

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. А. Волосова**,
к. т. н. **М. Ю. Федоров**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

УДК 666.3:546.28'171]:621.914.22

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ Al_2O_3 -TiC-КЕРАМИКИ С ПОКРЫТИЯМИ AlN И TiN

Проанализированы и систематизированы результаты силового, теплового и комбинированного анализа напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN. Установленные взаимосвязи использованы для создания керамических режущих инструментов нового поколения с расширенной областью применения.

Ключевые слова: Al_2O_3 -TiC-керамика, покрытия AlN и TiN, поверхностный слой (ПС), интенсивность напряжений, системный анализ, компьютерная инженерия.

ВВЕДЕНИЕ

На эксплуатационную надежность керамических изделий существенно влияют деформационное поведение, напряженное состояние и характер разрушения их поверхностного слоя (ПС), являющегося уникальным элементом изготовленного изделия [1]. Современные технологии позволяют управлять состоянием ПС; в настоящее время имеется возможность создания трех видов ПС [2–6]. *Первый вид* ПС формируется на керамике в результате механической обработки с использованием алмазных шлифовальных кругов и характеризуется многослойной дефектной структурой, а также присутствием трещин на границе ПС – керамика и высокими остаточными напряжениями [7–11]. *Второй вид* ПС образуется в результате разрушения (испарения) дефектного ПС первого вида высококонцентрированными источниками энергии, например гидроабразивной струей, лазерным лучом, электронным пучком и плазменной струей. Так, в результате импульсного лазерного воздействия побочным эффектом удаления дефектного слоя является образование «нового» слоя с минимальным числом дефектов, сглаженным внешним рельефом и структурой, сформированной по механизму фрагментации

внешних зерен керамики [12]. *Третьим видом* ПС являются слои осажденного функционального покрытия на мало дефектную керамику, обеспечивающие залечивание открытых полостей и создание благоприятных условий фрикционного взаимодействия керамического изделия с контрдеталью при эксплуатации [13].

Сравнительные испытания инструментов из Al_2O_3 -TiC-керамики с разными видами ПС показали, что наибольшую эксплуатационную надежность обеспечивал ПС третьего вида, образованный слоями AlN и TiN. Позитивное влияние этого ПС на надежность инструментов проявлялось в снижении интенсивности элементарных актов разрушения рабочих поверхностей инструментов. Критический анализ результатов физических и вычислительных исследований оксидной керамики подтвердил этот вывод о существенных различиях в поведении ПС разных видов при разных схемах нагружения [14–28]. Природа этих различий базируется на взаимосвязи деформационного поведения и напряженного состояния ПС с элементарными актами его разрушения. Для понимания этой природы изучено деформационное поведение и напряженно-деформированное состояние ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN при силовом, тепловом и комбинированном нагружении [29–31]. Повышение информативности закономерностей, установленных в этих работах, весьма актуально для решения инженерных задач.

Цель настоящей работы — установить степень влияния разных видов нагружения на напряженное состояние ПС шлифованной



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

Al_2O_3 -TiC-керамики с использованием систематизированных результатов расчетов интенсивности напряжений (σ_i) в контрольных точках (КТ) при силовом, тепловом и комбинированном анализах.

Статья является заключительной в цикле публикаций [29–31].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный анализ выполнен с использованием методики [32] для четырех систем Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями: система № 1 — Al_2O_3 (зерно) — MgO (межзеренная фаза) — Al_2O_3 (матрица)/AlN (покрытие), система № 2 — TiC-MgO- Al_2O_3 /AlN, система № 3 — Al_2O_3 -MgO- Al_2O_3 /TiN, система № 4 — TiC-MgO- Al_2O_3 /TiN. По результатам силового (СА), теплового (ТА) и комбинированного (КА) анализов напряженного состояния ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN определены значения четырех статистических характеристик (наименьшие $\sigma_{\min}$, наибольшие $\sigma_{\max}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение s для σ_i) и установлена степень влияния разных видов нагружения на эти характеристики с использованием диаграмм и оценочного коэффициента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1–4 показано влияние разных видов нагружения на статистические характеристики в поверхностях C1–C6 ПС керамики четырех систем. Общий анализ этих диаграмм показал,

что степень влияния комбинированного нагружения на $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\text{ср}}$ оказалась наибольшей в 39 блоках (из 72), силового — в 33 блоках, тепловое нагружение не оказывает преобладающего влияния на эти статистические характеристики. Наибольшее влияние на s оказывает комбинированное нагружение; доминирование этого вида нагружения проявляется в 21 блоке (из 24). Силовое нагружение оказывает преобладающее влияние на s в двух блоках, тепловое — в одном.

