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 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ Si₃N₄--TiC-КЕРАМИКИ^{*}

Систематизированы результаты силового, теплового и комбинированного анализов напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si₃N₄-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, Si₃N₄-TiC-керамика, поверхностный слой, интенсивность напряжений, статистическая характеристика, компьютерная инженерия.

введение

Решение актуальной проблемы режущих инструментов из Si₃N₄-TiC-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 Si₃N₄-ТiС-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 Si₃N₄-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

⊠ В. В. Кузин E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru отсутствия необходимых знаний о роли внешнего нагружения в деформации ПС шлифованной Si₃N₄-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 Si₃N₄-TiC-керамики [17-19].

Цель настоящей работы — систематизировать ранее полученные результаты расчетов интенсивности напряжений о_i при силовом, тепловом и комбинированном анализах и на этой основе выявить взаимосвязь вида нагружения с напряженным состоянием ПС шлифованной Si₃N₄-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 σ_i), значения которых были определены в результате силового (CA), теплового (TA) и комбинированного (KA) 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

^{*} Статья является заключительной в цикле публикаций [17–19].

зерну, межзеренной фазе и матрице (*C6*). Каждая диаграмма содержит 4 блока для следующих систем шлифованной Si_3N_4 -ТіС-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 /Si₃ N_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 — ТА / СА, 2 — КА / СА, 3 — КА / ТА); j — номер статистической характеристики (1 — $\sigma_{\rm MHH}$, 2 — $\sigma_{\rm MARC}$, 3 — $\sigma_{\rm Cp}$, 4 — s); l — обозначение поверхности (1-6 — поверхности C1-C6 соответственно). Например, коэффициент K_{112} определяет значение отношения $\sigma_{\rm MHH}$ при ТА к $\sigma_{\rm MHH}$ при СА 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 нагружение оказывает превалирующее влияние на *s* в восьми блоках, тепловое — в трех.

Последовательно проанализируем выявленные взаимосвязи для каждой статистической характеристики.

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

В поверхности *C1* наибольшие $\sigma_{_{MHH}}$ зафиксированы в системах № 1 и 2 при силовом нагружении (см. рис. 1, *a*), системах № 3 и 4 — при комбинированном. Уменьшение $\sigma_{_{MHH}}$ в системах № 1 и 2 происходит в последовательности СА $\rightarrow KA \rightarrow TA$, системах № 3 и 4 — в последовательности КА $\rightarrow CA \rightarrow TA$. 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, б), в системе № 2 — при силовом. Уменьшение $\sigma_{\text{мин}}$ в системах № 1, 3 и 4 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow \rightarrow ТА, в системе № 2 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА. 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 *СЗ* наибольшие σ_{мин} зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при силовом нагружении



Рис. 1. Влияние вида нагружения на о_{мин} в поверхностях *С1* (*a*), *С2* (*б*), *С3* (*в*), *С4* (*г*), *С5* (*∂*) и *С6* (*е*) ПС шлифованной Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 при CA, ТА и КА



Рис. 2. Влияние вида нагружения на σ_{макс} в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (*b*), *C3* (*b*), *C4* (*c*), *C5* (∂) и *C6* (*e*) ПС шлифованной Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 при CA, TA и KA

(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 \rightarrow KA \rightarrow TA, в системе № 3 и 4 — в последовательности СА \rightarrow TA \rightarrow KA. 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, ∂). Уменьшение $\sigma_{\text{мин}}$ в системах № 1 и 4 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системе № 2 — в последовательности КА \rightarrow ТА \rightarrow СА, в системе № 3 — в последовательности КА \rightarrow ТА \rightarrow СА, в системе № 3 — в последовательности СА \rightarrow ТА \rightarrow КА. 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 \rightarrow KA \rightarrow 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 СА \rightarrow КА \rightarrow ТА. 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, б), а в системах № 2 и 3 — при комбинированном. Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1 и 4 происходит в последовательности СА $\rightarrow KA \rightarrow TA$, в системах № 2 и 3 — в последовательности КА $\rightarrow CA \rightarrow TA$. 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, θ). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1-3 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системе № 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{123}

66

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 *C4* наибольшие $\sigma_{\text{макс}}$ в системе № 1 зафиксированы при комбинированном нагружении, в системе № 2 — при силовом нагружении, в системах № 3 и 4 — при тепловом (см. рис. 2, *г*). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системе № 1 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности ГА \rightarrow КА \rightarrow СА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{124} 0,49, 0,54, 1,45 и 1,62; K_{224} 1,11, 0,93, 1,38 и 1,31; K_{324} 2,28, 1,74, 0,95 и 0,81 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, ∂). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системе № 1 происходит в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА, в системах № 2–4 — в последовательности КА \rightarrow \rightarrow СА \rightarrow ТА. 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 σ_{макс} зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 3 — при силовом (см. рис. 2, *e*). Уменьшение σ_{макс} в системах № 1, 2 и 4 происходит в последовательности КА → СА → → ТА, системе № 3 — в последовательности СА → → КА → ТА. 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 σ_{cp} показано на рис. З. Видно, что силовое нагружение оказывается приоритетным для σ_{cp} в 12 блоках, комбинированное нагружение — в 10 блоках, тепловое — в двух блоках.

