C4 наибольшие  $\sigma_{\rm cp}$  зафиксированы в системах № 1 и 2 при силовом нагружении, в системах № 3 и 4 — при тепловом (см. рис. 3,  $\it e$ ). Уменьшение  $\sigma_{\rm cp}$  происходит системах № 1 и 2 в последовательности  $\rm CA \rightarrow \rm KA \rightarrow \rm TA$ , в системах № 3 и 4 — в последовательности  $\rm TA \rightarrow \rm KA \rightarrow \rm CA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $\it K_{134}$  0,46, 0,59, 1,52 и 1,53;  $\it K_{234}$  0,88, 0,69, 1,28 и 1,16;  $\it K_{334}$  1,89, 1,18, 0,84 и 0,76 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C5 наибольшие  $\sigma_{\rm cp}$  зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 3,  $\partial$ ), причем уменьшение  $\sigma_{\rm cp}$  происходит в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{135}$  0,16, 0,87, 0,82 и 0,37;  $K_{235}$  1,02, 1,36, 1,09 и 1,08;  $K_{335}$  6,34, 1,5, 1,33 и 2,91 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C6 наибольшие  $\sigma_{cp}$  зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 3, e), а уменьшение  $\sigma_{cp}$  происходит в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{136}$  0,24, 0,44,

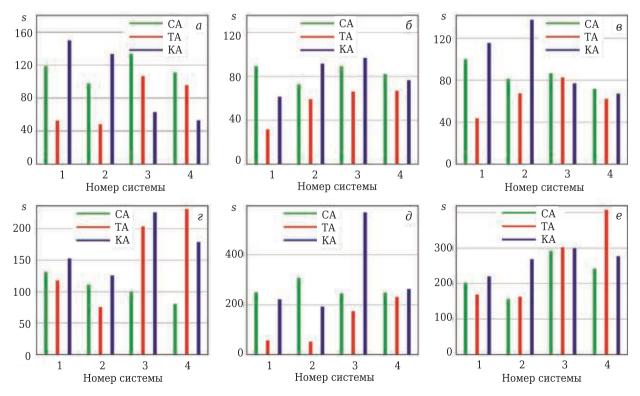
0,68 и 0,67;  $K_{236}$  0,98, 0,97, 0,88 и 0,91;  $K_{336}$  4,15, 2,18, 1,29 и 1,35 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Влияние вида нагружения на *s* показано на рис. 4. Видно, что наибольшее влияние на *s* оказывает комбинированное нагружение; доминирование этого вида нагружения проявляется в 13 блоках (из 24). Силовое нагружение оказывает превалирующее влияние на *s* в восьми блоках, тепловое — в трех.

В поверхности C1 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 4, a). Уменьшение s в системах № 1 и 2 происходит в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ , в системах № 3 и 4 — в последовательности  $CA \rightarrow TA \rightarrow KA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{141}$  0,44, 0,49, 0,8 и 0,86;  $K_{241}$  1,26, 1,37, 0,47 и 0,47;  $K_{341}$  2,84, 2,76, 0,59 и 0,55 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C2 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 4 при силовом нагружении, в системах № 2 и 3 — при комбинированном (см. рис. 4,  $\delta$ ). Уменьшение s в системах № 1 и 4 происходит в последовательности  $CA \rightarrow KA \rightarrow TA$ , в системах № 2 и 3 — в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{142}$  0,35, 0,82, 0,74 и 0,82;  $K_{242}$  0,69, 1,26, 1,08 и 0,93;  $K_{342}$  1,94, 1,55, 1,46 и 1,14 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C3 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном



**Рис. 4.** Влияние вида нагружения на *s* в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (б), *C3* (в), *C4* (г), *C5* (д) и *C6* (е) ПС шлифованной Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>−TiC-керамики систем № 1–4 при CA, ТА и КА

нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 4,  $\theta$ ). Уменьшение s в системах № 1 и 2 происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системе № 3 — в последовательности  $CA \to TA \to KA$ , в системе № 4 — в последовательности  $CA \to KA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{143}$  0,44, 0,83, 0,96 и 0,87;  $K_{243}$  1,16, 1,7, 0,89 и 0,93;  $K_{343}$  2,65, 2,04, 0,93 и 1,08 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C4 наибольшие s зафиксированы в системах № 1, 2 и 3 при комбинированном нагружении, в системе № 4 — при тепловом (см. рис. 4, s). Уменьшение s в системах № 1 и 2 происходит в последовательности  $KA \rightarrow CA \rightarrow TA$ , в системе № 3 — в последовательности  $KA \rightarrow TA \rightarrow CA$ , в системе № 4 — в последовательности  $TA \rightarrow KA \rightarrow CA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{144}$  0,9, 0,68, 2,04 и 2,87;  $K_{244}$  1,16, 1,13, 2,27 и 2,22;  $K_{344}$  1,3, 1,66, 1,11 и 0,77 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C5 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 2 при силовом нагружении, в системах № 3 и 4 — при комбинированном (см. рис. 4,  $\partial$ ). Уменьшение s в системах № 1 и 2 происходит в последовательности  $CA \to KA \to TA$ , в системах № 3 и 4 — в последовательности  $KA \to CA \to TA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{145}$  0,23, 0,17, 0,71 и 0,93;  $K_{245}$  0,88, 0,62, 2,32 и 1,06;  $K_{345}$  3,9, 3,69, 3,27 и 1,14 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C6 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при тепловом (см. рис. 4, e). Уменьшение s в системах № 1 и 2

#### Библиографический список

- 1. **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.
- 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.
- **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. **Sun, J.** Analysis of surface morphology and roughness on  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic grinding / *H. Wang, Y. Wu, P. Zhou* [et al.] // Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2018. Vol. 16,  $\mathbb{N}$  3. P. 20–28.
- 4. **Kuzin**, **V. V.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / V. V. Kuzin // Russ. Eng. Res. 2004. Vol. 24, N 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.

происходит в последовательности  $KA \to CA \to TA$ , в системах № 3 и 4 — в последовательности  $TA \to KA \to CA$ . Значения коэффициентов для этой поверхности:  $K_{146}$  0,83, 1,05, 1,04 и 1,69;  $K_{246}$  1,08, 1,72, 1,03 и 1,15;  $K_{346}$  1,3, 1,65, 0,99 и 0,68 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С использованием систематизированных результатов расчетов интенсивности напряжений при силовом, тепловом и комбинированном анализах выявлены взаимосвязи вида нагружения со статистическими характеристиками напряженного состояния ПС шлифованной Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiCкерамики. Обобщенные и упорядоченные зависимости позволили объяснить влияние режима резания на интенсивность износа инструментов из  $Si_3N_4$ -ТіС-керамики, увеличение их надежности при росте скорости резания и, соответственно, на повышение температуры в их ПС при эксплуатации с минимальными силовыми нагрузками. Выявленные взаимосвязи использованы для создания инновационных инструментов из  $Si_3N_4$ -TiC-керамики, учитывающих изменение структуры их ПС при изготовлении и адаптированных к его разрушению под действием эксплуатационных нагрузок.

\* \* \*

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

- 5. *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, N 1. P. 27–35.
- 6. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with  $Si_3N_4$ -ceramic surface quality / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. 2017. Vol. 58,  $N_2$  1. P. 78–81.
- **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности  $Si_3N_4$ -керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. 2017. № 1. С. 67–70.
- 7. **Sun, Jian.** Analysis of surface morphology and roughness on  $\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$  ceramic grinding / Jian Sun, Yuhou Wu, Peng Zhou [et al.] // Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2018. Vol. 16, № 3. P. 20–28.
- 8. *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.
- 9. *Xu, Weiwei.* Dynamic fatigue behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-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.

- 10. **Kuzin, V. V.** Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / V. V. Kuzin // Russ. Eng. Res. 2003. Vol. 23. Ne 12. P. 32-36.
- Kузин, B. B. Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / B. B. B0. B12. B1. B3. B4. B5. B6. B7. B8. B8. B9. B
- 11. **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, Nole 2 3. P. 199–203.
- **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.
- 12. **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.
- **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.
- 13. *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, and M. A. Volosova // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, No. 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.
- 14. **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,  $\mathbb{N}$ . 1. P. 40–44.
- **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микро-

- уровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50-55.
- 15. *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, Ne 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.
- 16. **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,  $\mathbb{N}$  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.
- 17. **Кузин, В. В.** Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной  $Si_3N_4$ -ТіС-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. 2020. № 12. С. 54-60.
- 18. **Кузин, В. В.** Тепловой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной  $Si_3N_4$ —ТіС-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. 2021. № 1. С. 61–68.
- 19. **Кузин, В. В.** Комбинированный анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной  $Si_3N_4$ —TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. 2021. № 2. С. 60–66. ■

Получено 02.03.21 © В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова, 2021 г.