Последовательно проанализируем выявленные взаимосвязи для каждой статистической характеристики.

Влияние вида нагружения на $\sigma_{\min}$ показано на рис. 1. Видно, что силовое нагружение оказывает преобладающее влияние на $\sigma_{\min}$ в 14 блоках (из 24), комбинированное нагружение — в 10 блоках.

В поверхности C1 наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 1, а), причем уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах происходит в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{111} 0,4, 0,18, 0,27 и 0,19; K_{211} 0,75, 0,81, 0,7 и 0,72; K_{311} 1,9, 4,57, 2,59 и 3,76 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности C2 наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы в системах № 1, 2 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 3 — при силовом (см. рис. 1, б). Уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах № 1 и 4 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 2 — в последовательности КА → ТА →

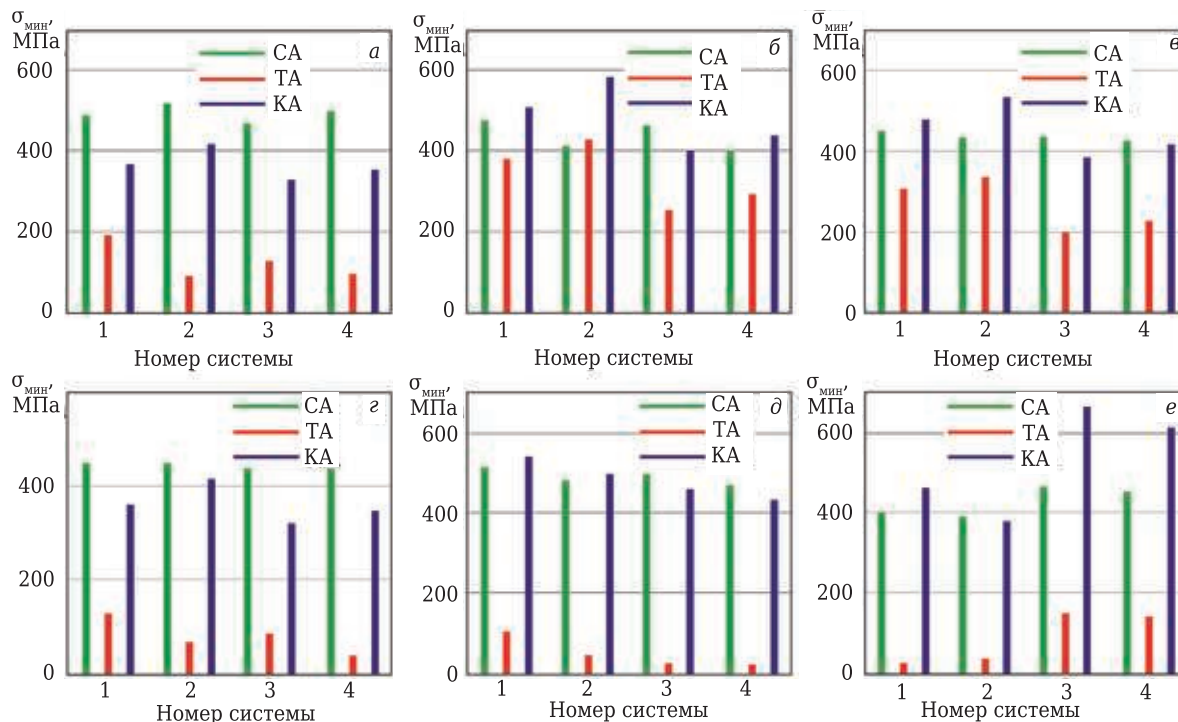


Рис. 1. Влияние вида нагружения на $\sigma_{\min}$ в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытием систем № 1–4 при СА, ТА и КА