В поверхности *C1* наибольшие σ_{cp} зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при силовом нагружении, в системе № 3 — при комбинированном (см. рис. 3, *a*). Уменьшение σ_{cp} происходит в системах № 1, 2 и 4 в последовательности СА \rightarrow KA \rightarrow \rightarrow TA, в системе № 3 — в последовательности КА \rightarrow CA \rightarrow 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 σ_{cp} зафиксированы в системах № 1–3 при комбинированном нагружении, в системе № 4 — при силовом (см. рис. 3, б). Уменьшение σ_{cp} происходит в системах № 1–3 в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системе № 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow \rightarrow ТА. 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 σ_{ср} зафиксированы в системах № 1 и 3 при комбинирован-



Рис. З. Влияние вида нагружения на σ_{ср} в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (*б*), *C3* (*в*), *C4* (*г*), *C5* (*∂*) и *C6* (*е*) ПС шлифованной Si₃N₄−TiC-керамики систем № 1–4 при CA, ТА и КА

ном нагружении, в системах № 2 и 4 — при силовом (см. рис. 3, е). Уменьшение $\sigma_{\rm ср}$ в системах № 1 и 3 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системах № 2 и 4 — в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА. 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 σ_{cp} зафиксированы в системах № 1 и 2 при силовом нагружении, в системах № 3 и 4 — при тепловом (см. рис. 3, *г*). Уменьшение σ_{cp} происходит системах № 1 и 2 в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности ТА \rightarrow КА \rightarrow СА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{134} 0,46, 0,59, 1,52 и 1,53; K_{234} 0,88, 0,69, 1,28 и 1,16; K_{334} 1,89, 1,18, 0,84 и 0,76 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C5* наибольшие σ_{cp} зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 3, ∂), причем уменьшение σ_{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 σ_{cp} зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 3, *e*), а уменьшение σ_{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 КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА \rightarrow ТА \rightarrow КА. 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, б). Уменьшение *s* в системах № 1 и 4 происходит в последовательности СА \rightarrow КА \rightarrow ТА, в системах № 2 и 3 — в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА. 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 *С3* наибольшие *s* зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном



Рис. 4. Влияние вида нагружения на *s* в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (*b*), *C3* (*b*), *C4* (*z*), *C5* (*d*) и *C6* (*e*) ПС шлифованной Si₃N₄−TiC-керамики систем № 1–4 при CA, TA и KA

нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 4, *в*). Уменьшение *s* в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 3 — в последовательности СА → ТА → → КА, в системе № 4 — в последовательности СА → КА → ТА. 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, *г*). Уменьшение *s* в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА \rightarrow СА \rightarrow ТА, в системе № 3 — в последовательности КА \rightarrow ТА \rightarrow СА, в системе № 4 — в последовательности ТА \rightarrow КА \rightarrow СА. 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, ∂). Уменьшение *s* в системах № 1 и 2 происходит в последовательности СА \rightarrow KA \rightarrow TA, в системах № 3 и 4 — в последовательности КА \rightarrow CA \rightarrow 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 Si₃N₄ ceramic grinding / H. Wang, Y. Wu, P. Zhou [et al.] // Academic Journal of Manufacturing Engineering. -2018. - Vol. 16, No 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, № 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 КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности ТА → КА → СА. 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 Si₃N₄-TiCкерамики. Обобщенные и упорядоченные зависимости позволили объяснить влияние режима резания на интенсивность износа инструментов из Si₃N₄-TiC-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 Si₃N₄-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, № 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, Ne 1. — P. 78–81.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Si₃N₄керамики / 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 Si₃N₄ ceramic grinding / Jian Sun, Yuhou Wu, Peng Zhou [et al.] // Academic Journal of Manufacturing Engineering. -2018. - Vol. 16, N $_{2}$ 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 Si₃N₄-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.

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.

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, № 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, N 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, \mathbb{N} 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, No. 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, $N_{\rm P}$ 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 напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si₃N₄-TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 12. — С. 54-60.

18. Кузин, В. В. Тепловой анализ напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si₃N₄-TiC-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 Si₃N₄-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.

NANO SINGAPORE 2021 WWW.expoclub.ru

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