→ СА, в системе № 3 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{112} 0,8, 1,04, 0,55 и 0,73; K_{212} 1,06, 1,41, 0,86 и 1,1; K_{312} 1,33, 1,36, 1,56 и 1,51 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С3 наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 1, в). Уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{113} 0,67, 0,77, 0,46 и 0,53; K_{213} 1,06, 1,22, 0,88 и 0,98; K_{313} 1,58, 1,58, 1,92 и 1,83 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С4 керамики всех систем наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы при силовом нагружении (см. рис. 1, г). Уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах № 1–4 происходит в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{114} 0,28, 0,15, 0,2 и 0,09; K_{214} 0,8, 0,92, 0,73 и 0,79; K_{314} 2,8, 6,01, 3,73 и 8,49 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С5 наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 1, д). Уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{115} 0,21, 0,1, 0,06 и 0,05; K_{215} 1,05, 1,03, 0,92 и 0,92; K_{315} 5,03, 10,14, 15,86 и 17,28 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С6 наибольшие $\sigma_{\min}$ зафиксированы в системах № 1, 3 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 2 — при силовом (см. рис. 1, е). Уменьшение $\sigma_{\min}$ в системах № 1, 3 и 4 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 2 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{116} 0,07, 0,1, 0,32 и 0,32; K_{216} 1,15, 0,97, 1,43 и 1,35; K_{316} 17,04, 9,58, 4,43 и 4,27 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

На рис. 2 показано влияние вида нагружения на $\sigma_{\max}$. Видно, что силовое нагружение оказывает преобладающее влияние на $\sigma_{\max}$ в 10 блоках (из 24), комбинированное нагружение — в 14 блоках.

В поверхности С1 наибольшие $\sigma_{\max}$ зафиксированы в системах № 2, 3 и 4 при силовом нагружении, в системе № 1 — при комбинированном (см. рис. 2, а). Уменьшение $\sigma_{\max}$ в системах № 2–4 происходит в последовательности СА → КА → ТА, в системе № 1 — в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для поверхности С1: K_{121} 0,46, 0,5, 0,39 и 0,4; K_{221} 1,03, 0,98, 0,93 и 0,92; K_{321} 2,22, 1,99, 2,4 и 2,27 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С2 наибольшие $\sigma_{\max}$ зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 2, б), причем уменьшение $\sigma_{\max}$ происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{122} 0,85, 0,99, 0,68 и 0,79; K_{222} 1,68, 1,71, 1,48 и 1,51; K_{322} 1,99, 1,72, 2,16 и 1,9 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

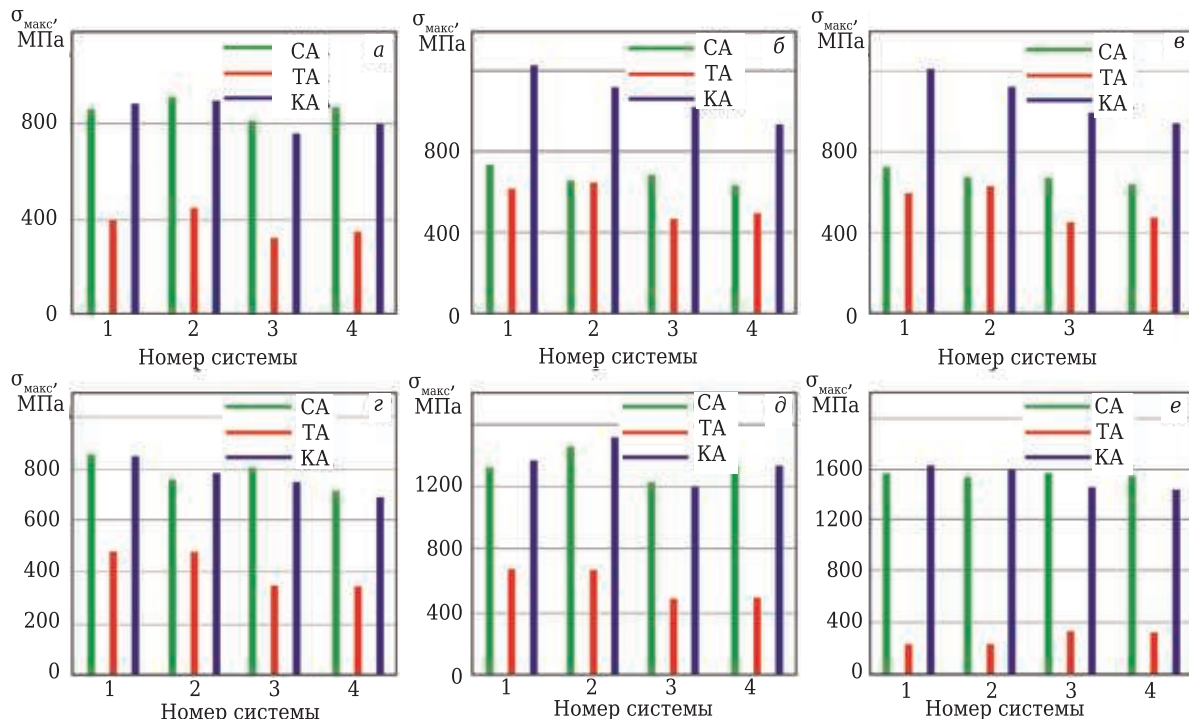


Рис. 2. Влияние вида нагружения на $\sigma_{\max}$ в поверхностях С1 (а), С2 (б), С3 (в), С4 (г), С5 (д) и С6 (е) ПС $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики с покрытием систем № 1–4 при СА, ТА и КА

В поверхности *C3* наибольшие $\sigma_{\text{макс}}$ зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 2, в), причем уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{123} 0,82, 0,94, 0,67 и 0,76; K_{223} 1,67, 1,66, 1,47 и 1,48; K_{323} 2,03, 1,77, 2,21 и 1,96 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C4* наибольшие $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1, 3 и 4 зафиксированы при силовом нагружении, в системе № 2 — при комбинированном (см. рис. 2, г). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1, 3 и 4 происходит в последовательности СА → КА → ТА, в системе № 2 — в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{124} 0,56, 0,63, 0,43 и 0,48; K_{224} 0,99, 1,04, 0,93 и 0,97; K_{324} 1,76, 1,65, 2,16 и 2 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C5* наибольшие значения $\sigma_{\text{макс}}$ зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 2, д). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{125} 0,52, 0,46, 0,4 и 0,36; K_{225} 1,04, 1,05, 0,98 и 1; K_{325} 2, 2,28, 2,48 и 2,76 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C6* наибольшие значения $\sigma_{\text{макс}}$ зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 2, е). Уменьшение $\sigma_{\text{макс}}$ в системах № 1 и 2 происходит в последовательности

КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{126} 0,15, 0,14, 0,21 и 0,21; K_{226} 1,04, 1,04, 0,93 и 0,93; K_{326} 7,03, 7,27, 4,35 и 4,53 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Влияние вида нагружения на $\sigma_{\text{ср}}$ показано на рис. 3. Видно, что комбинированное нагружение оказывается приоритетным для $\sigma_{\text{ср}}$ в 15 (из 24) блоках, силовое нагружение — в 9 блоках.

В поверхности *C1* наибольшие $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 3, а), причем уменьшение $\sigma_{\text{ср}}$ происходит в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{131} 0,5, 0,47, 0,39 и 0,37; K_{231} 0,92, 0,92, 0,84 и 0,83; K_{331} 1,82, 1,95, 2,17 и 2,23 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C2* наибольшие $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 3, б), причем уменьшение $\sigma_{\text{ср}}$ происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{132} 0,9, 1, 0,68 и 0,76; K_{232} 1,31, 1,39, 1,13 и 1,18; K_{332} 1,45, 1,39, 1,65 и 1,55 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C3* наибольшие $\sigma_{\text{ср}}$ зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 3, в), причем уменьшение $\sigma_{\text{ср}}$ происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{133} 0,85, 0,91, 0,64 и 0,69; K_{233} 1,27, 1,3, 1,1 и 1,12; K_{333} 1,49, 1,43, 1,72 и 1,61 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

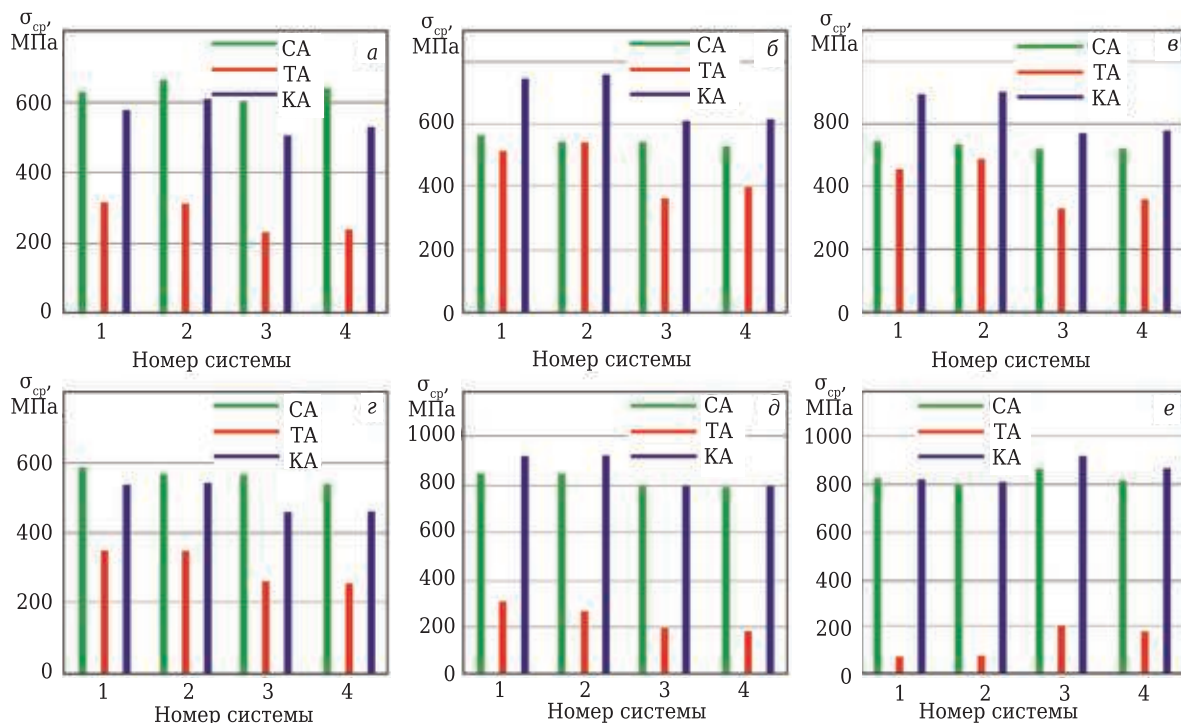


Рис. 3. Влияние вида нагружения на $\sigma_{\text{ср}}$ в поверхностях *C1* (а), *C2* (б), *C3* (в), *C4* (г), *C5* (д) и *C6* (е) ПС $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики с покрытием систем № 1–4 при СА, ТА и КА

В поверхности *C4* наибольшие σ_{cp} зафиксированы во всех системах при силовом нагружении (см. рис. 3, *з*). Уменьшение σ_{cp} происходит в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{134} 0,6, 0,61, 0,47 и 0,47; K_{234} 0,92, 0,95, 0,83 и 0,85; K_{334} 1,52, 1,56, 1,77 и 1,81 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C5* наибольшие σ_{cp} зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 3, *д*), причем уменьшение σ_{cp} происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{135} 0,36, 0,31, 0,24 и 0,23; K_{235} 1,09, 1,08, 1,09 и 1,02; K_{335} 3,07, 3,56, 4,16 и 4,36 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C6* наибольшие σ_{cp} зафиксированы в системе № 1 при силовом нагружении, в системах № 2–4 — при комбинированном (см. рис. 3, *е*). Уменьшение σ_{cp} в системе № 1 происходит в последовательности СА → КА → ТА, в системах № 2–4 — в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{136} 0,09, 0,1, 0,23 и 0,23; K_{236} 0,99, 1,01, 1,06 и 1,07; K_{336} 11,7, 9,9, 4,67 и 4,59 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 21 блоке (из 24). Силовое нагружение оказывает преобладающее влияние на s в двух блоках, тепловое — в одном.

В поверхности *C1* наибольшие s зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 4, *а*), причем уменьшение s происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{141} 0,5, 0,85, 0,53 и 0,71; K_{241} 1,44, 1,27, 1,32 и 1,27; K_{341} 2,89, 1,49, 2,51 и 1,79 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C2* наибольшие s зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 4, *б*), причем уменьшение s происходит в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{142} 0,9, 0,93, 0,92 и 0,92; K_{242} 2,65, 2,07, 2,56 и 2,12; K_{342} 2,95, 2,23, 2,77 и 2,3 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C3* наибольшие s зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 4, *в*), причем уменьшение s в системах № 1, 2 и 4 происходит в последовательности КА → ТА → СА, в системе № 3 — в последовательности КА → СА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{143} 1,02, 1,17, 0,99 и 1,13; K_{243} 2,45, 2,11, 2,31 и 2,18; K_{343} 2,4, 1,81, 2,33 и 1,93 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности *C4* наибольшие s зафиксированы в системах № 1, 3 и 4 при комбинированном нагружении, в системе № 2 — при тепловом (см. рис. 4, *г*). Уменьшение s в системах № 1, 3 и 4 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 2 — в последовательности ТА → КА → СА. Значения коэффициентов для этой поверх-

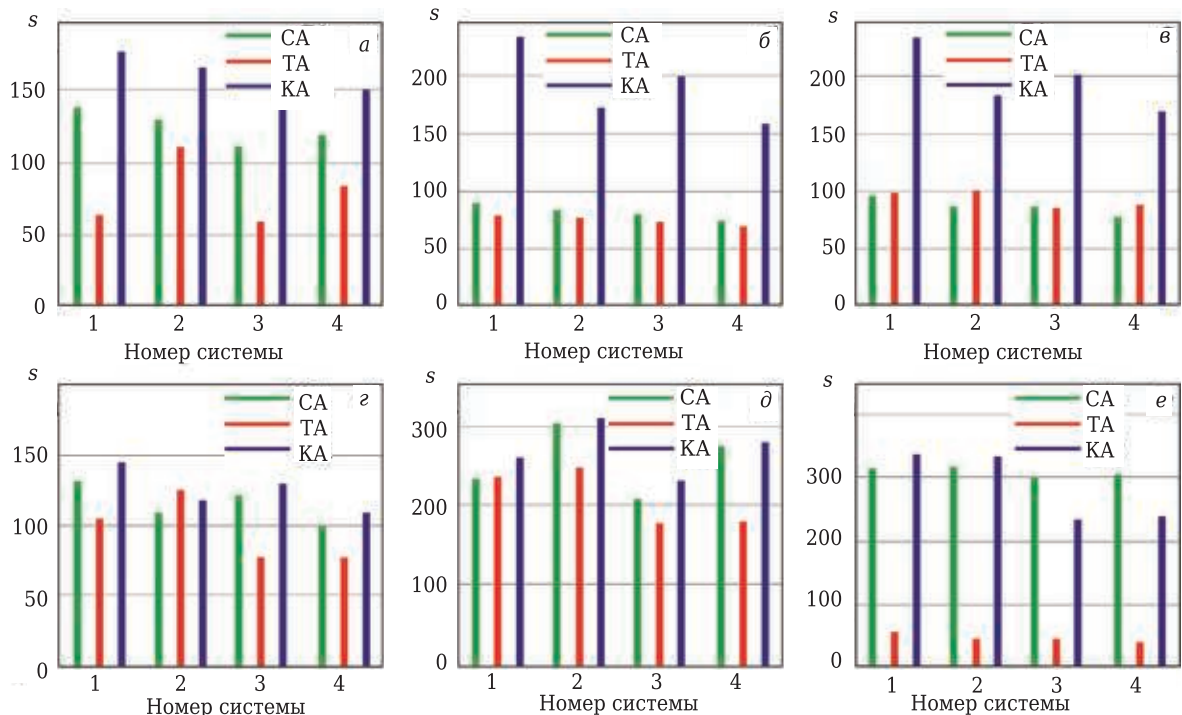


Рис. 4. Влияние вида нагружения на s в поверхностях *C1* (а), *C2* (б), *C3* (в), *C4* (г), *C5* (д) и *C6* (е) ПС $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ -керамики с покрытием систем № 1–4 при СА, ТА и КА

ности: K_{144} 0,79, 1,15, 0,64 и 0,96; K_{244} 1,11, 1,07, 1,07 и 1,1; K_{344} 1,4, 0,94, 1,67 и 1,15 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С5 наибольшие значения s зафиксированы во всех системах при комбинированном нагружении (см. рис. 4, д), причем уменьшение s в системах № 2–4 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системе № 1 — в последовательности КА → ТА → СА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{145} 1,01, 0,82, 0,85 и 0,66; K_{245} 1,11, 1,02, 1,11 и 1,03; K_{345} 1,1, 1,25, 1,3 и 1,56 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

В поверхности С6 наибольшие s зафиксированы в системах № 1 и 2 при комбинированном нагружении, в системах № 3 и 4 — при силовом (см. рис. 4, е). В поверхности С6 уменьшение s в системах № 1 и 2 происходит в последовательности КА → СА → ТА, в системах № 3 и 4 — в последовательности СА → КА → ТА. Значения коэффициентов для этой поверхности: K_{146} 0,18, 0,15, 0,16 и 0,14; K_{246} 1,07, 1,05, 0,78 и 0,78; K_{346} 5,81, 7,11, 4,9 и 5,71 для систем № 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Библиографический список

1. **Kuzin, Valery V.** A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton, Andrey D. Batako // Proceedings of the 10th International Conference on Manufacturing Research ICMR 2012. — 2012. — P. 523–528.
2. **Zan, Qing Feng.** Temperature mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ multilayer ceramics / Qing Feng Zan, Chang An Wang, Li Min Dong, Yong Huang // Key Eng. Mater. — 2007. — Vols. 280–283. — P. 1877–1880.
3. **Nie, Guanglin.** Fabrication of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$ composite ceramics with enhanced performance via a heterogeneous precipitation coating process / Guanglin Nie, Yehua Li, Pengfei Sheng, Zhuo Tian // Ceram. Int. — 2020. — Vol. 46, № 13. — P. 21156–21165.
4. **Xue, Weijiang.** Al_2O_3 ceramics with well-oriented and hexagonally ordered pores: The formation of microstructures and the control of properties / Weijiang Xue, Yong Huang, Zhipeng Xie, Wei Liu // J. Eur. Ceram. Soc. — 2012. — Vol. 32, № 12. — P. 3151–3159.
5. **Kuzin, V. V.** Correlation of Al_2O_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.
6. **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.
7. **Kuzin, V. V.** Surface modification of zirconia (Y-TZP) ceramics induced by pulsed laser machining / V. V. Kuzin, S. Grigor'ev, M. Fedorov, M. Portnoy // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752–753. — P. 481–484.
8. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al_2O_3 -TiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.
9. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al_2O_3 -TiC-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием систематизированных результатов расчетов интенсивности напряжений при силовом, тепловом и комбинированном анализах определены взаимосвязи вида нагружения со статистическими характеристиками напряженного состояния ПС Al_2O_3 -TiC-керамики с покрытиями AlN и TiN. Установлено, что силовое нагружение оказывает преобладающее влияние на напряженное состояние ПС керамики с покрытиями. Выявленные взаимосвязи позволили разработать рекомендации для выбора покрытий для керамических режущих инструментов из Al_2O_3 -TiC-керамики с расширенной областью применения.

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

- керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63–68.
8. **Kuzin, V. V.** Features of Al_2O_3 -TiC ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.
9. **Кузин, В. В.** Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.
10. **Kuzin, V. V.** Estimation of the sensitivity of a complex of characteristics of the stressed state of ceramics — coating boundary to the changes in the properties of structural elements of this system / V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 6. — P. 697–703.
11. **Кузин, В. В.** Оценка чувствительности комплекса характеристик напряженного состояния границы «керамика - покрытие» к изменению свойств структурных элементов этой системы / В. В. Кузин, М. Ю. Федоров, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2017. — № 12. — С. 75–81.
12. **Kuzin, V. V.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / V. V. Kuzin // Key Eng. Mater. Precision Machining. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.
13. **Němeček, J.** X-ray diffraction study of macroscopic residual stresses of $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ oxide cutting ceramics after surface machining / J. Němeček, K. Kolařík, J. Čapek, N. Ganey, K. Trojan, V. V. Kuzin // Experimental Stress Analysis — 56th International Scientific Conference, EAN 2018. Conference Proceedings. — 2018. — P. 296–302.
14. **Kuzin, V. V.** Oxide ceramic surface layer modification using continuous laser radiation / V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 53–57.
15. **Кузин, В. В.** Модификация поверхностного слоя оксидной керамики с использованием непрерывного лазерного излучения / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 1. — С. 51–55.

13. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, A. D. Batako // Proceedings of the 37th International MATADOR Conference. — 2013. — P. 181–184.
 14. **Yin, Zengbin.** Cutting performance and life prediction of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ micro-nano-composite ceramic tool when machining austenitic stainless steel / Zengbin Yin, Chuanzhen Huang, Juntang Yuan, Bin Zou // *Ceram. Int.* — 2015. — Vol. 41, № 5 (B). — P. 7059–7065.
 15. **Kivak, Turgay.** Study on turning performance of PVD TiN coated $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiCN}$ ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles / Turgay Kivak, Murat Sarıkaya, Çağrı Vakkas Yıldırım, Şenol Şirin // *Journal of Manufacturing Processes.* — 2020. — Vol. 56, Part A. — P. 522–539.
 16. **Erbacher, T.** Determination of Residual Stress Gradients in Al_2O_3 Ceramics after Thermal and Mechanical Loading / T. Erbacher, Michael Ott, Tilmann Beck, Otmar Vöhringer // *Mater. Sci. Forum.* — 2005. — Vols. 490, 491. — P. 485–490.
 17. **Konovalenko, Igor S.** Numerical study of deformation and fracture of ceramics nanocomposite with different structural parameters under mechanical loading / Igor S. Konovalenko, Egor M. Vodoplyanov, Evgeniy V. Shilko // *Key Eng. Mater.* — 2016. — Vol. 683. — P. 601–608.
 18. **Sadowski, Tomasz.** Theoretical meso-model of $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2$ ceramic response under compression / Tomasz Sadowski, Liviu Marsavina // *Key Eng. Mater.* — 2014. — Vol. 601. — P. 92–95.
 19. **Sevecek, Oldrich.** Assessment of crack-related problems in layered ceramics using the finite fracture mechanics and coupled stress-energy criterion / Oldrich Sevecek, Michal Kotoul, D. Leguillon, Eric Martin // *Procedia Structural Integrity.* — 2016. — Vol. 2. — P. 2014–2021.
 20. **Medvedovski, Eugene.** Influence of corrosion and mechanical loads on advanced ceramic components / Eugene Medvedovski // *Ceram. Int.* — 2013. — Vol. 39, № 3. — P. 2723–2741.
 21. **Liu, Changxia.** Fracture behaviour, microstructure, and performance of various layered-structured $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC--WC--Co}$ composites / Changxia Liu, Junlong Sun, Chao Wang, Fengxun Li // *Ceram. Int.* — 2021. — Vol. 47, № 14. — P. 19766–19773.
 22. **Yin, Zengbin.** Dynamic fatigue behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ micro-nano-composite ceramic tool materials at ambient and high temperatures / Zengbin Yin, Chuanzhen Huang, Bin Zou, Hanlian Liu // *Mater. Sci. Eng., A.* — 2014. — Vol. 593. — P. 64–69.
 23. **Sullivan, John Lawrence.** Microtribological studies of two-phase $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ ceramic at low contact pressure / John Lawrence Sullivan, Baogui Shi, S. O. Saied // *Tribology International.* — 2006. — Vol. 38, № 11/12. — P. 987–994.
 24. **Ruiz-Hervias, Jesus.** Residual stresses in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y-TZP}$ ceramic laminates fabricated by tape and slip casting / Jesus Ruiz-Hervias, Giovanni Bruno, Jonas Gurauskis, A. J. Sanchez-Herencia, C. Baudin // *Mater. Sci. Forum.* — 2008. — Vols. 571, 572. — P. 327–332.
 25. **Del Valle, Rosa.** Optimizing substrate and intermediate layers geometry to reduce internal thermal stresses and prevent surface crack formation in 2D-multilayered ceramic coatings / Rosa Del Valle, D. Lévêque, M. Parlier // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2008. — Vol. 28, № 4. — P. 711–716.
 26. **Zhang, Gaofeng.** Discrete element simulation of the ultrasonic-assisted scratching process of Al_2O_3 ceramic under compressive pre-stress / Gaofeng Zhang, Gaocan Wu, Yijiang Zeng, Guoguang Xie // *Ceram. Int.* — 2020. — Vol. 46, № 18 (A). — P. 29090–29100.
 27. **Zhang, Mengwen.** A study on the failure behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ni}$ micro-layered beams under three point bending / Mengwen Zhang, Xudong Sun, Xiaozhi Hu // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* — 2020. — Vol. 110.
 28. **Sakuma, Taketo.** A modern approach to control grain boundaries in ceramics / Taketo Sakuma, Yuichi Ikuhara, Takahisa Yamamoto // *Mater. Sci. Forum.* — 2004. — Vols. 467–470. — P. 557–566.
 29. **Кузин, В. В.** Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики с покрытиями AlN и TiN / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры.* — 2021. — № 6. — С. 64–69.
 30. **Кузин, В. В.** Тепловой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики с покрытиями AlN и TiN / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры.* — 2021. — № 7. — С. 57–62.
 31. **Кузин, В. В.** Комбинированный анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики с покрытиями AlN и TiN / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры.* — 2021. — № 8. — С. 66–71.
 32. **Kuzin, V. V.** Systematic analysis of the stress-strain state of the surface layer of ground $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--TiC}$ ceramics / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2021. — Vol. 62, № 2. — P. 189–195.
- Кузин, В. В.** Системный анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--TiC}$ -керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // *Новые огнеупоры.* — 2021. — № 3. — С. 64–70. ■

Получено 27.10.21

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